

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Změny obsahu fosforu v půdě v závislosti na různých
systémech hnojení dlouhodobého polního pokusu**

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Jan Hladík

Studijní program: Pěstování rostlin

Specializace: Výživa a ochrana rostlin

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

© 2024 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci “Změny obsahu fosforu v půdě v závislosti na různých systémech hnojení dlouhodobého polního pokusu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 17. 4. 2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu práce, panu doc. Ing. Martinu Kulhánkovi, Ph.D., za odvahu jít do toho se mnou podruhé. Byl mi vynikajícím mentorem jak při psaní bakalářské práce, tak i u této diplomové práce. Dále bych chtěl vyzdvihnout svou rodinu a přítelkyni za neutuchající podporu.

Změny obsahu fosforu v půdě v závislosti na různých systémech hnojení dlouhodobého polního pokusu

Souhrn

Vzhledem ke snižování zásob neobnovitelných fosfátových hornin začíná reálně hrozit nedostatek minerálních fosforečných hnojiv. Fosfátové horniny se především pro evropské země stávají strategickou surovinou a zvyšující se ceny vedou k hledání alternativ recyklace fosforu. Ekonomicky nejlépe se jeví využití různých odpadních materiálů obsahujících fosfor ve využitelném množství, například čistírenských kalů, ovšem reálná aplikace může být omezena zatížením rizikovými látkami (těžkými kovy, farmaky, patogeny aj.).

V dlouhodobých pokusech na stanovištích s rozdílnými půdními a klimatickými podmínkami (Humpolec, Hněvčevy a Suchdol) je na tříhonném osevním postupu (brambory, ozimá pšenice a jarní ječmen) zkoumán vliv tří systémů hnojení (chlévkový hnůj, čistírenský kal a průmyslová hnojiva) proti nehnojené kontrole. Hodnoceny byly různé frakce fosforu v půdě od snadno přístupných až po reziduální P. Pozornost byla věnována i sorpčním charakteristikám fosforu.

Na základě srovnání variant z hlediska okamžitě přístupného fosforu (P H₂O) bylo zpravidla zjištěno, že i přes výrazně vyšší množství P dodaného čistírenskými kaly byly hodnoty srovnatelné s ostatními variantami hnojení. Je to pravděpodobně způsobeno srážením P v čistírenských kálech prostřednictvím železa a hliníku. Při sledování obtížněji dostupných forem P už jsou u varianty hnojené kaly zpravidla dosahovány výrazně vyšší hodnoty ve srovnání se všemi ostatními variantami. Aplikace čistírenských kalů vedla i k výraznému zvýšení stupně nasycení půdy fosforem.

Jako hlavní závěry práce lze uvést následující. Varianta hnojená kaly vedla k výrazné akumulaci fosforu v půdě, avšak riziko vyplavení P je zde pravděpodobně menší než u varianty hnojené hnojem. V případě, že je fosfor limitující živinou, jeví se jako nejvhodnější z hlediska jeho doplnění varianta hnojená minerálním P ve variantě NPK. Z komplexnějšího pohledu je však vhodnější hnůj, jelikož jsou jeho prostřednictvím doplněny organické látky a další živiny.

Klíčová slova: Osevní postup; Hnojení fosforem; Extrakce Mehlich 3; Vodný výluh; Nepřístupné formy P

Changes in soil phosphorus levels as a result of different fertilization systems in a long-term field experiment

Summary

As the supply of non-renewable phosphate rock diminishes, there is a real threat of a shortage of mineral phosphate fertilisers. Phosphate rock is becoming a strategic raw material for European countries in particular and rising prices are leading to a search for alternatives to phosphorus recycling. The economically best option seems to be the use of various waste materials containing phosphorus in usable quantities, such as sewage sludge, but the real application may be limited by the load of hazardous pollutants (heavy metals, drugs, pathogens, etc.).

In long-term experiments on locations with different soil and climatic conditions (Humpolec, Hněvčeves and Suchdol), the effects of three fertilisation systems (farmyard manure, sewage sludge and mineral fertilisers) were compared to unfertilized control. Different fractions of phosphorus in the soil were evaluated, ranging from readily available to residual P. Attention was also paid to the sorption characteristics of phosphorus.

Comparison of the variants in terms of readily available phosphorus (P H₂O) generally showed that, despite the significantly higher amount of P supplied by the sewage sludge, the values were comparable to the other fertilization variants. This is probably due to the precipitation of P in the sewage sludge using iron and aluminum. When looking at the less available P forms, the sludge-fertilized variant usually had significantly higher values compared to all other variants. The application of sewage sludge also led to an increment of degree of phosphorus saturation.

The main conclusions of the study are as follows. The sewage sludge-fertilized variant led to a significant accumulation of phosphorus in the soil, but the risk of P leaching is probably lower here than in the farmyard manure-fertilized variant. In the case where phosphorus is the limiting nutrient, the mineral P in the NPK variant appears to be the most suitable in terms of its replenishment. However, from a more holistic point of view, farmyard manure is preferable as it adds organic matter and other nutrients.

Keywords: Crop rotation; Phosphorus fertilization; Mehlich 3 extraction; Water extraction; Inaccessible P forms

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Hypotézy	8
3	Cíle práce.....	9
4	Literární rešerše.....	10
4.1	Koloběh fosforu v prostředí, fosfor v půdě.....	10
4.1.1	Anorganické sloučeniny fosforu	11
4.1.2	Organické sloučeniny fosforu	12
4.2	Příjem a využití P rostlinou.....	13
4.3	Zdroje fosforu	16
4.3.1	Minerální hnojiva s obsahem P	16
4.3.1.1	Trojité superfosfát	18
4.3.2	Organická hnojiva.....	19
4.3.2.1	Chlévský hnůj	20
4.3.3	Odpadní materiály a vedlejší produkty.....	22
4.3.3.1	Čistírenské kaly.....	23
5	Metodika.....	28
5.1	Analytická stanovení.....	30
5.2	Statistické vyhodnocení	31
6	Výsledky	32
6.1	Stanoviště Humpolec	33
6.1.1	Okamžitě dostupný fosfor	33
6.1.2	Přístupný fosfor	34
6.2	Stanoviště Hněvčeves	35
6.2.1	Okamžitě dostupný fosfor	35
6.2.2	Přístupný fosfor	36
6.3	Stanoviště Suchdol	37
6.3.1	Okamžitě dostupný fosfor	37
6.3.2	Přístupný fosfor	38
6.4	Ostatní charakteristiky fosforu v půdě.....	39
7	Diskuse.....	45
8	Závěr.....	48
9	Literatura	50

1 Úvod

Fosfor je esenciálním prvkem jak pro výživu rostlin, tak pro výživu zvířat. Jeho množství v půdě v podmínkách České republiky je nízké a jeho převážná část je pro rostliny nedostupná. Celosvětové zásoby se podle většiny studií zmenšují, zvyšují se náklady na výrobu fosforečných minerálních hnojiv i náklady na jejich dopravu. Potřeba stále vyšších výnosů plodin pro obživu vzrůstající lidské populace se projevuje zvyšující se poptávkou po P hnojivech a jejich cena výrazně stoupá.

Ztížená dostupnost minerálních zdrojů fosforu a zvýšené nároky na ochranu životního prostředí a produkci potravin vysoké kvality vedou k hledání efektivních možností hnojení fosforem a snahám o omezování jeho ztrát uvolňováním do povrchových i podzemních vod.

Počtení stavy hospodářských zvířat se stále snižují a zvyšuje se počet zemědělských podniků pouze s rostlinnou výrobou. V těchto hospodářstvích se k hnojení dlouhodobě používají pouze průmyslová minerální hnojiva, a i vzhledem k jejich vzrůstajícím cenám může docházet k pouze udržovacímu hnojení především zaměřenému na výnos pěstovaných plodin; prakticky se nehnojí půda, snižuje se obsah organické hmoty a živin, především limitujícího fosforu.

Z těchto důvodů je důležité hledat náhradní zdroje za organická hnojiva především v odpadních materiálech a vedlejších produktech organického původu s obsahem fosforu jako jsou například čistírenské kaly, různé komposty, popele, masokostní moučky a další. Výhodou těchto materiálů je jejich dostupnost, nevýhodou možné zatížení rizikovými prvky a látkami. Z hlediska legislativy jde o odpady, jejichž použití na zemědělskou půdu je upraveno zákonem.

V této diplomové práci, na základě výsledků rozborů obsahu fosforu v dlouhodobých pokusech na třech stanovištích se shodným osevním postupem a třemi různými systémy hnojení, bude posuzován obsah půdního fosforu v závislosti na čase a použitém způsobu hnojení.

2 Hypotézy

Při dlouhodobém nedoplnování P do půdy se dá očekávat pokles zásob přístupného P v půdě zejména na méně úrodných stanovištích.

Tento pokles se pravděpodobně projeví i na stabilních formách P a stupni nasycení půdy fosforem.

Aplikace P různými organickými a minerálními hnojivy povede ke stabilizaci systému z hlediska fosforu, případně ke zvýšení jeho obsahu.

3 Cíle práce

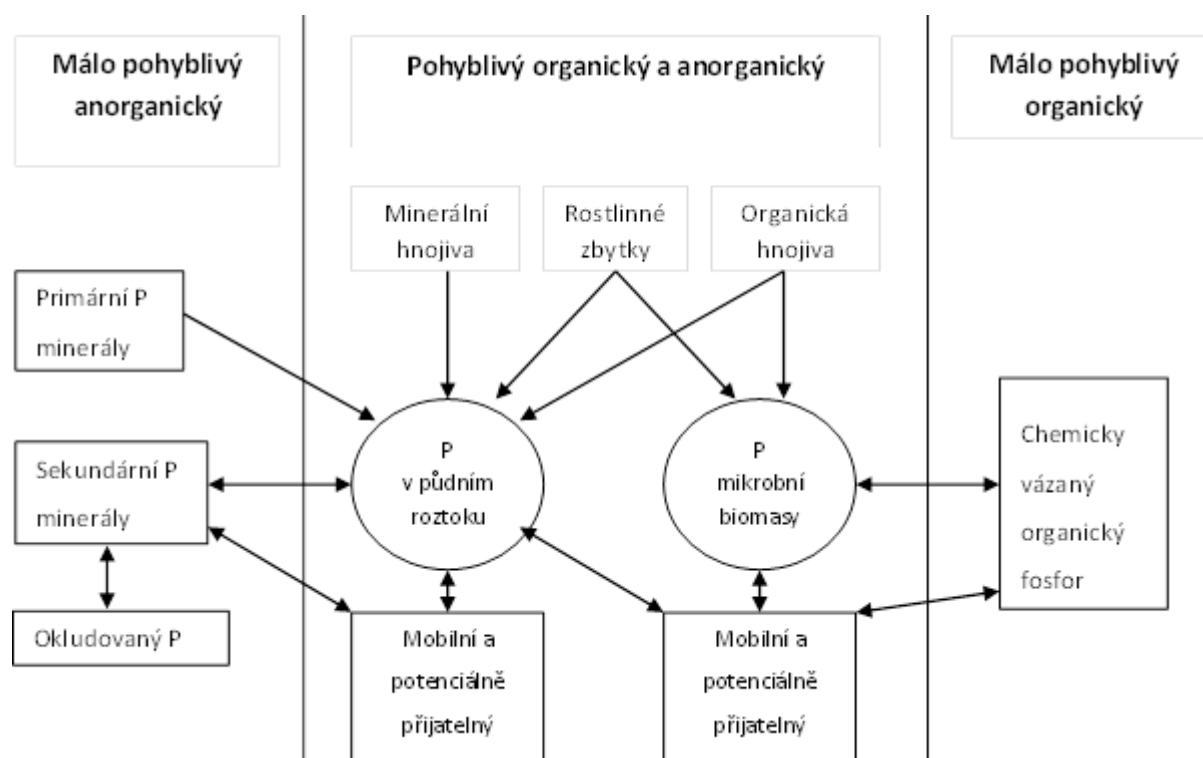
Porovnání vývoje obsahů různých forem fosforu v půdě v závislosti na různých systémech hnojení, plodině a půdně-klimatických podmínkách.

Vyhodnocení vývoje sorpčních charakteristik fosforu v závislosti na hnojení a půdně-klimatických podmínkách.

4 Literární rešerše

4.1 Koloběh fosforu v prostředí, fosfor v půdě

Celkové množství fosforu v půdě se pohybuje v rozmezí 0,02-0,08 % (Balík et al. 2008), podle Vaněk et al. (2007) kolísá od 0,01 do 0,15 %, Marschner (2012) podle textury a typu půd uvádí celkový obsah P v rozmezí 0,01 až 0,20 %. Množství P v půdách přibližně odpovídá jeho obsahu v zemské kůře. V půdě se fosfor nachází v anorganických a organických sloučeninách (Balík et al. 2008). V ornici tvoří organicky vázaný fosfor asi 25-65% podíl. Pro výživu rostlin by dostatečný obsah fosforu měl činit v půdním roztoku 0,2-0,4 mg P/l (Balík et al. 2002). Jednotlivé formy P v půdě jsou zobrazeny na obrázku č. 1.



Obrázek č. 1: Cyklus P v půdě (dle Sharpley & Menzel 1987)

4.1.1 Anorganické sloučeniny fosforu

Fosfor se v přírodě vyskytuje ve svém nejvyšším oxidačním stupni jako aniont kyseliny trihydrogenfosforečné PO_4^{3-} , ve sloučeninách prakticky vždy tvoří orthofosforečnany nebo méně často pyrofosfáty (Mengel 1991). Podle Vaněk et al. (2007) jsou minerální formy fosforu tvořeny hlavně primárními fosforečnými minerály (apatity), což jsou vápenaté sloučeniny tří molekul $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ a jedné molekuly chloridu, fluoridu nebo hydroxidu vápenatého, podle čehož je také odvozen název sloučeniny, např. -chlorapatit apod., a sekundárními vysráženými a adsorbovanými fosforečnany. Balík et al. (2008) uvádí jako nejdůležitější minerální sloučeniny fosforu hydrogenfosforečnan vápenatý, oktakalciumfosfát, hydroxylapatit, fluorapatit, chlorapatit, strengit, variscit. Primární minerál apatit, vyskytující se rozptýleně ve všech magmatických horninách ve formě fluorapatitu, chlorapatitu a hydroxylapatitu, je nejvýznamnějším přirozeným zdrojem fosforu v půdě. V bazických horninách je jeho podíl vyšší než v horninách kyselých (Mehmood et al. 2018). Jako primární minerály se v půdách v nižším zastoupení nacházejí také fosforečnany železa s příměsí Mn - tripity nebo hydratované fosforečnany hliníku – wawelity. V zamokřených půdách s malým obsahem vzduchu se může vyskytovat fosforečnan železnatý - vivianit (Ivanič et al. 1984). V kyselém prostředí, vzhledem ke zvyšující se rozpustnosti a přítomnosti iontů Al a Fe v půdním roztoku, se tvoří soli těchto kationtů - variscit $\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$ a strengit $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$.

Rozpustnost anorganických sloučenin P je určována aktivitou železitých a hlinitých iontů a dále aktivitou iontů vápenatých (Smatanová 2021). V půdách probíhá chemická sorpce fosforu rychle, především s Al a Fe. Tento proces doprovází srážení rozpustných fosforečnanů přes různé nestabilní sloučeniny, které se vysráží ve formě koloidních hydratovaných částic. Ty jsou pro rostliny ještě přijatelné (mají velký povrch), ale následně dochází k jejich dehydrataci a postupné krystalizaci. Jejich rozpustnost a tím i přijatelnost pro rostliny se tak stárnutím těchto sloučenin snižuje (Vaněk et al. 2007).

4.1.2 Organické sloučeniny fosforu

Organické formy fosforu jsou nedílnou a důležitou součástí organické půdní hmoty. Rozdělení organického fosforu v půdě odpovídá rozdělení organické hmoty v profilu (Vaněk et al. 2007). Pod trvalými travními porosty je obsah fosforu v půdě vyšší než v orných půdách (Balík et al. 2008).

Z hlediska výživy rostlin má organický fosfor v půdách význam úměrný své hydrolyzovatelnosti, tzn. rychlosti, kterou je transformován na minerální formu, přístupnou rostlinám (Kolář & Kužel 2002).

Z podstatné části je organický fosfor tvořen fytinem (až 50 % organického P), dále fosfolipidy, nukleovými kyselinami, nukleoproteidy a fosforylovanými lipidy, které jsou součástí kořenové hmoty a dále se do půdy dostávají posklizňovými zbytky (strniště, sláma, chrást, nať, opad listů apod.) a statkovými hnojivy (Vaněk et al. 2007). Některé organofosfáty v půdě se přeměňují velmi rychle na minerální formy, např. fosforylované cukry, jiné, např. fyтин, velmi pomalu (Kolář & Kužel, 2002). Balík et al. (2008) uvádí podíl fyтинů 10-50 %, nukleových kyselin 5-10 %, fosfolipidů, fosfoproteinů, fosfocukrů méně než 1-2 % z organicky vázaného fosforu a značný podíl fosforu vázaný na ionty Al a Fe tvořící komplexy s huminovými kyselinami a fulvokyselinami.

Organicky vázaný fosfor je z velké části výsledkem biologické sorpce půdními mikroorganismy, které do svých těl P imobilizují. Po odumření mikroorganismů může být takto vázaný P v dalších procesech mineralizace uvolněn a zpřístupněn pro rostliny, je tedy velmi významný pro zajištění výživy rostlin fosforem (Vaněk et al. 2007). Podle Balík et al. (2008) činí obsah fosforu v mikrobiální biomase zpravidla 2-5 % z organického fosforu v půdě a v půdách pod trvalými travními porosty může v některých případech dosáhnout až 25 %.

Podíl organického fosforu je velmi závislý na půdním druhu i typu. V minerálních půdách představuje organický P v průměru 30-65 % z celkového fosforu, v organických půdách může být jeho obsah vyšší než 90 % (Jones & Oburger, 2011). V závislosti na půdně-klimatických podmínkách, pěstované kultuře a intenzitě hnojení uvádějí Balík et al. (2008) podíl organicky vázaného fosforu 3-80 % z jeho celkového obsahu v půdě, dle Vaněk et al. (2007) je to pak většinou 30-50 % z jeho celkového obsahu v půdě.

Půdy s větším obsahem organické hmoty vykazují většinou vyšší obsah fosforu než půdy lehké, s malým obsahem organické hmoty. Vyšší obsah fosforu se u většiny půd

nachází v povrchových vrstvách, kde vyšší biologická aktivita způsobuje nahromadění organického materiálu. Jeho množství v tomto profilu se zvyšuje patrně také aplikací hnojiv. Důležitý je také druh mateční horniny, textura půdy a samozřejmě způsob hospodaření (zemědělské zpracování půdy, druh pěstované plodiny). Tyto vlivy mají dopad na relativní obsah minerálních a organických forem fosforu (Sharpley et al. 1995; Vaněk et al. 2007).

4.2 Příjem a využití P rostlinou

Fosfor má v rostlinách velký význam v biochemických reakcích a v přenosech energie (Vaněk et al. 2007). Pro rostliny je fosfor klíčovým prvkem, jeho sloučeniny se účastní řady reakcí jako donory energie nebo jako strukturní části složitých sloučenin, např. ATP, NADP, fosforylovaných sacharidů Calvinova cyklu a kyseliny fosfoglycerové (Tlustoš et al. 2002; Pavlíková et al. 2008).

Rostliny přijímají P ve formě aniontů kyseliny trihydrogenfosforečné, především ve formě H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} (Mengel 1991). Fosfor je v nich obsažen v organické i anorganické formě. Na rozdíl od dusičnanů a síranů, které jsou v průběhu asimilace redukovány, zůstávají fosforečnany v oxidovaném stavu (Pavlíková et al. 2008).

V půdním roztoku u běžných půd je koncentrace fosforečnanů velmi nízká (0,3 až 3 mg P/l) a často o dva až tři řády nižší v porovnání s koncentrací ostatních aniontů a kationtů. Poměr mezi hlavními představiteli P v půdním roztoku, H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} , závisí především na půdní reakci (Tlustoš et al. 2002). Tvorba solí kyseliny fosforečné v půdě je závislá na pH prostředí (to rozhoduje o přítomnosti iontů v půdním roztoku a v sorpčním komplexu) a zásadně ovlivňuje chování fosforu a jeho dostupnost pro rostliny (Mehmood et al. 2018). Tlustoš et al. (2002) udávají, že většina fosforu při pH 5 je přítomna pouze ve formě H_2PO_4^- , kdežto při pH 7 se poměr obou forem P srovnává. Na tuto skutečnost se rostliny většinou velmi dobře adaptovaly, a i při velmi nízkých koncentracích P jsou schopny ho z půdního roztoku přijímat. Tím rostliny překonávají značný koncentrační gradient, neboť koncentrace P v rostlinách je 100-1000x vyšší než jeho koncentrace v půdním roztoku (Tlustoš et al. 2002; Vaněk et al. 2007). Vysoký rozdíl mezi koncentracemi fosforečnanů ve vnějším a vnitřním prostředí vede rostliny k využívání řady mechanismů, které řeší jejich příjem především při nedostatečné zásobě ve vnějším prostředí (Tlustoš et al. 2002). Rostliny mohou při nedostatku fosforu v pletivech aktivovat v membránách kořenů fosfatázy a přenašeče s vysokou afinitou k fosforečnanům pro zlepšení příjmu P (Vaněk et al. 2007). Vylučováním kyselých fosfatáz rostlinami do rhizosféry

dochází v půdě vlivem těchto enzymů k odštěpení anorganického fosfátu z organických sloučenin. Jejich hydrolytická aktivita vůči fytrátům Ca a Fe/Al, které tvoří velký podíl organického fosforu v půdě, je pouze omezená. Hydrolytické enzymy produkované rostlinami jsou také málo mobilní (Balík et al. 2021).

Převážná část celkového P v půdách je pro rostliny nepřijatelná (Schilling 2000). V porovnání s ostatními makroprvky se fosfor jeví jako nejméně mobilní. Také jeho dostupnost pro rostliny je, vzhledem k mineralizaci, vazbám v organických materiálech v půdě a vysoké sorpční kapacitě fosforu, velmi nízká (Marschner 1995). Podle Vaněk et al. (2007) příjem fosforu příznivě ovlivňuje dostatečná vlhkost půdy, příznivá hodnota pH (podle půdního druhu by se měla pohybovat od 5,5 do 7), dostatek organické hmoty v půdě a její dobrá biologická činnost a přiměřený obsah přijatelného fosforu (40-80 mg/kg P). Jeho přístupná forma v celkovém koloběhu představuje jen nepatrný podíl (Blume et al. 2002; Marschner 2012), podle Schilling (2000) nepřekračuje 10 % z celkového množství. Pro rostliny ve fázi intenzivního růstu je toto množství nedostatečné a těsně u povrchu kořenů rostlin může docházet k vytváření tzv. ochuzených zón. Jejich doplňování závisí na obsahu mobilních forem fosforu a také vlhkosti půdy, kdy s vyšší vlhkostí se zintenzivňuje difuze P ke kořenům rostlin (Balík et al. 2021).

Vzhledem k nízkému obsahu P v půdním roztoku je důležité, aby se po jeho odčerpání dostatečně rychle doplňoval z pevné půdní fáze (Vaněk et al. 2007). Pro příjem málo mobilních a hůře přijatelných forem P z půdy si rostliny vytvořily různé pomocné mechanismy (Balík et al. 2021). Kromě velmi rychlé aktivace fosfatáz a přenašečů s vysokou afinitou k fosforečnanům pro zvýšení transportu P se rostliny snaží také velmi rychle zvětšit prostor pro příjem nedostatkového fosforu. Rostliny redukují nadzemní biomasu i obsah fosforu v ní obsažený a navyšují růst hmoty a délky kořenů (Tlustoš et al. 2002). Také Vaněk et al. (2007) udávají, že zvýšením růstu kořenů na úkor nadzemní biomasy se zvětšuje prostor pro příjem fosforu a rostliny zvyšují i kořenovou sekreci, která umožňuje přijatelnost P v rhizosféře. Bohatá kořenová soustava rostlin je tedy předpokladem pro optimální příjem fosforu. Wang et al. (2008) shodně uvádějí, že při nedostatku P v půdě rostliny vytvářejí členitější a hustší kořenový systém a omezuje se růst nadzemní biomasy.

Během celé vegetace je příjem fosforu rostlinami poměrně rovnoměrný (Tlustoš et al. 2002; Vaněk et al. 2007; Pavlíková et al. 2008), ovšem pro dobrý výnos s odpovídající kvalitou produkce je rozhodující obsah P v mladých rostlinách (Vaněk et al. 2007), kdy toto období je považováno za kritické, neboť rostlina vyčerpala zásoby fosforu v semenu a přechází na autotrofní výživu (Vaněk et al. 2002;

Pavlíková et al. 2008). V nárocích na fosfor se jednotlivé druhy rostlin výrazně neliší. Vzhledem k tomu, že nejvíce P je soustředěno v semenech, je nejvíce fosforu exportováno při sklizni obilovin. Rostliny si také různě osvojují fosfor z půdy - z polních plodin nejlépe bobovité rostliny, hlavně jeteloviny, také hořčice a pohanka, méně okopaniny a nejméně obiloviny a z nich pak ječmen (Vaněk et al. 2007).

Nedostatek fosforu narušuje životní procesy rostlin, především fotosyntézu, a důsledkem je snížení výnosů a obsahu cukru, škrobu, bílkovin a dalších složek v pěstovaných produktech (Vaněk et al. 2007). Příjem fosforu je závislý na energetických zásobách v rostlinných pletivech a jeho nedostatek tak může nastat nejen při nedostatečném příjmu z vnějšího prostředí, ale i v případě nedostatku energie akumulované ve fosforečných esterech (Withers et al. 2014). Aktivní proces příjmu fosforu vyžaduje dostatek energie z makroergických vazeb v ATP uvolněných pomocí enzymu ATPasy (Vaněk et al. 2007). To znamená, že i u rostlin, které mají k dispozici dostatečné množství přístupného P, ale nemají energii na jeho transport, může nastat nedostatek fosforu. Zvláště teplomilné rostliny tak při nízkých teplotách mohou zpomaleně asimilovat a mít nedostatek energie pro příjem P i při jeho dostatku v půdě. Např. u rostlin kukuřice nebo rajčete se nedostatečný příjem P při nízkých teplotách projeví anthokyanovým zbarvením listů a stonků. Při změně teploty takto vzniklý nedostatek fosforu většinou odezní a další vývoj rostliny výrazně neovlivní (Tlustoš et al. 2002). Při krátkodobém nedostatku fosforu nejsou na rostlinách příznaky nedostatku této živiny zřetelné, ale jeho nízký obsah omezuje některé biochemické funkce, především fotosyntetickou kapacitu rostliny (Pavlíková et al. 2008). Pokud má tento nedostatek delší trvání, např. na půdách s nízkým obsahem přijatelného P, s nepříznivým pH a nízkou biologickou činností, na utužených částech pozemků (především souvratích), při dlouhotrvajícím chladném počasí, nedostatečné vlhkosti půdy nebo u rostlin s malou osvojovací schopností P, případně u rostlin teplomilných, rostliny již vykazují zjevné příznaky (Vaněk et al. 2007). Při dlouhodobém nedostatku fosforu dochází k trvalým změnám na habitu rostlin; je omezena tvorba biomasy, rostliny jsou nižší, mají užší, menší a vzpřímené listy, slabší stonky a obiloviny omezují odnožování. Poměr mezi hmotností nadzemní biomasy a kořenů je značně omezen. Rostliny nadbytečně ukládají zásobní látky ve formě sacharidů, především škrobu. Ovocné stromy omezují růst letorostů, tvorbu květů, semen a plodů (Tlustoš et al. 2002).

Rostliny obsahují fosfor v mnoha různých formách. Je součástí např. cukrů, tuků i bílkovin, ovšem primárně se jeho sloučeniny podílejí na stavbě nukleových kyselin (DNA, RNA) a ve formě adenosintrifosfátu (ATP) zajišťují přenosy energie. Potřeba energie

k fotosyntéze tak také určuje požadavky rostlin na množství fosforu (Ghannoum et al. 2008). Běžný odběr fosforu rostlinami je nicméně mnohem vyšší, než je jeho potřeba na tvorbu ATP a RNA, což znamená, že značnou část fosforu rostliny uloží ve vakuolách jako orthofosforečnany, fosfolipidy, estery a fytáty (Veneklaas et al. 2012). Část orthofosforečnanů průběžně doplňuje do cytoplazmy fosfor potřebný pro syntézu RNA (Reich et al. 2010), část fytátů se podílí na tvorbě fytinu v semenech, jako zásobní sloučeniny pro klíčení (Nadeem et al. 2011). Určitá část fosforu však není rostlinami využita a nadbytečná zásoba fytátů ve vakuolách a později v semenech je pro monogastry (včetně člověka) nesnadno využitelným zdrojem fosforu a může zároveň snižovat příjem esenciálních prvků jako je Fe a Zn a také kationtů Ca a Mg (White & Broadley 2009).

4.3 Zdroje fosforu

Ve vstupech fosforu do agroekosystémů existují značné rozdíly, které jsou dány rozvojem zemědělství i rozdílnými přístupy a možnostmi z geografického hlediska (Syers et al. 2008). Jeho těžba závisí na geologickém uložení a fyzikálních vlastnostech hornin (Manning 2008).

Hnojení statkovými (popř. jinými organickými hnojivy) i minerálními fosforečnými hnojivy je u nás v současnosti z mnoha důvodů omezené a sklizněmi plodin se z půdy odčerpává více fosforu, než do ní bilančně vstupuje. Množství přístupného fosforu v půdě se tím tedy stále snižuje (Kunzová 2009). Nedostatečné množství dostupného fosforu v půdě je v průmyslově vyspělých zemích doplňováno vysokými vstupy zejména minerálních fosforečných hnojiv, aby byla zajištěna vysoká produkce plodin (Sanchez et al. 1997). Vzniká tak globální nerovnováha obsahu fosforu v zemědělské půdě. Na jedné straně je limitující živinou rostlinná produkce a na druhé je nadměrně akumulován v půdě (Syers et al. 2008). To však může na přehnojovaných půdách zatěžovat životní prostředí eutrofizací vodních zdrojů (Sanchez et al. 1997).

4.3.1 Minerální hnojiva s obsahem P

Minerální fosforečná hnojiva se vyrábí z fosfátových hornin nacházejících se na mnoha místech naší planety jako minerály s různou koncentrací fosforu. Fosfáty se v přírodě vyskytují jako fosfority a apatity. Fosfority, patřící mezi sedimentární horniny, se podílejí na výrobě fosforečných hnojiv z 80 až 90 % (Tlustoš et al. 2008).

Fluoroapatit je nejběžnějším těženým fosfátem (Yang et al. 2021). Zdroje karbonátových fluoroapatitů se nachází především v Maroku a dalších státech severu Afriky, v USA, na Blízkém Východě a v Číně (Tlustoš et al. 2008). Apatity sedimentárních hornin mají velký komerční význam, protože jako měkké minerály s mikrokrystalickou strukturou je možné je po předchozí mechanické úpravě přímo aplikovat do půdy (Yang et al. 2021). Přímá aplikace fosfátů je výhodná z více hledisek: surovina se aplikuje v původním stavu, nejsou nutné téměř žádné chemické úpravy, využitelnost P může být za určitých půdních podmínek vyšší než z vodorozpustných P hnojiv, obsahuje i další živiny, především vápník, a jejich cena je podstatně nižší. Aplikace je omezena hlavně vlastní reaktivitou použitého hnojiva a vlastnostmi půdy. Vhodná je aplikace do půd s $\text{pH} < 5,5$ při nízké koncentraci přístupných vápenatých iontů, nízké zásobě přístupného P, vysokém obsahu organické hmoty a vyšší vlhkosti (Tlustoš et al. 2008). Apatity magmatického a metamorfního původu jsou méně reaktivní, při výrobě hnojiv jejich dobře vyvinutá krystalická formace vyžaduje chemickou úpravu (Manning 2008). Tlustoš et al. (2008) udává jejich 10 až 20% podíl na produkci fosforečných hnojiv. Tyto zdroje se nacházejí v Rusku, Kanadě, Jihoafrické republice, Brazílii, Finsku a Zimbabwe. Fosforečná hnojiva se vyrábějí z horninového fosfátu chemicky zpracovaného převážně minerálními kyselinami, aby se narušila vazba apatitu a zvýšil se obsah vodorozpustného P (Černý et al. 2021). Jak je patrné z vývoje produkce P hnojiv, na trhu se zvyšuje podíl koncentrovaných fosforečných hnojiv, především fosforečnanů amonných a také kombinovaných NPK hnojiv, jejichž výroba je ekonomicky výhodnější a snižuje také náklady na dopravu, ovšem je značně problematická zatěžením životního prostředí vznikajícím odpadem v podobě fosfosádry. Problémem je kromě stále se zvyšujícího množství této odpadní látky také obsah rizikových příměsí, často toxických pro životní prostředí. Naproti tomu podíl hnojení jednoduchými fosfáty stagnuje, důvodem je především ekonomické hledisko, jak při výrobě, tak při jejich transportu - obsah P je až třikrát nižší, než mají koncentrovaná P hnojiva, čímž se neúměrně zvyšují náklady na aplikaci. Zapomíná se ovšem na to, že těmito hnojivy do půdy dodáváme také určité množství síry a vápníku, a především při jeho výrobě nevzniká riziková fosfosádra. Kompromisem je výroba částečně rozložených fosfátů, kdy je k rozkladu potřeba méně kyseliny, nevznikají odpadní produkty a produkce odpadních plynů je omezena (Tlustoš et al. 2008).

Plošná aplikace fosforečných hnojiv je nejčastější formou hnojení P. Zvláště u fosforu je ovšem využití rostlinami u takto aplikovaných hnojiv minimální. Dlouhodobé pokusy prokázaly až 85% imobilizaci fosforu z minerálních hnojiv různými chemickými

a biologickými procesy. Navíc při běžných půdních testech na stanovení přístupného P tento fosfor následně není detekován a dochází k nadměrnému hnojení. Fosfor je akumulován v půdě a zvyšuje se riziko jeho uvolnění do prostředí (MacDonald et al. 2011).

Až polovina konvenčních hnojiv je v zemědělství rostlinami nevyužita, v závislosti na metodě aplikace a stavu půdy, a může znamenat značné riziko pro kontaminaci vod. Jsou vyčerpávány přírodní zdroje a dochází k narušení ekosystémů. Při současném růstu světové populace se prosté navyšování agrochemické produkce jeví jako problém. Možností je snižování výroby a snaha o dosažení jejich cíleného působení a efektivního uvolňování. Snižily by se tím celkové dávky agrochemikálií a také jejich ztráty v životním prostředí a zvýšila by se účinnost používaných sloučenin, což by v důsledku vedlo ke zvýšení efektivity zemědělského procesu (Rodrigues et al. 2017).

4.3.1.1 Trojitý superfosfát

V dlouhodobém pokusu v této diplomové práci je mj. používán trojitý superfosfát.

Granulovaný trojitý superfosfát je podle Vaněk et al. (2007) vyráběn pomocí kyseliny fosforečné při rozkladu surových fosfátů. Při tomto výrobním procesu nevzniká fosfosádra a nedochází tedy ke snížení obsahu fosforu proti jednoduchému superfosfátu. Výsledkem je produkt s obsahem 20-21 % P, který je téměř všechn vodorozpustný (forma $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ je pro rostliny lehce přístupná). Ivanič et al. (1984) uvádějí celkový obsah až 20,7 % fosforu, ve vodorozpustné formě asi 17,8 % P a maximálně 12 % vody. Proti jednoduchému superfosfátu neobsahuje síru ze síranu vápenatého (Ivanič et al. 1984; Vaněk et al. 2007).

Superfosfáty aplikujeme před setím všech plodin jako univerzální hnojivo. Na půdách s neutrální až slabě kyselou reakcí a dobrou zásobou fosforu je možné je aplikovat i před podmičkou či orbou jako hnojení do zásoby na 2 až 3 roky. V půdách s nedostatkem fosforu bude v tomto případě vhodnější lokální aplikace P (Vaněk et al. 2007). Vlastní aplikace musí být kvalitně provedena, v případě hnojiv typu amofos je nutné především dodržet optimální vzdálenost od výsevu osiva, aby nedošlo k poškození vcházejících rostlin uvolňovanými NH_4^+ ionty (Balík et al. 2002). Při kyselé půdní reakci je vhodnější použití granulovaného superfosfátu, při neutrální až alkalické půdní reakci zase superfosfát práškový (Ivanič et al. 1984).

Superfosfáty by se neměly používat na výrazně kyselých půdách, kde je vodorozpustný fosfor rychle přeměňován na formy P pro rostliny těžce přijatelné (Vaněk et al. 2007).

Použití trojitého superfosfátu je podobné jako u jiných typů superfosfátů. Vysoká koncentrace fosforu v porovnání s jednoduchými superfosfáty však ve výsledku znamená výrazně nižší dopravní, skladovací a aplikační náklady (Ivanič et al. 1984).

4.3.2 Organická hnojiva

Pravidelné a cílevědomé využívání všech organických zbytků a organických hnojiv produkovaných zemědělským podnikem umožňuje doplňovat do půdy organické látky, a tak ji udržovat v dobrém fyzikálně chemickém stavu. Kromě přísunu organických látek plní organická hnojiva také další funkce:

- dodávají půdním mikroorganismům energii a uhlík - pozitivní ovlivnění biologické činnosti půdy,
- dodávkami živného humusu chrání před degradací humus trvalý,
- zlepšují některé fyzikálně chemické vlastnosti půdy (tvorba drobtovité struktury, poměr vzduchu a vody v půdě, vázání živin, zlepšují pufrční schopnosti půdy),
- jsou univerzálními hnojivy s obsahem všech rostlinných živin,
- zlepšují hospodaření s vodou v půdě (vsakování a vododržnost dešťové vody, umožnění gravitačního a kapilárního pohybu vody aj.),
- snižují větrnou a vodní půdní erozi,
- mají příznivý vliv na půdní obsah přístupného P a mohou imobilizovat cizorodé prvky.

Organická (statková stájová) hnojiva jako chlévský hnůj, močůvku a kejdu, produkují přímo zemědělské podniky a jejich vlastnosti (složení a živinové obsahy) z velké míry odrážejí půdní živinové spektrum a způsob obhospodařování dané oblasti (Richter & Římovský 1996). Také Vaněk et al. (2007) zmiňují jejich vysokou hnoživou hodnotu a pozvolné a dlouhodobé působení zlepšující úrodnost půdy (zlepšení jejích fyzikálních vlastností, lepší příjem vody a zadržování živin, stabilnější pH, umožnění efektivních dávek minerálních hnojiv a zvýšenou využitelnost živin plodinami).

Pro účely této diplomové práce se zaměříme jen na chlévský hnůj, který je používán pro druhou z pokusných variant hodnoceného dlouhodobého pokusu.

4.3.2.1 Chlévský hnůj

Vzniká uzráním chlévské mrvy na hnojišti. Mrva obsahuje výkaly, stelivo, případně i zbytky krmiva a její množství a kvalita (sušina, obsah živin a organických látek) je závislá na druhu a stáří hospodářských zvířat, krmení, typu ustájení, a především na druhu steliva a jeho množství (Vaněk et al. 2007). Při této přeměně je velmi důležité uchovat co největší množství organické hmoty, živin a snažit se udržet nebo zvýšit počet mikroorganismů (Richter & Římovský 1996).

Procesem zrání se rozumí kvasné procesy, hnití a tlení, kdy dochází k rozkladu a následně přeměně a transformaci komponentů na produkt s kvalitativně jiným složením (Vaněk et al. 2007). Chlévská mrva podléhá činností mikroorganismů, především bakterií, aktinomycet a plísní částečnému odbourávání, o jehož intenzitě rozhoduje míra oxidace, vlhkost a teplota prostředí (Richter & Římovský 1996). Za aerobních podmínek se organické látky rozkládají rychle (např. na nezpevněných polních hnojištích), a dochází ke ztrátám organické hmoty (50-60 %) i živin, především dusíku. Omezením přístupu vzduchu a celkového styku s prostředím by však tyto ztráty neměly přesáhnout 30 % (vrstvení hnoje do bloků alespoň do výšky 3 m a co nejmenší povrch při jeho skladování a zrání). Ztráty živin činí asi 30-40 % u dusíku, asi 5 % u fosforu a 10-20 % u draslíku (Vaněk et al. 2007).

Při pravidelném hnojení hnojem se jako optimální dávka považuje 9 tun na hektar, pro zahradní půdy dvojnásobek. Obilovinám po horší předplodině a na lehčích půdách se doporučuje 20 t/ha a k okopaninám dávka vyšší, 30-40 t/ha (Richter & Římovský 1996). Dávka hnoje 30-40 t/ha je považována jako dostačující, jeho působení v půdě je víceleté a závisí na vlastnostech půdy. Využití živin z hnoje se obvykle počítá po dobu tří let, kdy nejlépe je využít draslík, dále dusík a nejméně fosfor, ovšem i tak je v případě fosforu jeho využití lepší než v minerálních hnojivech (Vaněk et al. 2007). Stabilita organických látek v chlévském hnoji je vyšší v porovnání například s čistírenskými kaly, také proti nim obsahuje více humusových látek a stupeň humifikace je také vyšší (Černý et al. 2014).

Hnůj pro optimální využití musí být rozmetán rovnoměrně a ihned zaorán do půdy. V opačném případě dochází ke ztrátám hnojivých hodnot i dusíku, které se s časem rychle zvyšují. Chlévský hnůj používáme k hnojení náročných plodin jako jsou okopaniny, kukuřice a olejniny (Richter & Římovský 1996).

4.3.2.1.1 Legislativa použití chlévského hnoje

Zvířecí exkrementy (s podestýlkou nebo bez ní) použité ke hnojení, eventuelně jako vstupní surovina v kompostárnách a bioplynových stanicích, nejsou považovány za odpady, nýbrž za statková hnojiva. Nevztahuje se na ně tedy zákon o odpadech, ale zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech. Pravidla pro používání hnojiv a jejich skladování dále upravuje Vyhláška č. 377/2013 Sb. (Klír & Wollnerová 2014).

Zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a agrochemickém zkoušení půd (dále jen Zákon o hnojivech) obsahuje základní povinnosti zemědělských podnikatelů při použití hnojiv. Níže jsou uvedeny povinnosti, které se vztahují také ke chlévskému hnoji:

- povinnost použití hnojiv v souladu se zákony (tedy Zákonem o hnojivech a Zákonem o ochraně zemědělského půdního fondu),
- zákaz vnášení rizikových prvků nebo rizikových látek do půdy v množstvích stanovených prováděcím právním předpisem ministerstva,
- nesmí dojít ke znečištění vod hnojivou, k jejich přímému vniknutí do povrchových vod nebo na sousední pozemek.

Zákon dále stanoví zákaz použití hnojiv na zemědělské a lesní půdě v těchto případech:

- jejich vlastnosti neumožňují rovnoměrné pokrytí pozemku,
- způsob jejich použití nevede k rovnoměrnému pokrytí pozemku; to neplatí v případě hnojení ve zranitelných oblastech,
- jejich použití může vést k poškození fyzikálních, chemických nebo biologických vlastností zemědělské půdy, lesního pozemku nebo pozemků sousedících s tímto pozemkem, popřípadě i jeho širšího okolí,
- půda, na kterou mají být použity, je
 - zaplavená,
 - přesycená vodou,
 - pokrytá vrstvou sněhu vyšší než 5 cm, nebo
 - promrzlá tak, že povrch půdy do hloubky 5 cm přes den nerozmrzá.

O použití hnojiv jsou zemědělství podnikatelé povinni vést evidenci v rozsahu a formě podle platných právních předpisů.

Vyhláška č. 392/2021 Sb., kterou se mění vyhláška 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv, ve znění pozdějších předpisů, a vyhláška č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů, obsahuje požadavky na skladování a používání hnojiv a vedení evidence o jejich použití.

4.3.3 Odpadní materiály a vedlejší produkty

Fosfor má v zemědělství klíčovou roli jako živina, na druhé straně je ale považován za znečišťující látku ve vodách, do kterých se prostřednictvím eroze orné půdy a odpadních vod dostává. Pokud budeme produkci fosforu z lidské činnosti recyklovat zpět na zemědělskou půdu, odkud byl exportován, je možné i v oblastech závislých na globálních trzích s fosforečnými hnojivy udržet rovnováhu v produkci potravin (Reijnders 2014).

Civilizace produkuje stále větší množství organických odpadů a vedlejších produktů, které je možné v zemědělství znovu využít jako zdroje fosforu (Withers et al. 2014). V posledních desetiletích se výrazně zvýšilo agronomické využití organických materiálů a vedlejších produktů, které se dříve jako odpady vyvážely na skládky. S využitím anaerobní fermentace, spalování, pyrolýzy nebo kompostování komunálního odpadu dochází ke vzniku hnojiv (Cordell et al. 2011). Pevné komunální odpady, komposty, zbytky anaerobní fermentace, popel a další biologické zdroje mohou kromě fosforu obsahovat organické látky a živiny v množství, které může vylepšit strukturu půdy a její úrodnost a nahradit anorganická hnojiva (Withers et al. 2014). Černý et al. (2021) uvádějí jako možné zdroje fosforu zbytky plodin, odpady potravinářského průmyslu, a i nevyužitá potravina, zvířecí a lidské exkrementy, a i další možné zdroje jako kostní moučka, popel a řasy.

Použití druhotných surovin jako zdrojů fosforu může přispět k udržitelnějšímu zemědělství. Průmyslové i biologické odpadní materiály mohou být přímo aplikovány ke hnojení nebo na hnojiva přetvořeny jinými způsoby, např. vysrážením fosforečných solí, pyrolýzou, spalováním nebo zplyňováním. Aby byl takto získaný fosfor použitelný jako hnojivo, musí být pro rostliny přístupný (Huygens & Saveyn 2018).

Pokud je fosfor v odpadních materiálech a vedlejších produktech přítomen v dostatečném množství, je možné ho získávat a používat opakovaně (Černý et al. 2021). Recyklace fosforu je důležitá ekonomicky i ekologicky. Je závislá na dostupnosti technologických procesů a specializovaných recyklačních zařízení (Desmidt et al. 2015).

Mezi nejjednodušší a často nejlevnější způsoby opakovaného využití fosforu bez chemické úpravy patří přímá aplikace statkových hnojiv (hnůj, kejda), kompostů, digestátu z výroby bioplynu, stabilizovaného čistírenského kalu, popela ze spalování biomasy a/nebo čistírenských kalů (Černý et al. 2021). Také Lu et al. (2012) uvádějí jako nejjednodušší způsob přímou aplikaci odpadů na zemědělskou půdu. Jde o celosvětově aplikovanou a desetiletí praktikovanou strategii. Podle Černý et al. (2021) je tímto nejstarším a současně nejrozšířenějším způsobem recyklace P řešena také aplikace dalších živin, organické hmoty apod.

Třetí z pokusných variant hodnoceného dlouhodobého pokusu pro účely této diplomové práce je používání čistírenských kalů.

4.3.3.1 Čistírenské kaly

Zdrojem fosforu, organické hmoty, dusíku a dalších živin je aplikace čistírenských kalů, které je tak možné využít pro zachování koloběhu uhlíku a živin na zemědělské i degradované půdě (Kowaljow et al. 2010). Kaly z čistíren odpadních vod mají velmi rozmanité složení, které odráží jejich zdrojový původ, odlišnosti technologických postupů čištění na ČOV a někdy také období jejich produkce. Znat složení kalu, který bude aplikován na zemědělskou půdu, je nezbytné nejen vzhledem k legislativě jejich použití, ale také v souvislosti s živinovou půdní bilancí (Černý et al. 2014). Výhodou jejich použití jsou nízké investiční náklady a v případě kompostování také zvýšení jejich kvality. Nevýhodou v nízkoteplotních provozech je dlouhá doba stabilizace (Ciešlik et al. 2015). Kaly obsahují důležité makroprvky, především dusík a fosfor, jako příznivý je vnímán i obsah síry. Tyto živiny z kalů jsou rostlinám dobře přístupné, protože část z nich je již v minerální formě. Nejčastěji se uvádí obsah fosforu v kalech v rozmezí 0,8-2,5 %, v průměru 1,9 %. Pravidelné používání čistírenských kalů ke hnojení je také oceňováno pro jejich dlouhodobé působení. Přesto však může docházet ke snižování jakosti organické hmoty a kaly tak nemohou dosáhnout kvalit chlévského hnoje. Až kaly kompostované vykazují lepší výsledky na kvalitativní hodnoty organické hmoty (Černý et al. 2014).

Velké objemy kalů komplikují přepravu a manipulaci. Problémem pro životní prostředí je možný obsah rizikových prvků, organických polutantů, parazitů a patogenních mikroorganismů (Dean & Suess 1985; Černý et al. 2021). Nevýhodou může být rovněž

pomalé uvolňování P např. z fylinových vazeb a přeměny P v půdě po aplikaci výše uvedených hnojiv, kdy je omezena přístupnost fosforu pro rostliny (Černý et al. 2021).

V České republice stále stoupá množství kalů používaných k přímé aplikaci na zemědělskou půdu nebo k rekultivacím. Množství kalů použité na zemědělských půdách v ČR je však, oproti jiným zemím EU, kde takovéto použití přesahuje 50 % jejich produkce, stále ještě nižší (Černý et al. 2014). V řadě zemí EU jsou však kaly aplikovány nepřímě, jako materiál kompostovaný (Kelessidis & Stasinakis 2012).

4.3.3.1.1 Legislativa použití čistírenských kalů

Zákon o odpadech č. 541/2020 Sb. obsahuje, kromě jiného, základní pravidla pro nakládání s čistírenskými kaly a v § 69 uvádí:

Povinnosti při používání kalů na zemědělské půdě

(1) Na zemědělské půdě smí být použity pouze upravené kaly s ohledem na nutriční potřeby rostlin a v souladu se schváleným programem použití kalů tak, aby použitím kalů nebyla zhoršena kvalita zemědělské půdy a kvalita povrchových a podzemních vod. Upravený kal smí na zemědělské půdě použit pouze právnická nebo podnikající fyzická osoba, která tuto půdu užívá.

(2) Upravené kaly smí být na zemědělské půdě používány pouze při splnění technických podmínek, přípustného množství kalů použitých na jeden hektar a mezních hodnot koncentrací vybraných rizikových látek v kalech stanovených vyhláškou ministerstva. Při použití upravených kalů na zemědělské půdě musí být dále splněny mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek v zemědělské půdě, mezní hodnoty koncentrací těžkých kovů, které smí být přidány do zemědělské půdy za období 10 let, a mikrobiologická kritéria pro použití kalů. Splnění podmínek pro použití kalu na zemědělské půdě se posuzuje samostatně pro kal z jedné čistírny odpadních vod nebo zařízení na úpravu kalů ve vztahu ke konkrétnímu půdnímu bloku.

(3) Použití kalů je zakázáno

a) na zemědělské půdě, která je součástí chráněných území přírody a krajiny podle zákona o ochraně přírody a krajiny,

b) na půdách lesních porostů běžně využívaných k hospodaření v lese,

c) v ochranných pásmech vodních zdrojů, na zaplavených půdách a na zamokřených plochách,

d) v ochranných pásmech přírodních léčivých zdrojů a zdrojů přírodních léčivých vod podle lázeňského zákona,

e) na trvalých travních porostech a travních porostech na orné půdě v průběhu vegetačního období až do poslední seče,

f) v intenzivních plodících ovocných výsadbách,

g) na pozemcích využívaných k pěstování polních zelenin v kalendářním roce jejich pěstování a v předcházejícím kalendářním roce,

h) v průběhu vegetace při pěstování píce, kukuřice a při pěstování cukrové řepy s využitím chrástu ke krmení,

i) jestliže z půdních rozborů vyplývá, že obsah vybraných rizikových látek v průměrném vzorku překračuje jednu z hodnot stanovených vyhláškou ministerstva,

j) na půdách s hodnotou výměnné půdní reakce nižší než pH 5,6,

k) na plochách, které jsou určeny k rekreaci a sportu nebo veřejným prostranstvím,

l) na zemědělské půdě, kde bylo zjištěno překročení preventivní hodnoty podle zákona o ochraně zemědělského půdního fondu, nebo

m) jestliže kaly nespĺňují mikrobiologická kritéria stanovená vyhláškou ministerstva; použití mikrobiálně kontaminovaných kalů smí být provedeno pouze po úpravě kalů.

Podrobnější pravidla uvádí prováděcí vyhláška č. 273/2021 Sb., která upřesňuje podmínky pro skladování kalů a jejich aplikaci v § 59:

Technické podmínky použití upravených kalů na zemědělské půdě

(1) Upravené kaly lze na zemědělské půdě používat pouze za splnění těchto podmínek:

a) upravené kaly musí být použity nebo umístěny na půdní blok, kde budou použity, do 8 měsíců ode dne jejich výstupu z technologie úpravy,

b) pokud je překročena lhůta podle písmene a), musí být před použitím upravených kalů ověřeno splnění mikrobiologických kritérií pro jejich použití; časový odstup od odběru vzorku pro provedení analýz do jejich použití nebo alespoň umístění na půdní blok, kde budou použity, nesmí být delší než 30 dní,

c) upravené kaly mohou být v množství podle písmene f) umístěny v rámci půdního bloku, kde budou použity, nejvýše 30 dnů před jejich použitím,

d) nejpozději do 48 hodin od rozprostření upravených kalů na půdní blok musí být upravené kaly zapraveny do půdy,

e) potřeba dodání živin do půdy na dílu půdního bloku určeného k použití upravených kalů musí být doložena výsledky rozborů agrochemických vlastností půd uvedenými v evidenčním listu využití kalů v zemědělství podle přílohy č. 37 k této vyhlášce, použití výsledků rozborů je možné 2 roky od jejich provedení,

f) na 1 ha může být použito nejvýše 5 t sušiny kalů; upravené kaly musí být na jednom dílu půdního bloku použity v jedné agrotechnické operaci a v jednom souvislém časovém období za příznivých fyzikálních a vlhkostních podmínek; pokud použité kaly obsahují méně než polovinu limitního množství každé ze sledovaných rizikových látek a prvků, může množství kalů dosáhnout 10 t sušiny kalů na 1 ha,

g) po dobu 3 let následujících po použití upravených kalů nesmí být na dotčených dílech půdního bloku použity žádné další kaly; to platí pro celý díl půdního bloku, i když bylo použití upravených kalů provedeno jen na jeho části,

h) dávka dusíku dodaného v kalech nepřekročí limit dusíku stanovený pro hnojenou plodinu podle nařízení vlády o stanovení zranitelných oblastí a akčním programem; množství a doba užití kalů se řídí též požadavkem rostlin na živiny s přihlédnutím k přístupným živinám a organické složce v půdě, jakož i ke stanovištním podmínkám,

i) při přímém použití upravených kalů musí být minimální obsah sušiny kalu 4 %,

j) kaly mohou být míseny, pouze pokud je to vhodné s ohledem na nutriční potřeby rostlin nebo s ohledem na zlepšování kvality půdy, a to pouze se zeminou, pískem, hnojivem nebo pomocnými půdními látkami podle zákona o hnojivech nebo exkrementy, slámou nebo jinými přírodními látkami ze zemědělské výroby nebo lesnictví, které nevykazují žádnou z nebezpečných vlastností a běžně se využívají v zemědělství v souladu se zákonem o hnojivech.

V tabulce č. 1 jsou uvedeny mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech a v tabulce č. 2 minimální četnost chemických a mikrobiologických analýz kalů pro jejich použití na zemědělské půdě.

Tabulka č. 1: Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě (ukazatele pro hodnocení kalů)

Riziková látka	Mezní (maximální) hodnoty koncentrací v kalech (mg.kg ⁻¹ sušiny)
As - arzén	30
Cd - kadmium	5
Cr - chrom	200
Cu - měď	500
Hg – rtuť	4
Ni - nikl	100
Pb - olovo	200
Zn - zinek	2500
AOX	500
PCB (suma 7 kongenerů - 28+52+101+118+138+153+180)	0,6
PAU (suma antracenu, benzo(a) antracenu, benzo(b) fluoranthenu, benzo(k) fluoranthenu, benzo(a) pyrenu, benzo(ghi) perylenu, fenantrenu, fluoranthenu, chrysenu, indeno(1,2,3-cd)pyrenu, naftalenu a pyrenu)	10

Tabulka č. 2: Minimální četnost chemických a mikrobiologických analýz kalů využívaných na zemědělské půdě za rok

Minimální počet analýz za rok				
Produkce kalů z ČOV (v tunách sušiny kalů za rok)	Agrochemické parametry* (živiny)	Rizikové prvky a látky	mikrobiologie	Organické kontaminanty (PCB, AOX, PAU)
< 250	2	2	2	1
250-1000	4	4	4	1
1000-2500	4	4	6	1
> 2500	12	12	12	1

* agrochemické parametry: pH, obsah sušiny, obsah organických látek (vyjádřený jako ztráta žiháním), celkový dusík, amoniakální dusík, dusičnanový dusík, fosfor, draslík, vápník, hořčík

5 Metodika

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

Tabulka č. 3: Základní charakteristika pokusných stanovišť

Stanoviště	Humpolec	Suchdol	Hněvčeves
Severní šířka	49°33'15"	50°07'40"	50°18'46"
Východní délka	15°21'02"	14°22'33"	15°43'01"
Nadmořská výška (m n. m.)	525	286	265
Průměrná roční teplota (°C)	7,0	9,1	8,2
Průměrný roční úhrn srážek (mm)	665	495	573
Půdní typ	kambizem	černozem	hnědozem
Půdní druh	hlinitopísčitá	hlinitá	jílovitohlinitá
Podloží	pararula	spraš	
pH ¹⁾	5,1	7,5	5,9
P (mg/kg) ²⁾	77 (±10)	74 (±9)	87 (±11)
K (mg/kg) ²⁾	238 (±47)	209 (±18)	214 (±29)
Ca (mg/kg) ²⁾	1625 (±187)	7803 (±1760)	2156 (±251)
Mg (mg/kg) ²⁾	112 (±14)	209 (±16)	240 (±24)

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

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

Tabulka č. 4: Přehled odrůd pěstovaných v dlouhodobých pokusech

Rok	Humpolec a Suchdol			Hněvčeves		
	Brambory	Pšenice	Ječmen	Brambory	Pšenice	Ječmen
1997	Karin	Samanta	Akcent	Karin	Samanta	Akcent
1998	Karin	Samanta	Akcent	Karin	Samanta	Akcent
1999	Karin	Samanta	Akcent	Karin	Samanta	Akcent
2000	Kordoba	Alana	Akcent	Kordoba	Alana	Akcent
2001	Kordoba	Alana	Akcent	Kordoba	Alana	Akcent
2002	Kordoba	Alana	Akcent	Kordoba	Alana	Akcent
2003	Kordoba	Alana	Akcent	Kordoba	Alana	Akcent
2004	Kordoba	Alana	Akcent	Kordoba	Alana	Akcent
2005	Kordoba	Alana	Calgary	Kordoba	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	RGT Reform	Xanadu	Ditta	RGT Reform	Xanadu
2017	Antonia	RGT Reform	Xanadu	Antonia	RGT Reform	Xanadu
2018	Antonia	RGT Reform	Francin	Antonia	RGT Reform	Francin
2019	Antonia	RGT Reform	Francin	Antonia	RGT Reform	Francin
2020	Antonia	RGT Reform	Francin	Antonia	RGT Reform	Francin
2021	Antonia	RGT Reform	Francin	Antonia	RGT Reform	Francin
2022	Antonia	RGT Reform	Francin	Antonia	RGT Reform	Francin
2023	Antonia	RGT Reform	Francin	Antonia	RGT Reform	Francin

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

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

Tabulka č. 5: Průměrné dávky aplikovaných živin v kg/ha v rámci osevního postupu

Varianta	Brambory	Ozimá pšenice	Jarní ječmen
Kontrola	0	0	0
Kal 1	330 kg N; 240 kg P	0	0
Hnůj 1	330 kg N; 70 kg P	0	0
NPK ¹⁾	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⁾ Ve variantě NPK byly všechny živiny dodány v minerální formě

Odběr vzorků je prováděn každoročně. Na podzim po sklizni obilnin a brambor byl vždy proveden odběr ornice (0-30 cm). Ta byla usušena a přeseta přes síto s velikostí otvorů 2 mm. Pro potřeby diplomové práce byly k analýzám využity archivní vzorky půdy z roku 1996 (před založením pokusu) a půdy odebrané po sklizni brambor, pšenice ozimé a jarního ječmene vždy po 3-letých obdobích, tj. z let 1999, 2002, 2005, 2008, 2011, 2014, 2017, 2020 a 2023. Pro následné analýzy půd byla použita vždy jemnozem <2 mm.

5.1 Analytická stanovení

Okamžitě dostupný fosfor stanovený demineralizovanou vodou

Extrakty byly zhotoveny dle Luscombe et al. (1979). Ke 2 g vzorku bylo doplněno 20 ml demineralizované vody. Vzorky byly třepány 2 hodiny a následně odstředěny při 9500 otáčkách za minutu. Vzniklé extrakty byly analyzovány na obsah fosforu optickým emisním spektrometrem s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES).

Přístupný fosfor stanovený metodou CAD

Obsah přístupného fosforu byl stanoven dle normy CSN EN 13651 (2002). Půdní vzorek substrátu byl extrahován roztokem 0,01 mol/l CaCl₂ a 0,002 mol/l DTPA v poměru (pevná látka/kapalina) 1:10 (3 g/30 ml). Po 1 hodině třepání byly vzorky zfiltrány a získané extrakty měřeny. Pro měření přístupného P byl využit ICP-OES.

Obsah fosforu, železa a hliníku stanovený metodou Mehlich 3

Ke stanovení obsahu přístupného P, Al a Fe byl použit extrakční roztok Mehlich 3 (Mehlich 1984) složený z CH₃COOH (0,2 mol/l), NH₄F (c=0,015 mol/l), HNO₃ (c=0,013 mol/l), NH₄NO₃ (c=0,25 mol/l) a EDTA (c=0,001 mol/l). Poměr zeminy

a vyluhovadla činil 1:10 (10g zeminy, 100 ml vyluhovadla). Třepání na třepačce VWR®Advanced 15000 Orbital Shaker probíhalo po dobu 10 min. Získaný roztok byl filtrován (filtrační papíry č. 388). Pro vyloučení chyby měření byly extrakty zhotoveny ve dvou opakováních. Obsahy P, Fe a Al v extraktech byly měřeny ICP-OES.

Málo pohyblivý fosfor stanovený horkou kyselinou dusičnou

Analýza horkou kyselinou dusičnou byla realizována dle postupu Helmke & Sparks (1996). Množství 2,5 g jemnozeme bylo naváženo do 100 ml Erlemayerových lahvíček a zalito 25 ml 1 mol/l HNO₃. Lahvičky byly umístěny na plotnu a obsah byl přiveden k varu. Po 10 min. vaření byly vzorky ochlazeny, filtrovány a objemově převedeny na 100 ml pomocí 0,1 mol/l HNO₃. Obsah P byl měřen pomocí ICP-OES.

Reziduální fosfor stanovený lučavkou královskou

Koncentrace reziduálního fosforu v půdě byla stanovena modifikovanou metodou ISO: 11466 1995 s použitím lučavky královské (HCl:HNO₃ – 3:1). Modifikace spočívala ve využití vysokotlakého mikrovlnného rozkladu, pozdějšího odpaření vzorků pomocí topné desky (150 °C) a následném kvantitativním převedení destilovanou vodou do skleněné zkumavky o konečném objemu 25 ml. Obsah fosforu byl měřen přístrojem ICP-OES.

Sorpční charakteristiky fosforu

Sorpční charakteristiky P byly vypočteny dle Elbasiouny et al. (2020) a Jalali & Jalali (2017) z údajů získaných metodou Mehlich 3, konkrétně obsahů P, Fe a Al.

Sorpční index P (PSI) byl vypočten podle následující rovnice:

$$\text{PSI (mmol/kg)} = (\text{Fe} + \text{Al}) * 0,5$$

Přičemž Fe a Al jsou obsahy železa a hliníku v mmol/kg půdy

Stupeň nasycení půdy fosforem (DPS) byl vypočten následovně:

$$\text{DPS (\%)} = \text{P/PSI},$$

kde P představuje obsah fosforu v mmol/kg půdy

5.2 Statistické vyhodnocení

Pro statistické vyhodnocení byly využity základní popisné charakteristiky, časové řady a výpočty sorpčních charakteristik fosforu v programu Microsoft® Excel pro Mac.

6 Výsledky

V této kapitole jsou řešena data zabývající se obsahy různých forem fosforu v období let 1996–2023. Všechny hodnoty zmíněné ve výsledcích jsou v jednotkách mg P/kg půdy (dále jen mg/kg), pokud není v textu/tabulkách/grafech uvedeno jinak.

U všech zmíněných dat je již v roce 1996 přiřazen způsob hnojení a plodiny, ale v tomto roce se pokus zakládal a dosažené hodnoty z tohoto roku jsou tak vstupními daty, která byla získána před hnojením.

Zároveň tyto výsledky nevypovídají o ročníkových výkyvech, jelikož nejsou vztaženy k vlivům počasí v hodnocených letech.

V první části této kapitoly je řešen okamžitě dostupný fosfor (dále zmiňován také jako P H₂O, vodorozpustný P nebo okamžitě přístupný) a přijatelný fosfor (dále zmiňován také jako mobilní P, P Mehlich 3 či P M3). Grafy reflektující tato data zobrazují pro větší přehlednost průměry vytvořené ze všech tří plodin v měřených letech. Hlavním tématem je porovnání variant hnojených/nehnojené kontroly.

Následují části výsledků řešící stanovení různých forem P metodou CAD, horkou kyselinou dusičnou, lučavkou královskou, pomocí metody Mehlich 3 obsahy hliníku a železa a v neposlední řadě sorpční charakteristiky fosforu (PSI, DPS). Další příložené tabulky zobrazují procentuální zastoupení vodorozpustného a mobilního P z reziduálního fosforu na zkoumaných lokalitách.

V poslední části je vyjádřen procentuální nárůst či úbytek forem P podle způsobu hnojení a lokality společně se zkoumáním vývoje obsahu fosforu v osevním cyklu, tj. podle pěstovaných plodin.

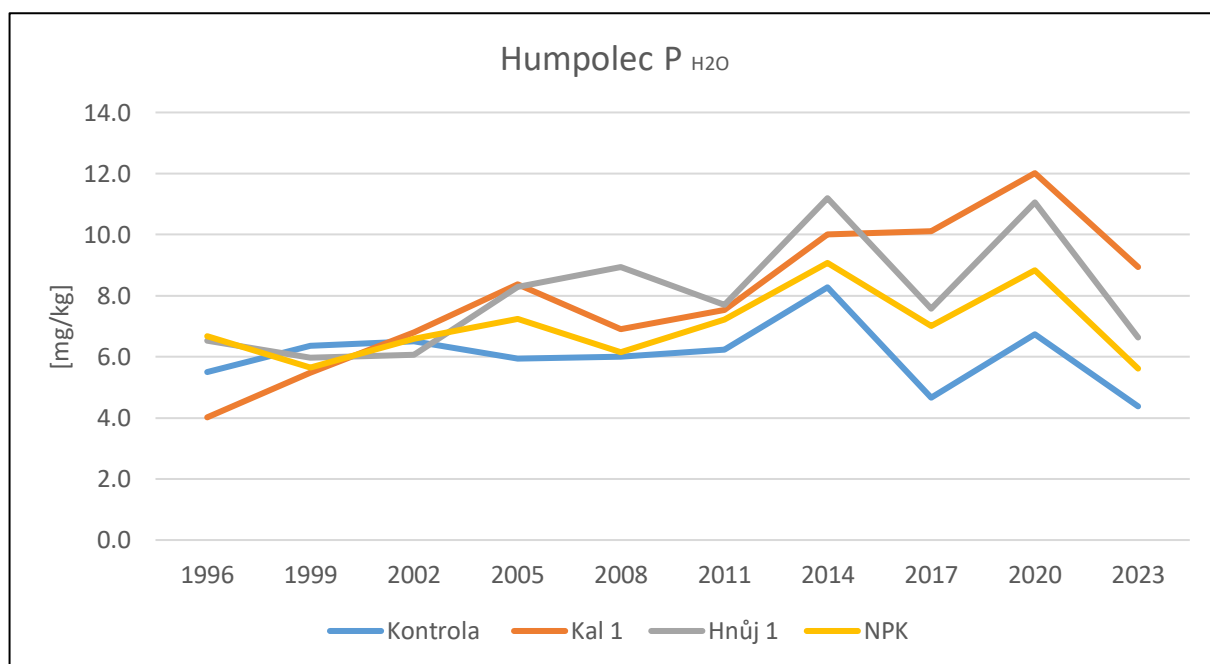
6.1 Stanoviště Humpolec

Jedná se o stanoviště nacházející se v kraji Vysočina. Souřadnice jsou 49°33'15" severní šířky a 15°21'02" východní délky. Nadmořská výška je 525 m. n. m. (nejvyšší z tří sledovaných stanovišť), průměrná roční teplota je 7 °C (nejnižší z tří sledovaných stanovišť) a průměrný roční úhrn srážek je 665 mm (nejvyšší z tří sledovaných stanovišť). Půdní typ je zde kambizem, půdní druh hlinitopísčitý a průměrné pH (CaCl₂) pozemků je 5,1 (nejnižší z tří sledovaných stanovišť).

6.1.1 Okamžitě dostupný fosfor

Graf č. 1 zobrazuje obsah okamžitě dostupného fosforu v půdě u zkoumaných variant. Varianta Kontrola vykazovala hodnoty od 4,4 mg/kg (rok 2023) do 8,3 mg/kg (rok 2014). Varianta Kal 1 se pohybovala v rozmezí od 4,0 mg/kg (rok 1996) až po 12,0 mg/kg (rok 2020). V období let se obsah fosforu u varianty Hnůj 1 pohyboval od 6,0 mg/kg (rok 1999) do 11,2 mg/kg (rok 2014). Varianta NPK zaznamenala hodnoty od 5,6 mg/kg (roky 1999 a 2023) až po 9,1 mg/kg (rok 2014). Navzdory lehčí půdě s menší přirozenou úrodností ve srovnání s ostatními lokalitami a absenci hnojení půdy se výsledky varianty Kontrola relativně dlouho držely na úrovni ostatních zkoumaných variant.

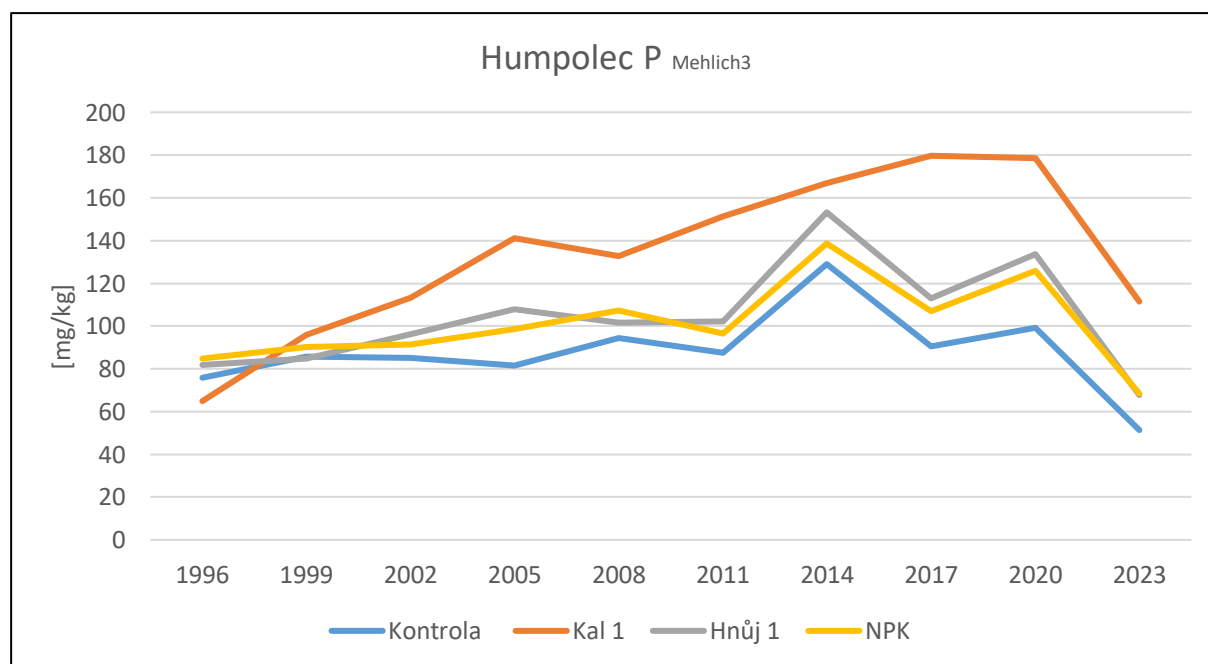
Graf č. 1: Obsahy okamžitě dostupného fosforu na stanovišti Humpolec



6.1.2 Přístupný fosfor

Graf č. 2 prezentuje obsahy přístupného fosforu v půdě u zkoumaných variant. Varianta Kontrola vykazovala hodnoty od 51 mg/kg (rok 2023) do 129 mg/kg (rok 2014). Varianta Kal 1 se pohybovala v rozmezí od 65 mg/kg (rok 1996) až po 180 mg/kg (rok 2017). Obsah fosforu u varianty Hnůj 1 ve sledovaném období kolísal od 68 mg/kg (rok 2023) do 153 mg/kg (rok 2014). Varianta NPK zaznamenala hodnoty mezi 68 mg/kg (rok 2023) a 139 mg/kg (rok 2014). Zvýšené dávky fosforu v Kal 1 se projevíly, když tato varianta již po 3 letech dosáhla nejvyšší úrovně, která se dále zvyšovala v následujících letech (s výjimkou roku 2014). Z grafu je patrný jasný rozdíl mezi vysokými dávkami P u varianty Kal 1, nižšími vstupy fosforu u Hnůj 1 s NPK a absencí zásahů u varianty Kontrola.

Graf č. 2: Obsahy přístupného fosforu na stanovišti Humpolec



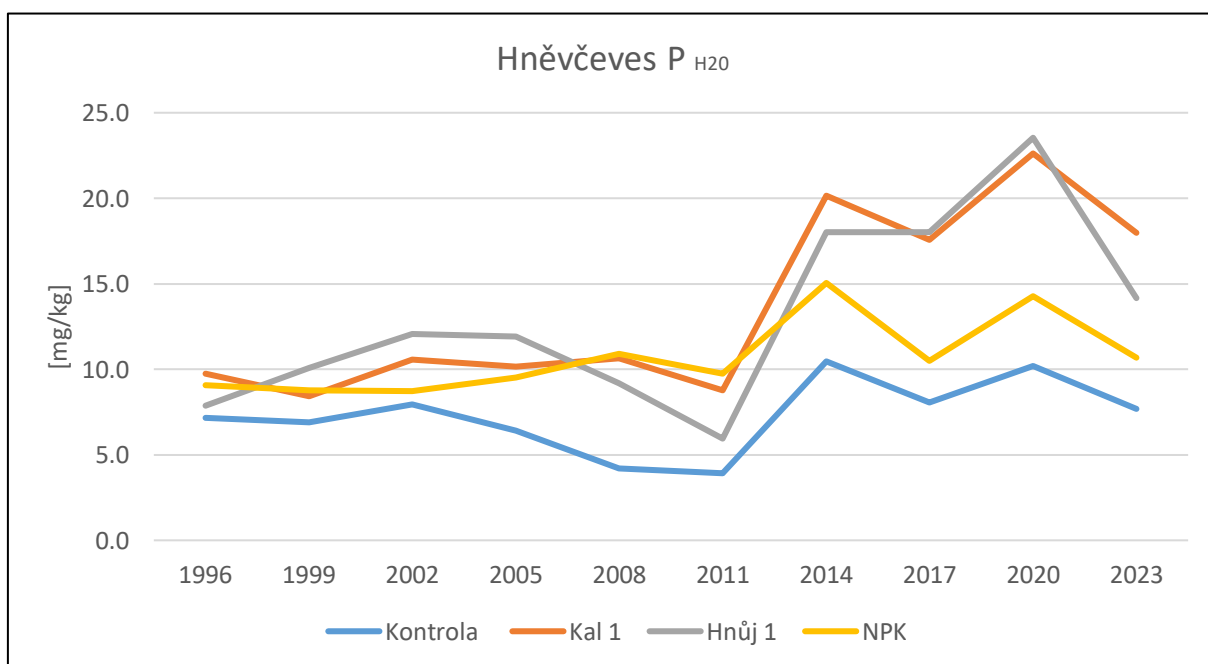
6.2 Stanoviště Hněvčeves

Jedná se o stanoviště nacházející se v Královéhradeckém kraji. Souřadnice jsou 50°18'46" severní šířky a 15°43'01" východní délky. Nadmořská výška je 265 m. n. m. (nejnižší z tří sledovaných stanovišť), průměrná roční teplota je 8,2 °C a průměrný roční úhrn srážek je 573 mm. Půdní typ je zde hnědozem, půdní druh jílovitohlinitý a průměrné pH (CaCl₂) pozemků je 5,9.

6.2.1 Okamžitě dostupný fosfor

Graf č. 3 zobrazuje obsah okamžitě dostupného fosforu v půdě u zkoumaných variant. Varianta Kontrola vykazovala rozmezí od 3,9 mg/kg (rok 2011) do 10,5 mg/kg (rok 2014). U varianty Kal 1 se úroveň fosforu pohybovala od 8,4 mg/kg (rok 1999) až po 22,6 mg/kg (rok 2020). Hodnoty u varianty Hnůj 1 se v tomto období pohybovaly od 5,9 mg/kg (rok 2011) do 23,5 mg/kg (rok 2020). Variantě NPK odpovídaly hodnoty v rozmezí 8,7 mg/kg (rok 2002) až 15,0 mg/kg (rok 2014). Z grafu je zřejmé, že všechny hnojené varianty dosáhly vyšších hodnot než Kontrola v každém sledovaném roce. Dále je patrné, že varianty Kal 1 a Hnůj 1 překročily hranici 20 mg/kg, zatímco ostatní dvě lokality takových hodnot nedosahují (nejvyšší úrovně byly u Kal 1 v roce 2020 – 12,0 mg/kg u Humpolce a Kal 1 ve stejném roce – 12,7 mg/kg u Suchdolu).

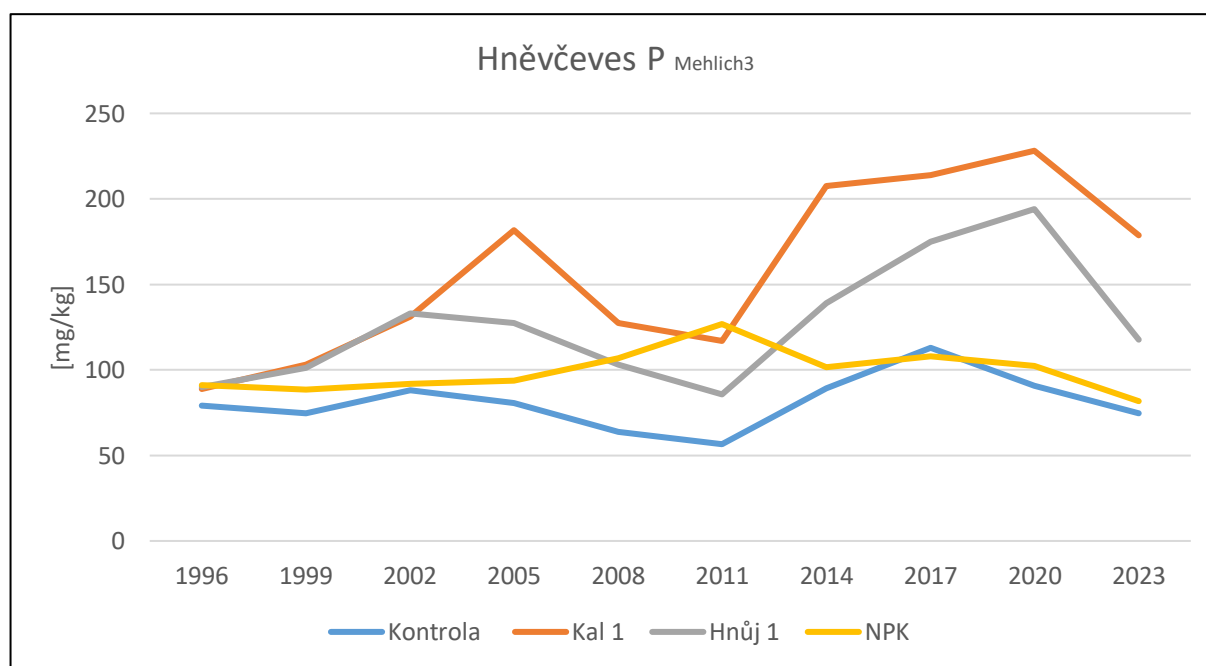
Graf č. 3: Obsahy okamžitě dostupného fosforu na stanovišti Hněvčeves



6.2.2 Přístupný fosfor

Graf č. 4 vyhodnocuje obsahy přístupného fosforu v půdě u zkoumaných variant. Varianta Kontrola se ve zkoumaných letech pohybovala od 57 (rok 2011) do 113 mg/kg (rok 2017). Varianta Kal 1 kolísala v rozmezí let mezi 89 (rok 1996) až 228 mg/kg (rok 2020). Varianta Hnůj 1 ve stejném období let oscillovala od 86 (rok 2011) do 194 mg/kg (rok 2020). Varianta NPK se v těchto letech pohybovala mezi 82 (rok 2023) až 127 mg/kg (rok 2014). Varianta Kontrola zde vycházela většinou nejnižší. Nejvyšší hodnoty byly zpravidla naměřeny u varianty Kal 1. Za zmínku také stojí hnojení NPK, kde se výsledky ve sledovaném období pohybovaly níže než u ostatních hnojených variant, avšak v letech 2008 a 2011, kdy Kontrola, Kal 1 i Hnůj 1 měly sestupnou tendenci, NPK mělo naopak vzestupnou. Dalším zajímavým faktem je překročení hranice 200 mg/kg, zatímco ostatní lokality (stejně jako u okamžitě dostupného) takových hodnot nedosáhly (maximum Humpolce je Kal 1 v roce 2017 - 180 mg/kg, maximum Suchdolu je Kal 1 v roce 2020 - 192 mg/kg).

Graf č. 4: Obsahy přístupného fosforu na stanovišti Hněvčeves



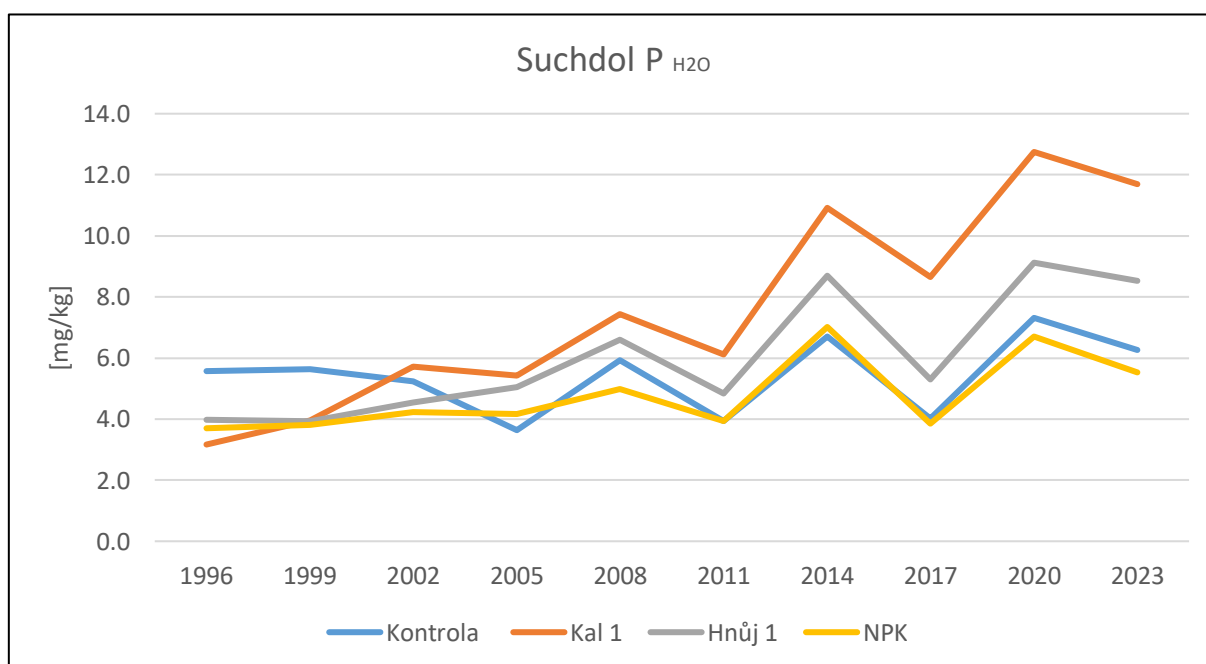
6.3 Stanoviště Suchdol

Jedná se o stanoviště nacházející se ve městě Praha. Souřadnice jsou 50°07'40" severní šířky a 14°22'33" východní délky. Nadmořská výška je 286 m. n. m., průměrná roční teplota je 9,1 °C (nejvyšší z tří sledovaných stanovišť) a průměrný roční úhrn srážek je 495 mm (nejnižší z tří sledovaných stanovišť). Půdní typ je zde černozem, půdní druh hlinitý a průměrné pH (CaCl₂) pozemků je 7,5 (nejvyšší z tří sledovaných stanovišť).

6.3.1 Okamžitě dostupný fosfor

Graf č. 5 prezentuje obsahy okamžitě dostupného fosforu v půdě u zkoumaných variant. Varianta Kontrola ve zkoumaných letech oscilovala od 3,6 (rok 2005) do 7,3 mg/kg (rok 2020). Varianta Kal 1 vykazovala v rozmezí sledovaných let hodnoty mezi 3,2 (rok 1996) a 12,7 mg/kg (rok 2020). Varianta Hnůj 1 se ve stejném období let pohybovala od 3,9 (rok 1999) do 9,1 mg/kg (rok 2020). Variantě NPK v těchto letech odpovídaly hodnoty mezi 3,7 (rok 1996) až 7,0 mg/kg (rok 2014). Z tohoto grafu je čitelné, že se u variant Kal 1 a Hnůj 1 postupem let zvýšil obsah okamžitě dostupného fosforu v porovnání s variantou Kontrola, totéž se nedá říci o variantě NPK. Výsledky u varianty NPK byly v průběhu celého pokusu srovnatelné (vyjma roku 2005).

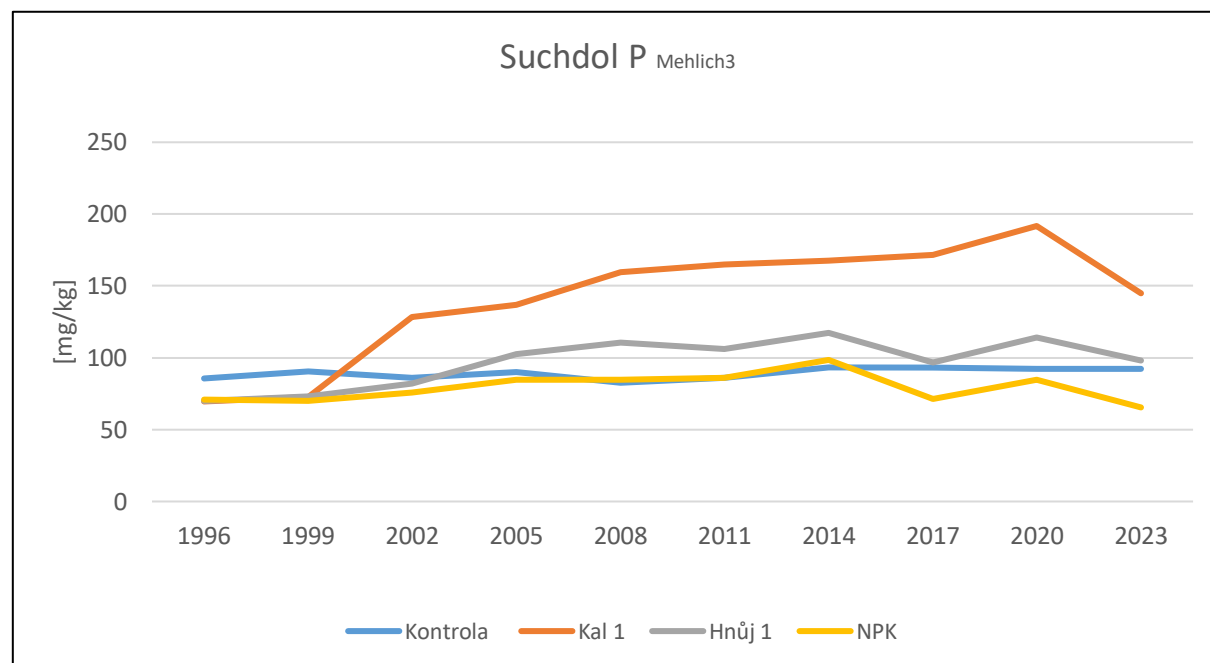
Graf č. 5: Obsahy okamžitě dostupného fosforu na stanovišti Suchdol



6.3.2 Přístupný fosfor

Graf č. 6 zobrazuje obsahy přístupného fosforu v půdě u zkoumaných variant. Varianta Kontrola se ve zkoumaných letech pohybovala od 83 (rok 2008) do 93 mg/kg (roky 2014 a 2017). Varianta Kal 1 kolísala v rozmezí let mezi 70 (rok 1996) až 192 mg/kg (rok 2020). Varianta Hnůj 1 ve stejném období let vykazovala rozmezí od 70 (rok 1996) do 117 mg/kg (rok 2020). Varianta NPK se v těchto letech pohybovala mezi 65 (rok 2023) až 99 mg/kg (rok 2014). V grafu se zobrazila dominance varianty Kal 1. Zároveň je vidět téměř souběžný vývoj v letech mezi variantami Hnůj 1 a NPK, kdy během prvních 6 let Hnůj 1 poodskočil a od té doby měly společně s NPK stejný trend v čase. Posledním dobře viditelným faktem je stálost varianty Kontrola, kde se navzdory ročníkům držel velmi vyrovnaný obsah přijatelného fosforu.

Graf č. 6: Obsahy přijatelného fosforu na stanovišti Suchdol



6.4 Ostatní charakteristiky fosforu v půdě

V tabulce č. 6 jsou sledovány výsledky 2 ročníků (rok 1996 a 2017), kdy byl stanoven fosfor v půdě 5 metodami. Kromě již řešeného vodného výluhu a Mehlich 3 se jedná o metody CAD, stanovení obtížně přístupného P horkou kyselinou dusičnou (HNO_3) a reziduálního P lučavkou královskou (aqua regia). Dále byl z obsahů fosforu, železa a hliníku stanovených metodou Mehlich 3 vypočten sorpční index (PSI) a stupeň nasycení půdy fosforem (DPS).

Na stanovišti Humpolec došlo ke zvýšení přístupného P stanoveného metodou CAD z roku 1996 na rok 2017 u všech variant včetně kontroly. Nejpodstatnější nárůst byl pozorován u varianty Kal 1. Podobný trend lze sledovat i u ostatních stanovišť. Jedinou výjimku tvoří varianta NPK na stanovišti Suchdol, kde došlo k mírnému poklesu ze 4,2 na 3,9 mg/kg. Celkově nejnižší hodnoty byly metodou CAD naměřeny na stanovišti Suchdol, pravděpodobně kvůli neutralizaci činidla vysokým pH půdy.

Horkou kyselinou dusičnou byl stanoven obsah obtížně přístupného fosforu. Nejpodstatnější nárůst je v případě všech stanovišť opět patrný u varianty Kal 1. Na stanovišti Humpolec došlo ke zvýšení z 295 na 566 mg/kg, na stanovišti Hněvčeves z 394 na 609 mg/kg a na stanovišti Suchdol z 511 na 820 mg/kg. K navýšení obsahů P došlo i u variant Hněj 1 a NPK. U kontrolních variant byly hodnoty v letech 1996 a 2017 poměrně vyrovnané.

Fosfor stanovený lučavkou královskou je označován jako reziduální, tj. velmi blízký celkovému. Dominuje tedy nepřístupná forma. Je zřejmé, že hnojení čistírenskými kaly vedlo k podstatnému zvýšení i v případě této formy P, a to na všech stanovištích. Na stanovištích Humpolec a Hněvčeves byl přitom nárůst téměř dvojnásobný.

Sorpční index PSI udává schopnost půdy poutat fosfor. S narůstajícím PSI je tak půda schopná přijímat více P, zejména vazbou s Fe a Al. Zde se z tabulky č. 6 nedají vyvodit jednoznačné tendence. Hodnoty u stanoviště Humpolec byly poměrně vyrovnané nezávisle na variantě hnojení i ročníku - rozmezí činilo 20,5-23,2 mmol/kg. Na stanovišti Hněvčeves došlo naproti tomu k navýšení hodnot u všech variant z roku 1996 na rok 2017, a to u všech variant přibližně o 4 mmol/kg. Rozdíly mezi variantami ani zde nejsou zřejmé. U stanoviště Suchdol lze v obou ročnících sledovat nejvyšší hodnotu u nehnojené kontroly. Varianty hnojené P nevykazují výrazné rozdíly v PSI.

Zajímavějších výsledků bylo dosaženo u stupně nasycení půdy fosforem (DPS). Ukázalo se, že na všech stanovištích došlo k nárůstu DPS u variant Kal 1 a Hněj 1,

přičemž nárůst u varianty Kal 1 byl vždy výraznější. Rovněž u varianty Kontrola došlo vždy k mírnému nárůstu. Rozdílné výsledky byly zaznamenány u varianty NPK. Zatímco u stanoviště Humpolec došlo k mírnému nárůstu hodnoty DPS o necelá 3 %, v případě stanovišť Hněvčeves a Suchdol byl naopak zaznamenán mírný pokles hodnot. To může poukazovat na fakt, že dávka P 30 kg/ha aplikovaná ve variantě NPK nemusí být pro poslední 2 zmiňovaná stanoviště dostatečná.

Zajímavou skutečností může být fakt, že zatímco jsme v předchozích grafech mohli vidět nejvyšší hodnoty okamžitě dostupného i přijatelného fosforu u stanoviště Hněvčeves, tyto hodnoty nereflektují stav reziduálního fosforu v půdě. V případě reziduálního fosforu (P aqua regia) jsou vidět vyšší hodnoty celkového fosforu v půdě jak u Humpolce, tak u Suchdolu.

Tabulka č. 6: Stanovení různých forem fosforu a jeho sorpčních charakteristik v letech 1996 a 2017

Humpolec								
Rok	Varianta	P _{CAD} [mg/kg]	P _{HNO3} [mg/kg]	P _{aqua regia} [mg/kg]	Al _{M3} [mg/kg]	Fe _{M3} [mg/kg]	PSI [mmol/kg]	DPS [%]
1996 (vstupní)	Kontrola	20,1	323	842	1038	235	21,3	11,5
	Kal 1	16,9	295	763	1002	217	20,5	10,3
	Hněj 1	24,3	342	930	1041	241	21,4	12,3
	NPK	25,3	337	889	1011	229	20,8	13,3
2017	Kontrola	21,0	337	924	1051	305	22,2	13,2
	Kal 1	65,8	566	1211	1069	375	23,2	25,0
	Hněj 1	27,9	370	1034	1033	303	21,8	16,7
	NPK	26,2	392	940	1097	302	23,0	15,0
Hněvčeves								
Rok	Varianta	P _{CAD} [mg/kg]	P _{HNO3} [mg/kg]	P _{aqua regia} [mg/kg]	Al _{M3} [mg/kg]	Fe _{M3} [mg/kg]	PSI [mmol/kg]	DPS [%]
1996 (vstupní)	Kontrola	60,1	373	539	665	202	14,1	18,0
	Kal 1	64,3	394	561	637	217	13,7	21,0
	Hněj 1	63,5	394	570	646	212	13,9	21,0
	NPK	63,9	399	524	627	219	13,6	21,9
2017	Kontrola	64,7	412	664	840	373	18,9	19,3
	Kal 1	139	609	1004	802	395	18,4	37,5
	Hněj 1	114	497	760	762	373	17,5	32,3
	NPK	61,0	409	652	792	351	17,8	19,6
Suchdol								
Rok	Varianta	P _{CAD} [mg/kg]	P _{HNO3} [mg/kg]	P _{aqua regia} [mg/kg]	Al _{M3} [mg/kg]	Fe _{M3} [mg/kg]	PSI [mmol/kg]	DPS [%]
1996 (vstupní)	Kontrola	9,91	586	869	679	136	13,8	20,1
	Kal 1	5,02	511	888	301	74,6	6,24	37,9
	Hněj 1	4,99	520	798	303	85,9	6,39	36,6
	NPK	4,20	513	823	295	74,8	6,13	40,5
2017	Kontrola	9,38	544	818	548	113	11,2	26,9
	Kal 1	10,0	820	1231	399	188	9,08	62,3
	Hněj 1	5,30	614	955	315	115	6,86	47,6
	NPK	3,87	579	770	322	91,1	6,79	37,3

Tabulka č. 7 zobrazuje procentuální obsahy okamžitě dostupného (v tabulce jako H₂O P) a přijatelného fosforu (v tabulce jako M₃ P) z celkového. Tato data reflektují zřejmý meziroční nárůst přístupného P u většiny variant. Výjimku tvoří varianta NPK na stanovištích Hněvčeves a Suchdol.

Důležitým zjištěním je také skutečnost, že nejvyšších procent přístupného fosforu bylo dosaženo na stanovišti Hněvčeves (varianty Kal 1 a Hnůj 1 přesáhly 20 %). Data ze stanovišť Humpolec a Suchdol jsou v číslech navzájem velmi podobná.

Tabulka č. 7: Procentuální zastoupení vodorozpustného a přijatelného fosforu v letech 1996 a 2017 na zkoumaných stanovištích

Rok	Humpolec				Hněvčeves				Suchdol			
	Varianta	P H ₂ O [%]	P M ₃ [%]	Ostatní P [%]	Varianta	P H ₂ O [%]	P M ₃ [%]	Ostatní P [%]	Varianta	P H ₂ O [%]	P M ₃ [%]	Ostatní P [%]
1996 (vstupní)	Kontrola	0,654	9,02	91,0	Kontrola	1,33	14,6	85,4	Kontrola	0,642	9,86	90,1
	Kal 1	0,526	11,6	88,4	Kal 1	1,74	15,8	84,2	Kal 1	0,356	7,83	92,2
	Hnůj 1	0,701	8,79	91,2	Hnůj 1	1,38	15,8	84,2	Hnůj 1	0,499	8,77	91,2
	NPK	0,751	9,56	90,4	NPK	1,73	17,4	82,6	NPK	0,449	8,62	91,4
2017	Kontrola	0,505	9,81	90,2	Kontrola	1,21	17,0	83,0	Kontrola	0,492	11,4	88,6
	Kal 1	0,834	14,8	85,2	Kal 1	1,75	21,3	78,7	Kal 1	0,703	14,0	86,0
	Hnůj 1	0,733	10,9	89,1	Hnůj 1	2,37	23,0	77,0	Hnůj 1	0,554	10,1	89,9
	NPK	0,745	11,4	88,6	NPK	1,61	16,6	83,4	NPK	0,501	9,23	90,8

Vývoj zastoupení fosforu stanoveného různými metodami v letech 1996 a 2017

V této práci jsou hodnoceny čtyři varianty, kdy jediná z nich (Kontrola) je nehnojená, ostatním třem je fosfor dodáván větší či menší měrou, jednotnou či dělenou dávkou. Z těchto informací by se dal očekávat úbytek P na nehnojené variantě a zvýšení jeho obsahu u variant hnojených.

Na stanovišti Humpolec nastal očekávaný úbytek mezi lety 1996 a 2017 u varianty Kontrola pouze u vodorozpustného P. U všech ostatních metod stanovení jeho obsah vzrostl, jak je vidět z tabulky č. 8. Ostatní tři varianty měly stoupající tendenci ve všech případech, varianty Hnůj 1 a NPK v řádech jednotek až nižších desítek, zatímco Kal 1 v řádech desítek až stovek procent - od 58,6 % u P aqua regia po 289 % u P CAD.

Tabulka č. 8: Procentuální vyjádření změn obsahu fosforu stanovených různými metodami na stanovišti Humpolec (rok 1996 = 100 %)

Humpolec						
	Varianta	P H ₂ O [mg/kg]	P CAD [mg/kg]	P M ₃ [mg/kg]	P HNO ₃ [mg/kg]	P aqua regia [mg/kg]
Meziroční nárůst/pokles [%]	Kontrola	-15,4	4,64	19,4	4,44	9,70
	Kal 1	152	289	102	91,7	58,6
	Hnůj 1	16,3	14,7	38,2	8,11	11,2
	NPK	4,89	3,38	25,8	16,2	5,79

U stanoviště Hněvčeves nastal úbytek obsahu fosforu pouze v jediném případě, a to při stanovení obsahu P metodou CAD u varianty NPK (tabulka č. 9). I nehnojená Kontrola zaznamenala nárůst u všech pěti metod stanovení, nejvíce pak u Mehlich 3 - zde dosáhla navýšení o 43 % v roce 2017 oproti roku 1996. Nejvyšší nárůst vyjádřený procentním rozdílem měla stejně jako u stanoviště Humpolec varianta Kal 1, tentokrát podle stanovení dle Mehlich 3. Tyto hodnoty jsou všechny zobrazeny v tabulce č. 9.

Tabulka č. 9: Procentuální vyjádření změn obsahu fosforu stanovených různými metodami na stanovišti Hněvčeves (rok 1996 = 100 %)

Hněvčeves						
Rok	Varianta	P H ₂ O [mg/kg]	P CAD [mg/kg]	P M ₃ [mg/kg]	P HNO ₃ [mg/kg]	P aqua regia [mg/kg]
Meziroční nárůst/pokles [%]	Kontrola	12,4	7,71	43,0	10,3	23,1
	Kal 1	80,2	116	141	54,4	79,0
	Hnůj 1	128	79,0	94,6	26,1	33,3
	NPK	15,6	-4,68	18,3	2,57	24,4

Varianta Kontrola na stanovišti Suchdol se nejvíce blížila predikcím ohledně klesajícího obsahu P. Z tabulky č. 10 je zřejmé, že podle čtyř metod z pěti vyšel nižší obsah fosforu v roce 2017 než v roce 1996. Jedinou kladnou hodnotou bylo stanovení podle Mehlich 3. Z hnojených variant jediná s úbytkem obsahu P byla varianta NPK, a to hned u dvou metod stanovení: CAD a lučavka královská. Nejvyššího nárůstu dosáhla opět varianta Kal 1, avšak tentokrát byl nejvyšší nárůst zaznamenán u jiné metody - P H₂O, a to o 173 %.

Tabulka č. 10: Procentuální vyjádření změn obsahu fosforu stanovených různými metodami na stanovišti Suchdol (rok 1996 = 100 %)

Suchdol						
	Varianta	P H ₂ O [mg/kg]	P CAD [mg/kg]	P M ₃ [mg/kg]	P HNO ₃ [mg/kg]	P aqua regia [mg/kg]
Meziroční nárůst/pokles [%]	Kontrola	-27,9	-5,35	8,48	-7,04	-5,95
	Kal 1	173	99,2	147	60,7	38,5
	Hnůj 1	32,9	6,35	38,2	18,0	19,7
	NPK	4,34	-7,77	0,27	12,8	-6,43

Vývoj obsahu okamžitě dostupného a přijatelného P v závislosti na plodině

V tříletém osevním cyklu brambory-pšenice-ječmen jsou organická hnojiva dodávána jednorázově na podzim před bramborami, minerální P u varianty NPK před všemi plodinami a Kontrola není hnojena vůbec. Předpokladem tedy je, že nejvyšší obsahy P by se v případě organických hnojiv měly vyskytovat v odběrech po sklizni brambor a poté by postupně mělo docházet k poklesu. Rok 1996 nebyl do vyhodnocení započítán, protože hnojiva v tomto roce ještě nebyla aplikována.

Vodorozpustná forma P v Humpolci předpoklady nesplňovala, zato přijatelný fosfor stanovený podle Mehlich 3 až na jednu výjimku ano. Ze strategií (ne)hnojení by se dal očekávat pokles u varianty Kontrola, který metoda Mehlich 3 potvrdila. U variant Kal 1 a Hnůj 1 byl očekáván nejvyšší obsah P po sklizni brambor a následná snižující se tendence u pšenice a ječmene. Obsah přijatelného fosforu u varianty Hnůj 1 tuto předpověď také naplnil, avšak u Kal 1 byly zaznamenány nejvyšší hodnoty přijatelného P u pšenice. Varianta NPK dostávala každý rok dávku 30 kg P/ha ve formě trojitého superfosfátu. Předpokládaná stagnující tendence fosforu stanoveného metodou Mehlich 3 je zřejmá, jak je vidět v tabulce č. 11.

Tabulka č. 11: Vývoj forem P v závislosti na plodině v lokalitě Humpolec (průměry z let 1999-2023)

Varianty	Brambory		Pšenice		Ječmen	
	P _{H2O} [mg/kg]	P _{M3} [mg/kg]	P _{H2O} [mg/kg]	P _{M3} [mg/kg]	P _{H2O} [mg/kg]	P _{M3} [mg/kg]
Kontrola	6,77	102	5,71	84,9	5,89	81,2
Kal 1	6,81	118	9,35	171	9,23	135
Hnůj 1	7,95	116	8,66	103	7,87	101
NPK	6,80	105	7,41	103	6,90	100

U stanoviště Hněvčeves měly všechny varianty vyrovnané obsahy přijatelného P, kromě Kal 1, který zaznamenal mírný pokles viz. tabulka č. 12. U vodorozpuštěného fosforu lze vidět pokles u variant Kontrola a Kal 1, zatímco obsahy u Hnůj 1 a NPK klesly po pšenici, ale vzrostly po ječmeni.

Tabulka č. 12: Vývoj forem P v závislosti na plodině v lokalitě Hněvčeves (průměry z let 1999-2023)

Varianty	Brambory		Pšenice		Ječmen	
	P H ₂ O [mg/kg]	P M ₃ [mg/kg]	P H ₂ O [mg/kg]	P M ₃ [mg/kg]	P H ₂ O [mg/kg]	P M ₃ [mg/kg]
Kontrola	7,74	80,3	7,45	84,1	6,73	79,3
Kal 1	15,4	173	13,9	162	13,0	161
Hnůj 1	15,7	134	12,5	128	12,9	130
NPK	11,2	100	10,2	97,6	11,3	103

V lokalitě Suchdol se predikované výsledky potvrdily jen částečně (Tabulka č. 13). Nejblíže předpokladům byla varianta Kontrola, u které okamžitě přístupný P H₂O stagnoval, přijatelný fosfor P M₃ snížil svůj obsah v půdě o 7 mg/kg. Varianty Hnůj 1 a NPK držely u všech plodin vyrovnaný obsah. Výsledky varianty Kal 1 byly zcela proti odhadovanému trendu, kdy nejvyšší zaznamenaný obsah obou forem P můžeme zaznamenat u ječmene. To lze vyčíst z tabulky č. 13.

Tabulka č. 13: Vývoj forem P v závislosti na plodině v lokalitě Suchdol (průměry z let 1999-2023)

Varianty	Brambory		Pšenice		Ječmen	
	P H ₂ O [mg/kg]	P M ₃ [mg/kg]	P H ₂ O [mg/kg]	P M ₃ [mg/kg]	P H ₂ O [mg/kg]	P M ₃ [mg/kg]
Kontrola	5,44	94,2	5,28	87,2	5,51	87,4
Kal 1	7,44	137	7,59	153	9,20	156
Hnůj 1	6,00	100	5,95	95,5	6,92	105
NPK	4,69	77,3	4,03	79,0	6,02	84,0

7 Diskuse

Výsledky této práce hodnotí množství okamžitě přístupného (vodou vylouhovatelého) a potenciálně přijatelného (metodou dle Mehlich 3) fosforu v tříletých odstupech od roku 1996 do roku 2023. Zároveň se zaměřuje i na jiné metody stanovení obsahu P, avšak ty byly aplikovány pouze v letech 1996 a 2017. Zkoumanými variantami byly 1) nehnojená kontrola, 2) čistírenský kal, 3) chlévský hnůj a 4) minerální hnojivo NPK. Tento experiment probíhal a nadále probíhá v lokalitách: Humpolec, Hněvčeves a Suchdol.

V roce 1996 před samotným zahájením pokusu byl ve všech třech lokalitách měřen obsah fosforu způsoby zmíněnými v metodice. Ivanič et al. (1984) považují za obvyklé množství vodorozpustných sloučenin P 0,8 až 8 mg/kg. Zjištěné hodnoty na zatím nehnojených stanovištích se pohybovaly v Humpolci od 2,7 do 8,8 mg/kg, v Hněvčevsi mezi 6,1 až 11,1 mg/kg a v Suchdole v rozmezí 2,5-6,4 mg/kg. Z těchto výsledků je zřejmé, že byly v souladu s uvedenou publikací a došlo k prakticky zanedbatelnému překročení těchto hodnot danému přirozenými vlastnostmi stanovišť.

Přijatelný fosfor byl stanovován metodou Mehlich 3, která se v České republice standardně využívá pro agrochemické zkoušení zemědělských půd. Metodika Ústředního kontrolního a zkušebního ústavu zemědělského (2022) rozděluje plochy orné půdy podle obsahu fosforu na 5 kategorií: nízký do 50 mg/kg, vyhovující mezi 51-80 mg/kg, dobrý od 81 do 115 mg/kg, vysoký v rozmezí 116 až 185 mg/kg a velmi vysoký nad 185 mg/kg. Na třech lokalitách, které tato práce řeší, se v roce 1996 v době založení pokusu pohybovaly hodnoty přijatelného P následovně: v Humpolci mezi 59-89 mg/kg, v Hněvčevsi od 70 do 105 mg/kg a v Suchdole v rozmezí 59 až 91 mg/kg. Na základě toho se jednalo o lokality s vyhovujícím až dobrým obsahem fosforu.

V dalších letech pokusu neklesl obsah vodorozpustného fosforu pod spodní hranici 0,8 mg P/kg, kterou udávají Ivanič et al. (1984). Nejnižší hodnota 2,7 mg/kg byla naměřena na variantě NPK po pšenici na stanovišti Suchdol v roce 2017. Naopak největší obsahy P H₂O pravidelně dokazovaly varianty Kal 1 a Hnůj 1: horní mez udávanou v Ivanič et al. (1984) 8 mg/kg zvýšilo hnojení dokonce trojnásobně na stanovišti Hněvčeves v roce 2020 po bramborách, kdy varianta Kal 1 obsahovala 24,8 mg/kg a Hnůj 1 až 26,4 mg/kg.

Marschner (1995) ve své publikaci tvrdí, že obsah přijatelného fosforu (stanoveného dle Mehlich 3) je proměnný a kolísá v rozmezí 10-100 mg/kg. Nejnižší hodnota z dat, která byla využita pro tuto diplomovou práci, byla varianta Kontrola po ječmeni na stanovišti Humpolec v roce 2023. Ta obsahovala 48 mg/kg, což je uprostřed rozmezí,

kteře udává Marschner (1995). Stejně jako u okamžitě přijatelného P byl nejvyšší obsah na stanovišti Hněvčeves v roce 2020 po bramborách, kde varianta Kal 1 dosáhla hodnoty 240 mg/kg.

U většiny hnojených variant došlo k většímu či menšímu nárůstu forem P oproti nehnojené kontrole nehledě na rok, stanoviště nebo plodinu. Stanoviště, na kterých bylo aplikováno NPK, ale někdy vykazovala menší hodnoty než Kontrola, kde nebyl fosfor dodáván vůbec. Po celou dobu experimentu je NPK pouze označením. Jak je v metodice zmíněno, na pokusných lokalitách nebylo hnojeno kombinovaným hnojivem s obsahem dusíku, fosforu a draslíku. N byl dodáván ve formě LAV 27, P trojitým superfosfátem a K draselnou solí. Trojitý superfosfát je dobře rozpustný ve vodě, a tudíž i lehce přijatelný pro rostliny. V této práci nejsou hodnoceny výnosy plodin, ale z nepublikovaných výsledků je zřejmé, že na variantě NPK jsou zpravidla nejvyšší výnosy plodin spojené s největším odběrem P. To je pravděpodobně příčinou podobných a někdy i nižších obsahů přístupného P v půdě u varianty NPK ve srovnání s kontrolou. Hlavním faktorem zde zřejmě byla přístupnost fosforečnanů z hnojiva.

Dle Smatanové (2021) je rozpustnost anorganických sloučenin P v půdě určována aktivitou železitých a hlinitých iontů a dále aktivitou iontů vápenatých. Ivanič et al. (1984) tvrdí, že půdy s nízkým pH navážou 2-3krát více P než neutrální a alkalické půdy. Zároveň chemická sorpce zde probíhá rychleji. Tyto fakty dokazují podstatné rozdíly mezi poutáním P v půdách s nízkým pH oproti neutrálním a alkalickým. Anorganické fosfáty se transformují zpravidla od labilnějších forem k stabilnějším (těžko rozpustným). Z výše uvedeného je možné vyvodit závěr, že železité a hlinité fosforečnany lze najít v půdách s nízkým pH, v neutrální a alkalické půdní reakci jsou více zastoupeny vápenaté fosforečnany.

Dalším důležitým ukazatelem je proto stupeň nasycení půdy fosforem (DPS), který byl vypočten dle obsahů P, Fe a Al stanovených metodou Mehlich 3 (viz metodika). DPS je důležitým půdním parametrem určujícím hranici, kdy začíná hrozit riziko vyplavování fosforu (Xu et al. 2020). Elbasiouny et al. (2020) udávají jako kritický stupeň nasycení fosforem hodnotu 25 %, autoři Jalali & Jalali (2016) uvádějí hodnoty vyšší, a to 25-40 %. U stanoviště Humpolec vyšly ze tří sledovaných lokalit nejnižší hodnoty. Stupeň nasycení fosforem se zde pohyboval od 10,3 % do 25 % (případ varianty Kal 1 v roce 2017). Hodnoty DPS pro stanoviště Hněvčeves se pohybovaly výše - v rozmezí 18,0 % až 37,5 % (varianta Kal 1 v roce 2017). Na obou lokalitách nebyl překročen práh 40 % dle Jalali & Jalali (2016), hranici 25 % určenou podle Elbasiouny et al. (2020) překročily varianty Kal 1

a Hnůj 1 na stanovišti Hněvčeves. V lokalitě Suchdol se hodnota DPS pohybovala mezi 20,1-62,3 %. Jedinou variantou, která nepřekročila hranice udávané zmíněnými autory, byla Kontrola v roce 1996. Avšak i ta v roce 2017 dosáhla hodnoty 26,9 %. Příčinou vysokých hodnot DPS u stanoviště Suchdol je vysoká hodnota pH a s tím související nízké koncentrace volného železa a hliníku se schopností vázat fosfor.

U zkoumaných lokalit byly zaznamenány výrazné nárůsty obsahů fosforu u všech hodnocených metod stanovení fosforu po aplikaci čistírenských kalů. Ty po odvodnění a stabilizaci představují alternativu hnojiv pro zemědělské využití. Jejich nespornou výhodou je značný obsah organických látek, makrobiogenních prvků (hlavně N a P), mikroprvků a bioaktivních látek. Hlavním úskalím využití kalů na zemědělské půdě je přítomnost těžkých kovů a patogenních mikroorganismů (Černý 2010). Použitím čistírenského kalu s průměrnou kvalitou při povolené maximální dávce 5 t sušiny/ha dodáme do půdy 55 g arsenu, 15 g kadmia, 714 g chromu, 1140 g mědi, 16 g rtuti, 218 g niklu, 580 g olova a 6,6 kg zinku. Tato množství překračují několikanásobně odběr těchto prvků rostlinami. Při dlouhodobém užití kalů hrozí riziko zhoršení kvality produkovaných komodit (Balík et al. 2004). Další, a v dnešní době rizikovější cizorodé látky, jsou polycyklické aromatické uhlovodíky, organické chlorované látky (polychlorované bifenyly, dioxiny aj.) a další organické látky, například chemikálie pro domácnost, farmaka, endokrinní disruptory a jiné (Černý 2010). Vzhledem k tomu, že aplikace použitých dávek kalů vedla ke značnému nárůstu přístupných forem P i akumulaci rostlinami nevyužitého fosforu, dala by se uvedená rizika jejich aplikace částečně eliminovat snížením jejich dávky. Nejvyšších nárůstů obsahu přístupných forem P zaznamenal čistírenský kal v lokalitě Humpolec, kde by Zákon o odpadech č. 541/2020 Sb. v normálních případech zakazoval jejich aplikaci, jelikož je půdní reakce nižší než 5,6.

Chlévský hnůj i přes fakt, že v něm bylo dodáváno do půdy o 170 kg P méně než čistírenskými kaly, také zvýšil značnou měrou obsah zejména okamžitě dostupného fosforu. Dle Vaňka et al. (2007) se jeho pravidelným hnojením rovněž zlepšují vlastnosti půdy: hospodaření s vodou, sorpce živin a jejich využití rostlinami, pufrční vlastnosti. Kromě fosforu a dusíku obsahuje další makrobiogenní prvky jako draslík, vápník, hořčík i množství stopových prvků. Kvalitní hnůj má poměr uhlíku k dusíku 17:1 a méně. Zároveň obsahuje 1-2 % mikroorganismů (stanoveno ze sušiny) a bioaktivní látky (Richter & Římovský 1996). Hnůj přímo působí na růst rostlin, je zdrojem makro i mikroprvků v dostupných formách a zlepšuje fyziologické a fyzikální vlastnosti půdy, což je výhodou ve srovnání s minerálním NPK.

8 Závěr

Obsah fosforu v půdách ČR se pohybuje v nízkých hodnotách a většina jeho podílu tvoří nepřístupné sloučeniny pro rostliny. Zásoby neobnovitelných zdrojů P ubývají, a tudíž fosforečná hnojiva narůstají na ceně. Z důvodu snahy o udržení výnosů plodin je potřeba se po jiných zdrojích fosforu poohlédnout jinde. Jako možná alternativa se jeví například čistírenské kaly.

Cílem práce bylo porovnání vývoje obsahů různých forem fosforu v půdě v závislosti na různých systémech hnojení, plodině a půdně-klimatických podmínkách. Dalším cílem bylo vyhodnocení vývoje sorpčních charakteristik fosforu v závislosti na hnojení a půdně-klimatických podmínkách.

Obsah vodorozpustného fosforu byl na všech třech lokalitách vždy vyšší než 2,7 mg P/kg půdy. Ve většině případů byly nejvyšší hodnoty zaznamenány u varianty hnojené čistírenskými kaly následované variantou Hnůj 1. Rozdíly mezi variantou Kal 1 a Hnůj 1 byly vzhledem k aplikované dávce fosforu v obou hnojivech poměrně malé.

U ostatních metod stanovení P v půdě byl zřejmý nejvyšší nárůst obsahu fosforu po aplikaci čistírenských kalů na všech zkoumaných lokalitách. Varianty hnojené organickými hnojivy zvýšily obsahy potenciálně přístupných i nepřístupných forem P. Varianta NPK byla naopak ve většině případů srovnatelná s kontrolou, někdy dokonce i s nižšími hodnotami. To bylo pravděpodobně zapříčiněno odčerpáním fosforu rostlinami, jelikož z nepublikovaných výsledků výnosu víme, že na stanovištích s hnojením NPK byly odběry P rostlinami zpravidla nejvyšší.

Zatímco z hodnot sorpčního indexu fosforu prakticky nelze vyvodit rozdíly mezi variantami, stupeň nasycení půdy fosforem byl vždy nejvyšší u varianty Kal 1. Po 21 letech pokusu došlo u této varianty na všech stanovištích k vyrovnání nebo i překročení kritické hranice 25 %, znamenající zvýšené riziko vyplavení P.

Očekávané vývoje obsahů vodorozpustného a mobilního (P M3) fosforu v závislosti na termínu aplikace hnojiv neodpovídaly předpokladům. U organických hnojiv aplikovaných před první plodinu osevního sledu, tj. brambory, byl očekávaný nejvyšší obsah P po sklizni brambor a jeho postupný úbytek u následujících plodin. Tato predikce se u většiny variant nepotvrdila.

Jako hlavní závěry práce lze uvést následující: varianta hnojená kaly vedla k výrazné akumulaci fosforu v půdě, avšak riziko vyplavení P je zde pravděpodobně menší než u varianty hnojené hnojem. V případě, že je fosfor limitující živinou, se jeví jako nejvhodnější z hlediska jeho doplnění varianta hnojená minerálním P ve variantě NPK. Z komplexnějšího pohledu je však vhodnější hnůj, jelikož jsou jeho prostřednictvím doplněny i organické látky a další živiny.

9 Literatura

- Balík J, Vaněk V, Pavlíková D, Kulhánek M, Jakl M. 2002. Fosfor v půdě a jeho koloběh v přírodě. Pages 26-34 in Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Balík J, Kulhánek M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2008. Fosfor v půdě. Pages 23-30 in Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Balík J, Pavlíková D, Hlušek J, Provazník K. 2004. Zdroje rizikových prvků v životním prostředí. Pages 22-29 in Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku rizikových látek v rostlinné výrobě. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Balík J, Pavlíková D, Vaněk V. 2021. Příjem fosforu rostlinami – schopnosti rostlin k mobilizaci fosforu z půdy. Pages 15-22 in Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Blume HP, et al. 2002. Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag, Stuttgart.
- Ciešlik BM, Namieśnik J, Konieczka P. 2015. Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. *Journal of Cleaner Production* **90**:1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.031>
- Cordell D, Rosemarin A, Schröder JJ, Smit AL. 2011. Towards global phosphorus security: A systems framework for phosphorus recovery and reuse options. *Chemosphere* **84**:747-758. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.02.032>
- CSN EN 13651. 2002. Soil improvers and growing media–Extraction of calcium chloride/DTPA (CAT) soluble nutrients. Czech Normalization Institute, Prague.
- Černý J. 2010. Využití odpadů z ČOV jako zdroje organických látek a živin. Available from <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-odpadu-z-cov-jako-zdroje-organickych-latek-a-zivin> (accessed April 2024)
- Černý J, Balík J, Kulhánek M, Sedlář O. 2021. Fosforečná hnojiva a využití fosforu z odpadních látek. Pages 59-67 in Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem. Česká zemědělská univerzita, Praha.

- Černý J, Balík J, Kulhánek M, Vašák F, Vaněk V. 2014. Využití kalů z čistíren odpadních vod. Pages 19-26 in Racionální použití hnojiv zaměřené na zdroje živin a využití odpadních látek v zemědělství. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Dean RB, Suess MJ. 1985. The risk to health of chemicals in sewage sludge applied to land. *Waste Management and Research* **3**:251-278. [https://doi.org/10.1016/0734-242X\(85\)90115-6](https://doi.org/10.1016/0734-242X(85)90115-6)
- Desmidt E, Ghyselbrecht K, Zhang Y, Pinoy L, Van der Bruggen B, Verstraete W, Rabaey K, Meesschaert B. 2015. Global phosphorus scarcity and full-scale P-recovery techniques: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **45**:336-384. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.866531>
- Elbasiouny H, Elbehiry F, El-Ramady H, Brevik EC. 2020. Phosphorus Availability and Potential Environmental Risk Assessment in Alkaline Soils. *Agriculture* **10**:172. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050172>
- Ghannoum O, Paul MJ, Ward JL, Beale MH, Corol DI, Conroy JP. 2008. The sensitivity of photosynthesis to phosphorus deficiency differs between C3 and C4 tropical grasses. *Functional Plant Biology* **35**:213-221. <https://doi.org/10.1071/FP07256>
- Helmke PA, Sparks DL. 1996. Lithium, Sodium, Potassium, Rubidium, and Cesium. Pages 551-574 in Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnston CT, Sumner ME, editors. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c19>
- Huygens D, Saveyn HGM. 2018. Agronomic efficiency of selected phosphorus fertilisers derived from secondary raw materials for European agriculture. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development* **38**:1-14. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0527-1>
- ISO 11466:1995. 1995. International Organization for Standardization. Soil quality - extraction of trace elements soluble in aqua regia. Available online: <https://www.iso.org/standard/19418.html>
- Ivanič J, Havelka B, Knop K. 1984. *Výživa a hnojenie rastlín. Příroda*, Bratislava.

- Jalali M, Jalali M. 2016. Relation between various soil phosphorus extraction methods and sorption parameters in calcareous soils with different texture. *Science of The Total Environment* **566-567**:1080-1093. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.133>.
- Jalali M, Jalali M. 2017. Assessment risk of phosphorus leaching from calcareous soils using soil test phosphorus. *Chemosphere* **171**:106-117. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.042>
- Jones DL, Oburger E. 2011. Solubilization of Phosphorus by Soil Microorganisms. Pages 169-198 in Bünemann E, Oberson A, Frossard E, editors. *Phosphorus in Action*. Springer, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15271-9_7
- Kelessidis A, Stasinakis AS. 2012. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management* **32**:1186-1195. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.012>
- Klír J, Wollnerová J. 2014. Úroveň organického hnojení v ČR a v okolních zemích. Pages 15-18 in *Racionální použití hnojiv zaměřené na zdroje živin a využití odpadních látek v zemědělství*. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Kolář L, Kužel S. 2002. Organický fosfor v půdách. Pages 35-37 in *Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě*. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Kowaljow E, Mazzarino MJ, Satti P, Jiménez-Rodríguez C. 2010. Organic and inorganic fertilizer effects on a degraded Patagonian rangeland. *Plant and Soil* **332**:135-145. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0279-4>
- Kunzová E. 2009. *Výživa rostlin a hnojení fosforem*. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v. v. i., Praha.
- Lu Q, He ZL, Stoffella PJ. 2012. Land Application of Biosolids in the USA: A Review. *Applied and Environmental Soil Science* **2012**:1-11. <https://doi.org/10.1155/2012/201462>
- Luscombe PC, Syers JK, Gregg PEH. 1979. Water extraction as a soil testing procedure for phosphate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **10**:1361-1369. <https://doi.org/10.1080/00103627909366991>

- MacDonald GK, Bennett EM, Potter PA, Ramankutty N. 2011. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **108**:3086-3091. <https://doi.org/10.1073/pnas.1010808108>
- Manning DAC. 2008. Phosphate minerals, environmental pollution and sustainable agriculture. *Elements* **4**:105-108. <https://doi.org/10.2113/GSELEMENTS.4.2.105>
- Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, Amsterdam.
- Marschner P. 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Elsevier, San Diego.
- Mehlich A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **15**:1409-1416. <https://doi.org/10.1080/00103628409367568>
- Mehmood A, Akhtar MS, Imran M, Rukh S. 2018. Soil apatite loss rate across different parent materials. *Geoderma* **310**:218-229. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.09.036>
- Mengel K. 1991. Ernährung und Stoffwechsel die Pflanze. Gustav Fischer Verlag, Jena.
- Ministerstvo zemědělství. 1998. Zákon č. 156 ze dne 12. června 1998 o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd. Pages 6709-6715 in *Sbírka zákonů České republiky, 1998, částka 54. Česká republika.*
- Ministerstvo zemědělství. 2021. Vyhláška č. 392 ze dne 15. října 2021, kterou se mění vyhláška č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv, ve znění pozdějších předpisů, a vyhláška č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů. Pages 5002-5016 in *Sbírka zákonů Česká republika, 2021, částka 174. Česká republika.*
- Ministerstvo životního prostředí. 2020. Zákon č. 541 ze dne 1. prosince 2020 o odpadech. Pages 6082-6192 in *Sbírka zákonů Česká republika, 2020, částka 222. Česká republika.*
- Ministerstvo životního prostředí. 2021. Vyhláška č. 273 ze dne 12. července 2021 o podrobnostech nakládání s odpady. Pages 2826-3032 in *Sbírka zákonů Česká republika, 2021, částka 119. Česká republika.*

- Nadeem M, Mollier A, Morel C, Vives A, Prud'homme L, Pellerin S. 2011. Relative contribution of seed phosphorus reserves and exogenous phosphorus uptake to maize (*Zea mays* L.) nutrition during early growth stages. *Plant and Soil* **346**:231-244. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0814-y>
- Pavlíková D, Pavlík M, Balík J. 2008. Úloha fosforu v rostlinách. Pages 31-35 in Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Reich PB, Oleksyn J, Wright IJ, Niklas KJ, Hedin L, Elser JJ. 2010. Evidence of a general 2/3-power law of scaling leaf nitrogen to phosphorus among major plant groups and biomes. *Proceedings of the Royal Society B, Biological Sciences* **277**:877-883. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.1818>
- Reijnders L. 2014. Phosphorus resources, their depletion and conservation, a review. *Resources, conservation and recycling*, **93**:32-49. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.09.006>
- Richter R, Římovský K. 1996. Organická hnojiva, jejich výroba a použití. Institut výchovy a vzdělávání Ministerstva zemědělství, Nové Město nad Cidlinou.
- Rodrigues SM, et al. 2017. Nanotechnology for sustainable food production: promising opportunities and scientific challenges. *Environmental Science: Nano* **4**:767-781. <https://doi.org/10.1039/C6EN00573J>
- Sanchez PA, Buresh RJ, Leakey RRB. 1997. Trees, soils, and food security. *Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences* **352**:949-961. <https://doi.org/10.1098/rstb.1997.0074>
- Sharpley AN, Menzel EG. 1987. The impact of soil and fertilizer phosphorus to the environment. *Advances in Agronomy* **41**:297-324. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60807-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60807-X)
- Sharpley AN, Robinson JS, Smith SJ. 1995. Bioavailable phosphorus dynamics in agricultural soil and effects on water quality. *Geoderma* **67**:1-15. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)00027-8](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)00027-8)
- Schilling G. 2000. Pflanzenernährung und Düngung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

- Smatanová M. 2021. Hodnocení zásobenosti orných půd České republiky přístupným fosforem. Pages 45-50 in Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Syers JK, Johnston AE, Curtin D. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. FAO Fertilizer and plant nutrition bulletin 18. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Tlustoš P, Pavlíková D, Balík J. 2002. Úloha fosforu v rostlinách, jeho příjem a potřeba rostlinami. Pages 38-45 in Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Tlustoš P, Száková J, Budňáková M, Hendrych K, Mihalík J, Trakal L. 2008. Zdroje fosforu a výroba fosforečných hnojiv. Pages 42-51 in Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- ÚKZÚZ. 2022. Pracovní postupy pro agrochemické zkoušení zemědělských půd v České republice v období 2023 až 2028. Page 18 in Metodický pokyn č. 01/AZZP. Česká republika.
- Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P. 2007. Výživa polních a zahradních rostlin. Profi Press. Praha.
- Vaněk V, Štípek K, Šilha J, Balík J. 2002. Systém hnojení fosforem. Pages 66-73 in Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Veneklaas EJ, Lambers H, Bragg J, Finnegan PM, Lovelock CE. 2012. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. *New Phytologist* **195**:306-320. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04190.x>
- Wang B, Shen J, Tang C, Rengel Z. 2008. Root morphology, proton release, and carboxylate exudation in lupin in response to phosphorus deficiency. *Journal of Plant Nutrition*, **31**:557-570. <https://doi.org/10.1080/01904160801895084>
- White PJ, Broadley MR. 2009. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets - iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist* **182**:49-84. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x>

- Withers PJA, Sylvester-Bradley R, Jones DL, Healey JR, Talboys PJ. 2014. Feed the crop not the soil: rethinking phosphorus management in the food chain. *Environmental Science and Technology* **48**:6523-6530. <https://doi.org/10.1021/es501670j>
- Xu X, Wang Y, Zhang H, Yin D, Dari B, Xu J. 2020. Soil phosphorus storage capacity as affected by repeated phosphorus addition in an Ultisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **51**:1960-1968. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1813751>
- Yang B, Cao S, Zhu Z, Yin W, Sheng Q, Sun H, Yao J, Chen K. 2021. Selective flotation separation of apatite from dolomite utilizing a novel eco-friendly and efficient depressant for sustainable manufacturing of phosphate fertilizer. *Journal of Cleaner Production* **286**:124949. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124949>