

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



Příjem fosforu ozimou pšenicí na alkalických půdách

Bakalářská práce

Kateřina Kubatková

Rostlinná produkce

Ing. Ondřej Sedlář, Ph.D.

© 2019 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Příjem fosforu ozimou pšenicí na alkalických půdách" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 17. 4. 2019

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala mému vedoucímu Ing. Ondřeji Sedlářovi, Ph.D. za trpělivé a ochotné vedení mé bakalářské práce. Dále bych ráda poděkovala podniku ZS Slatina pod Hazmurkem a.s. za ochotu při odebírání půdních a rostlinných vzorků. Velké poděkování patří též Technologické agentuře České republiky z podporu projektu TJ01000454. V neposlední řadě patří poděkování mým rodičům, kteří mě během studia velmi podporovali.

Příjem fosforu ozimou pšenicí na alkalických půdách

Souhrn

Pšenice setá (*Triticum aestivum*) je nejpěstovanější obilninou v České republice (k roku 2018). Její výměry zaujímají 61 % z celkové plochy orné půdy. Jde o velice významnou pěstovanou plodinu a na našem území ji lze pěstovat ve všech výrobních oblastech. Fosfor je jedním z makroprvků. Největší množství se ho nachází v zrně. V rostlinách plní zásobní a stavební funkci. Dále je součástí přenašečů energie (ATP). Na alkalických půdách může být přístupnost fosforu nižší. Je důležité nepodcenit zásobní hnojení fosforečnými hnojivy, jelikož hnojení fosforem během vegetace je téměř neúčinné. Pro zvýšení přístupnosti fosforu je důležité dodávat do půdy organickou hmotu.

Jako vzorky byly použity odběry půd a rostlinného materiálu z deseti okresů v České republice. Odebírání vzorků probíhalo dvakrát během vegetace v letech 2015 – 2017. Při prvním odběru byl odebrán půdní vzorek do hloubky 30 cm a nadzemní biomasa pšenice ozimé na konci odnožování (BBCH 31). Z druhého odběru byla použita pouze nadzemní biomasa pšenice ozimé na konci kvetení (BBCH 69). Půdní reakce se pohybovala v rozmezí pH 7 až 8,02.

Předpokládalo se, že nejsilnější korelace bude mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným pomocí Olsenova výluhu s jednou z charakteristik vypovídajících o obsahu fosforu v rostlině. Dále bylo očekáváno, že ve slabé závislosti bude obsah fosforu v půdě stanovený pomocí vodného výluhu se všemi způsoby stanovení obsahu fosforu v rostlině. Tyto hypotézy ovšem nebyly potvrzeny.

Bylo potvrzeno, že výluh Mehlich 3 je vhodnou metodou pro stanovení obsahu fosforu v alkalických půdách. Dále bylo zjištěno, že poměr N/P není vhodnou charakteristikou pro hodnocení obsahu fosforu v rostlině, jelikož nelze vyjádřit hodnoty obsahu fosforu v půdě tak, aby poměr N/P nabýval ideálních hodnot. Dále bylo potvrzeno, že PNI index je vhodnou charakteristikou pro hodnocení obsahu fosforu v rostlině.

Klíčová slova: alkalické půdy, fosfor, hnojení fosforem, pšenice ozimá

Uptake of Phosphorus by Winter Wheat on Calcareous Soils

Summary

Winter wheat (*Triticum aestivum*) is the most grown crop of the Czech Republic. Its acreage exceeds 60 % of all arable land in the Czech Republic. It is a very significant crop grown in our country and it can be grown in almost all production areas. Phosphorus is one of the macro-nutrients. Most of it can be found in the grain. In crops it fulfills both the storage and structural functions. Further it is also a component in energy transfer (ATP). Phosphorus availability can be lower in calcareous soils. It is necessary not to underestimate the primary fertilization, because fertilization during the vegetation period is almost ineffective. It is necessary to supply organic matter into the soil too, because it increases phosphorus availability.

Soil samples and shoot samples were taken from on-farm trials in ten regions of the Czech Republic in ages 2015 - 2017 for this study. First soil sample was taken up to 30 cm deep and shoot samples were taken at the end of tillering (BBCH 31). Only shoot biomass was used from the second sample of winter wheat taken at the end of flowering (BBCH 69). Soil sample pH was 7 – 8,02.

It was expected that the strongest correlation will be between the soil phosphorus content determined using Olsen leachate and one of the plants phosphorus uptake indicators. Further it was expected that the water leachate will have a weak correlation with all methods of plant phosphorus uptake determination. These hypotheses were, however, not confirmed.

It was confirmed that Mehlich III leachate is an appropriate method for phosphorus content determination in calcareous soils. Further it was found that the N/P ratio is not an appropriate indicator for plant phosphorus uptake, because the soil content values cannot be expressed so that the N/P ratio reaches optimal values. Further it was confirmed that PNI index is a proper indicator for plant phosphorus uptake.

Keywords: calcareous soils, phosphorus, phosphorus fertilization, winter wheat

Obsah

1 Úvod	8
2 Cíl práce	9
2.1 Hypotézy	9
3 Literární rešerše	10
3.1 Pšenice ozimá	10
3.1.1 Botanická charakteristika.....	10
3.2 Fosfor v půdě	11
3.2.1 Anorganické sloučeniny fosforu	11
3.2.2 Organicky vázaný fosfor	12
3.3 Příjem fosforu rostlinou	12
3.4 Význam fosforu v rostlině	13
3.4.1 Nedostatek a nadbytek fosforu v rostlině	13
3.5 Hnojení fosforem	14
3.6 Fosforečná hnojiva	14
3.6.1 Hnojiva s lehce rozpustnými sloučeninami fosforu.....	15
3.6.2 Hnojiva se středně rozpustnými sloučeninami fosforu.....	16
3.6.3 Hnojiva s těžko rozpustnými sloučeninami fosforu	16
3.6.4 Organická (statková) hnojiva.....	16
3.7 Způsoby určování obsahu fosforu v půdě	17
3.7.1 Mehlich 3	17
3.7.2 Olsenova metoda.....	17
4 Metodika	18
5 Výsledky	20
5.1 Mehlich 3	20

5.2	Olsenova metoda	23
5.3	Vodný výluh.....	26
6	Diskuze	29
7	Závěr.....	33
8	Literatura.....	34

1 Úvod

Fosfor se řadí mezi makroprvky, jeho obsah v obilovinách se průměrně pohybuje okolo 0,3 % v sušině nadzemní biomasy. Vyskytuje se v důležitých sloučeninách, kterými jsou např. fytyl, ATP, nukleotidy atd. Odstranění nedostatků tohoto prvku je velmi problematické, jelikož je v půdě velmi málo pohyblivý a hnojení fosforem se tedy provádí před zakládáním porostu, mimokořenová aplikace není příliš účinná. Fosfor se v půdě vyskytuje ve formě sloučenin odvozených od kyseliny trihydrogenfosforečné (Balík et al. 2002). Rostliny přijímají fosfor z půdního roztoku za spotřeby energie. Problém s příjmem tohoto prvku může nastávat na alkalických půdách, jelikož se zvyšujícím se pH se rozpustnost fosforečnu vápenatých snižuje (Richter & Hlušek 1994).

V této práci byla hodnocena síla korelace mezi jednotlivými způsoby určování obsahu fosforu v rostlině a trojicí výluhů používaných pro stanovení obsahu fosforu v půdě. Z charakteristik popisujících obsah fosforu v rostlině byl použit poměr N/P, PNI index a procentuální obsah fosforu v sušině nadzemní biomasy pšenice ozimé. Poměr N/P a PNI index byly použity, jelikož na rozdíl od procentuálního obsahu fosforu v sušině zohledňují zředňující efekt v rostlině během vegetace. Ze způsobů stanovení obsahu v půdě byl použitý výluh Mehlich 3, který se běžně používá při AZPP. Dále výluh Olsen, který je podle Kunzové (2009) díky svému vyššímu pH vhodnější k použití na alkalických půdách. Jako další způsob stanovení obsahu fosforu v půdě byl použit vodný výluh.

Jako vzorky byly použity odběry půd a rostlinného materiálu z deseti okresů v České republice. Odebírání vzorků probíhalo dvakrát během vegetace. Při prvním odběru byl odebrán půdní vzorek do hloubky 30 cm a nadzemní biomasa pšenice ozimé na konci odnožování (BBCH 31). Z druhého odběru byla použita pouze nadzemní biomasa pšenice ozimé na konci kvetení (BBCH 69). Půdní reakce se pohybovala v rozmezí pH 7 až 8,02.

Předpokládalo se, že nejsilnější korelace bude mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným pomocí Olsenova výluhu s jednou z charakteristik vypovídajících o obsahu fosforu v rostlině. Dále bylo očekáváno, že ve slabé závislosti bude obsah fosforu v půdě stanovený pomocí vodného výluhu se všemi způsoby stanovení obsahu fosforu v rostlině. Tyto hypotézy ovšem nebyly potvrzeny.

2 Cíl práce

Cílem bakalářské práce bylo ověření a případná úprava kritérií hodnocení přijatelného obsahu fosforu na alkalických půdách při pěstování pšenice ozimé.

2.1 Hypotézy

- Výluh Mehlich 3 je spolehlivá metoda stanovení přijatelného fosforu v alkalické půdě
- Vodný výluh není spolehlivá metoda stanovení přijatelného fosforu v alkalické půdě
- Poměr N/P a index výživy rostlin (PNI) jsou vhodnými charakteristikami k hodnocení obsahu fosforu v rostlině

3 Literární rešerše

3.1 Pšenice ozimá

Pšenice může být využita v mnoha odvětvích a více méně všude na světě (Carver 2009). Je pěstována přibližně ve 100 zemích po celém světě. Lze ji pěstovat od Finska po Argentinu, ale nejvíce se pěstuje na severní polokouli mezi třicítkou a šedesátkou rovnoběžkou. Mezi nejvýznamnější oblasti pěstování patří Severní Amerika, Evropa, Asie a Severní Afrika. Dále v menším zastoupení Austrálie, Argentina, Brazílie a Jižní Afrika (Bushuk & Rasper 1994). V roce 2017 byly v České republice pěstovány ozimé obiloviny na asi 937 tisících hektarech. Z toho pšenice ozimá zaujímala necelých 770 tisíc hektarů, tj. cca 87 % (ČSÚ 2017). Průměrný výnos pšenice ozimé v roce 2017 byl v České republice 5,77 t/ha (ČSÚ 2018). Na našem území se pšenice ozimá pěstuje ve všech výrobních oblastech. Avšak jejich výběr významně působí na kvalitu a výši produkce. V kukuřičných a řepařských oblastech je především důležitý úhrn srážek za celou vegetaci, zatímco v ostatních oblastech jde o průběh teplot během vývoje a počasí při sklizni (Zimolka et al. 2005).

3.1.1 Botanická charakteristika

Pšenice setá (*Triticum aestivum*) se řadí do čeledi lipnicovitých (*Poaceae*). Jde o jednoletou travu s květenstvím ve formě lichoklasu. Klásky jsou 2-5 květé. Kromě některých kulturních forem nemají osiny (Novák & Skalický 2012). Obilky jsou válcovité, červenohnědé až hnědé a nahé, buclaté, na řezu oblé, na protilehlé straně od klíčku jsou obilky mírně ochmýřené. Plevy i pluchy jsou vejčité nebo podlouhle vejčité, se zřetelným kýlem. Pšenice má dvě formy, jarní a ozimou. Zatímco v dnešní době převažuje pěstování druhu *Triticum aestivum*, dříve se více pěstovaly i jiné druhy, jako např. pšenice jednozrnka (*T. monococcum*), pšenice dvouzrnka (*T. dicoccon*), pšenice shloučená (*T. compactum*), nebo pšenice naduřelá (*T. turgidum*). V teplejších oblastech se v ČR pěstuje i pšenice tvrdá (*T. durum*). Z genetického hlediska rozlišujeme tři skupiny pšenic. Diploidní pšenice, kde $2n = 14$, zahrnují pšenici planou jednozrnku (*T. boeoticum*). Dalším druhem v této skupině je pšenice kulturní jednozrnka. Větší význam v pěstování má skupina tetraploidních pšenic, kde $4n = 28$. Sem se řadí pšenice dvouzrnky, pšenice Timofejova (*T. timopheevi*), pšenice naduřelá, pšenice polská (*T. polonicum*) a pšenice tvrdá. Nejvýznamnější jsou pšenice hexaploidní, $2n = 42$. Sem patří pšenice špalda (*T. spelta*) a nejpěstovanější druh, pšenice setá (Zimolka et al. 2005).

3.2 Fosfor v půdě

Obsah půdního fosforu bývá zpravidla 0,02 – 0,08 %. Závisí ale na mnoha faktorech, jako jsou pH půdy, půdní druh, půdní typ, hnojení a další. Z hlediska vazeb se fosfor v půdě vyskytuje ve třech základních skupinách, v anorganických sloučeninách, organicky vázaný a výměně sorbovaný. Sloučeniny fosforu v půdě jsou odvozené od kyseliny trihydrogenfosforečné (H_3PO_4). Na rozdíl od jiných prvků jsou atomy fosforu vždy v oxidovaném stavu, z čehož vyplývá, že v půdě dále nepodléhají redukci nebo oxidaci (Balík et al. 2002). Fosfor v půdě je velmi málo pohyblivý, i po dlouhodobém hnojení je průnik fosforu do hlubších horizontů velmi malý. Posun fosforečných sloučenin do hlubších vrstev může pozitivně ovlivnit vyšší obsah organické hmoty v půdě, činnost kořenů, nebo nižší hodnota pH. Při fosforečném hnojení aplikovaném na povrch půdy a simulaci 30 mm srážek, nedojde k proplavení těchto živin do hlubších vrstev. Proto je toto hnojení více méně neúčinné a je dobré tato hnojiva zapravit do půdy před založením porostu (Vaněk et al. 2016).

3.2.1 Anorganické sloučeniny fosforu

Obsah anorganického fosforu v černozemích a na spraších do hloubky 1 m je 3000–3500 kg/ha (Balík et al. 2002). Jeho nejvýznamnějším zdrojem bývá primární minerál apatit. Ten se vyskytuje ve všech horninách v různých formách (Richter & Hlušek 1994). Apatit je ale v alkalických půdách velmi stabilní a k jeho rozkladu dochází až když je $\text{pH} < 7$. Obecně platí, že čím vyšší je hodnota pH, tím nižší je rozpustnost fosforečnanů vápenatých (Richter & Hlušek 1994). Rostliny fosfor přijímají z půdního roztoku, proto je jeho rozpustnost ve výživě velmi důležitá. Pokud je fosfor z půdního roztoku vyčerpán, dojde k narušení rovnovážného stavu a část labilního fosforu se uvolní zpět do roztoku. K tomuto obnovení může dojít 50–250krát denně (Mikanová & Šimon 2011). Koncentrace PO_4^{3-} vzrůstá s klesající hodnotou OH^- a Ca^{2+} . Zároveň platí, že čím vyšší je hodnota pH půdy a koncentrace vápníku v půdním roztoku, tím jednodušeji se z přístupných forem fosforu stávají formy nepřístupné. Samozřejmě, že i další primární minerály mohou být zdrojem fosforu, jedná se o fosforečnany železa (tripity), vodnaté fosforečnany hliníku (wawelity) a v malé míře fosforečnany železnaté (vivianity). Kromě primárních minerálů můžou být zdrojem fosforu i tzv. minerály sekundární, které v půdě vznikly z těch primárních, zejména důsledkem zvětrávání a chemických reakcí (Richter & Hlušek 1994). V alkalických půdách je nejčastěji fosfor vázán ve formě hydrogenfosforečnanu vápenatého (CaHPO_4), oktokalciumfosfátu ($\text{Ca}_4(\text{HPO}_4)_3$) a

hydroxylapatitu ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$). Pro rostliny je v příjmu důležitá rozpustnost těchto zdrojů. Nejrozpuštěnější je hydrogenfosforečnan vápenatý, poté oktokalciumfosfát a nakonec hydroxylapatit (Balík et al. 2002).

3.2.2 Organicky vázaný fosfor

Podíl takto vázaného fosforu je cca 30-50 % z celkového obsahu fosforu v půdě. Rostliny nejsou schopny přijímat organicky vázaný fosfor. Proto společně s mikroorganismy a houbami produkují enzymy – fytasy, které vázaný fosfor přemění na formu minerální, a tedy přijatelnou pro rostliny (Balík et al. 2002). Nejvíce organicky vázaného fosforu v půdě lze najít ve fytinech – až 50 %, ty se ale v půdě přeměňují velice pomalu. Dále se 5-10 % nachází v nukleových kyselinách a méně než 2 % potom tvoří jiné sloučeniny – fosfolipidy, fosfoproteiny nebo fosfocukry, u kterých přeměna probíhá rychleji (Kolář & Kužel 2002). Velký podíl fosforu v půdě je vázán na ionty hliníku a železa, které dále vytváří komplexy s huminovými kyselinami a fulvokyselinami. Z toho také vyplývá, že mezi obsahem organických látek v půdě a organicky vázaným fosforem je jistá závislost daná biologickou aktivitou půd. Tuto teorii také podporuje fakt, že rostliny brzy na jaře mohou vykazovat změny v důsledku nedostatku fosforu. Po oteplení, kdy stoupne biologická aktivita v půdě, tyto symptomy odezní bez nutnosti hnojení (Balík et al. 2002).

3.3 Příjem fosforu rostlinou

Rostlina přijímá fosfor v aniontové formě kyseliny trihydrogenfosforečné, hlavně H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} . Jak již bylo zmíněno, rostlina přijímá fosfor z půdního roztoku, a to při velmi nízkých koncentracích. Přijímání je aktivní proces vyžadující spotřebu energie. Při výskytu nízkých teplot může dojít k nedostatku této energie, tím pádem lze na rostlině pozorovat známky nedostatku fosforu. Tento problém je ovšem dočasný a odezní se zvyšujícími se teplotami (Vaněk et al. 2016). Ke kořenům se tento prvek dostává difúzí. Labilní fosfor, který je od kořene rostliny dále než 3 mm, se na její výživě prakticky nepodílí. Potřeba fosforu a odběr rostlinou se v průběhu vegetační doby liší. Závisí na stáří rostliny a funkci orgánů. Největší odběr je během kvetení a zrání. Až polovina přijatého fosforu se hromadí v semenech. Rozhodujícím faktorem pro příjem fosforu je kořenový systém. Nejde o délku, jako o průměr kořene a kořenové vlášení, dále o koncentraci fosforu v půdním roztoku v zóně prokořenění. Do půdy se tento prvek dodává minerálními hnojivy, hnojem, rostlinnými zbytky. Většina takto dodaného fosforu (až 90 %) se ovšem přemění na formy nepřístupné, nebo rostlinám

málo přístupné. Rostliny si pomáhají v příjmu produkcí kořenových exudátů. Důležité je brát ohledy na stav půd, popřípadě osevnický postup. Na kyselých půdách je nutné vápnění, na alkalických se naopak tato operace vynechává. Příjem fosforu a jeho obsah v půdním roztoku lze také ovlivnit osevnickým postupem. Řepka olejná (*Brassica napus var. napus*) produkuje kyselější a agresivnější exudáty, které pomáhají uvolňování fosforu do půdního roztoku (Mikanová & Šimon 2011). Rostliny také bojují s nedostatkem fosforu zvýšením obsahu solí organických kyselin v kořenových exudátech. Toto zvýšení vede k lepší mobilizaci fosforu v půdě (Balík et al. 2008). Dalšími zlepšujícími plodinami v tomto ohledu jsou jeteloviny, speciálně vojtěška setá (*Medicago sativa*), která svými bohatými kořeny čerpá živiny i z hlubších vrstev půdy. Dále zanechává veliké množství kořenových zbytků, a dodává tak do půdy organický fosfor s dalšími živinami (Mikanová & Šimon 2011).

3.4 Význam fosforu v rostlině

Fosfor se řadí mezi makroprvky – makroelementy (Hammond et al. 2004). Fosfor ovlivňuje tvorbu buněčných membrán (fosfolipidy). V některých studiích se dokonce uvádí vztah mezi odolností rostlin vůči abiotickým stresům a obsahem fosfolipidů v pletivech (Černý et al. 2014). Jednou z významných složek rostliny obsahujících fosfor jsou nukleotidy. Vyskytují se v nukleových kyselinách, kde plní roli stavebních jednotek. Dále se účastní řady chemických reakcí, např. syntézy bílkovin. Jsou dále součástí některých enzymů a přenašečů energie – především ATP (adenosintrifosfát). Další velice významnou sloučeninou obsahující fosfor je fytin. Jde o sůl kyseliny fytové, která se tvoří a hromadí v semenech. U obilnin se obsah fytinu v semenech pohybuje okolo jednoho procenta. Jde o zásobní sloučeninu, která slouží jako zdroj fosforu a hořčíku pro klíčící a mladé rostliny. Fytin se také dostává zpět do půdy, a to převážně ve formě rostlinných zbytků a organických hnojiv (Vaněk et al. 2016). Fosfor dále urychluje vývoj, plodnost a dozrávání plodin. Pozitivní účinek má také na odolnost vůči nízkým teplotám. Jelikož podporuje tvorbu kořenů, je důležitý i pro příjem ostatních živin a vláhy do rostlin (Baier & Baierová 1985).

3.4.1 Nedostatek a nadbytek fosforu v rostlině

Nedostatek fosforu v rostlině z počátku nemá žádné konkrétní viditelné příznaky, avšak nedochází ke všem potřebným reakcím v rostlině. V pozdějších fázích a při výrazném deficitu může dojít k omezení růstu kořenů (Vaněk et al. 2016). Nedostatek tohoto makroelementu také často vede k omezení odnožování, tím pádem k menšímu počtu klasů na jednotku plochy

(Rodríguez et al. 1999). Deficience fosforu také způsobuje pomalejší přechod mezi jednotlivými fázemi vývoje a oddálení kvetení (Černý et al. 2014). Rostliny jsou menší s užšími listy. Paty stébel mohou mít načervenalé až nafialovělé zbarvení, tento příznak ale bývá často způsobený chladnějším průběhem počasí, nedostatečná mikrobiální aktivita vede ke zdánlivému nedostatku fosforu, který s oteplením odezní. Zamezení deficitu fosforu během vegetace není jednoduché. Nejúčinnější metodou je buď mimokořenové hnojení, nebo pokud je důvodem nedostatku fosforu sucho, tak zavlažování. Jelikož je v našich podmínkách fosfor dobře sorbován půdou, k jeho nadbytku v rostlinách nedochází (Vaněk et al. 2016).

3.5 Hnojení fosforem

Větší část fosforu v rostlině je obsažena v semenech. Proto hnojení závisí na výnosu na daném pozemku, tedy na množství P odčerpaném z pozemku sklizní, přičemž pšenice ozimá potřebuje na 1 t zrna cca 4,4-6,2 kg čistého fosforu (Vaněk et al. 2016). U všech plodin závisí hnojení jednotlivými prvky na stavu půdních zásob, pH půdy, vlhkostních poměrech atd. Dále potřeba hnojení vyplývá z agrochemických rozborů půdy (AZZP) nebo z rozborů rostlin. Fosfor se do půd dodává jak v minerální, tak v organické formě. Aplikace těchto hnojiv probíhá u pšenice ozimé před zpracováním půdy. Látky se tedy zapraví orbou, nebo podmítkou (Faměra 1993).

3.6 Fosforečná hnojiva

Fosforečná hnojiva obsahují fosfor buď v přístupné formě, nebo ho poskytnou až při svém rozkladu. Hlavní surovinou pro jejich výrobu bývají zpravidla surové fosfáty z přírodních nalezišť a nerosty obsahující fosfor. Fosfáty se dělí na apatity (vykrytalizované minerály) a fosfority (amorfní sedimenty). Mezi nejvýznamnější fosforitové oblasti se řadí Tunisko, Maroko a Alžírsko. Obsah fosforu v těchto fosfátech obvykle kolísá mezi 12,5 až 15,5 %. Jinými surovinami pro výrobu fosforečných hnojiv mohou být železné rudy. Při tavení se z nich fosfor musí odstranit a vzniká tak Thomasova struska, jejímž mletím vzniká hnojivo Thomasova moučka. Surové fosfáty se kvůli zpřístupnění fosforu dále upravují, a to buď mechanicky, termicky, nebo chemicky. Mechanickým zpracováním je zejména jemné mletí. Termickým způsobem se rozumí tavení surových zdrojů s přísadami a vznikají tak termofosfáty. Chemických způsobů úpravy fosfátů je několik. Leptáním surových fosfátů kyselinou sírovou (H_2SO_4) vzniká jednoduchý superfosfát. Pokud se místo kyseliny sírové použije kyselina trihydrogenfosforečná (H_3PO_4), jedná se o trojitý superfosfát. Reakcí

s kyselinou dusičnou (HNO_3) vzniká nitrofosfát. Působením kyseliny chlorovodíkové (HCl) se získává dikalciumfosfát. Přístupnost fosforu v hnojivech je limitována rozpustností obsaženého fosforu. Podle této schopnosti se dělí sloučeniny na hnojiva obsahující fosfor ve formách vodorozpustných (superfosfáty), formách rozpustných v citranu amonném (dikalciumfosfát, termofosfáty), ve formách rozpustných ve 2% kyselině mravenčí, rozpustných v 2% kyselině citronové (Thomasova moučka) a rozpustných jen v koncentrované anorganické kyselině (používá se ke stanovení celkového obsahu fosforu). Fosforečná hnojiva mají také většinou pozitivní a nedoceněné vedlejší účinky. Mezi ně patří přívod dalších živin (S, Ca, Mg, Mn, atd.), přívod látek zlepšujících půdní strukturu (vápník, sádra), ovlivnění půdní reakce (pozitivně i negativně) (Baier & Baierová 1985). Kromě příznivých vedlejších účinků mohou mít ale i negativní dopady. Jedním z nich je například dodávání těžkých kovů do půd. Těžké kovy jsou ve fosforečných hnojivech obsaženy většinou v malém množství jako nečistoty. Jedná se především o chrom, kadmium, měď a olovo. Zatím co v mletých fosfátech se nejčastěji ze jmenovaných kovů objevuje kadmium, v superfosfátu jde hlavně o měď a olovo. Tyto negativní vlivy fosforečného hnojení by se neměly opomíjet, jelikož se díky nim dostávají těžké kovy nejen do půdy, ale později by se mohly dostat i do potravin. Zatím jde ale pouze o stopová množství (López Carnelo et al. 1997). Využití fosforu rostlinami je velmi malé. V roce hnojení využijí rostliny pouze 10–20 % obsaženého fosforu, navíc obilniny využívají tento fosfor ještě méně než např. okopaniny. K využití těchto hnojiv přispívají i další faktory, např. úprava půdní reakce, obohacování půdy organickými látkami atp. (Baier & Baierová 1985).

3.6.1 Hnojiva s lehce rozpustnými sloučeninami fosforu

Převážný podíl přítomného fosforu je ve vodorozpustné formě. Působení těchto hnojiv bývá rychlejší, ale na alkalických půdách se mohou tvořit těžko dostupné apatity. Práškovitý superfosfát je šedý kyprý prášek s nakyslým zápachem a snadno hrudkovatí. Vyrábí se z apatitů, fosforitů, nebo směsí obou druhů. Granulovaný superfosfát tvoří šedé granulky, ze kterých minimálně 90 % má velikost 1-4 mm. Vyrábí se neutralizací a granulací práškového superfosfátu. Superfosfáty obsahují 7,3-8,6 % fosforu, v menší míře obsahují také mikroelementy. Trojitý superfosfát se vyrábí pouze v granulované formě. Zbarvení má šedé až světle šedé a opět ho doprovází charakteristický zápach. Obsahuje 21 % P, z toho je 85 % ve vodorozpustné formě.

3.6.2 Hnojiva se středně rozpustnými sloučeninami fosforu

V našem sortimentu je zastoupení těchto hnojiv velmi malé. Jde jen o Thomasovu moučku a dikalciumfosfát (nepoužívá se k přímému hnojení) a termofosfáty. Tato hnojiva nejsou rozpustná ve vodě, a proto musí být fosfor v půdě nejdříve převeden do přístupné formy (činností kyselin, kořenových exudátů, mikroorganismů). Thomasova moučka se dodává jako těžký, jemně mletý prášek. Je světle až tmavě šedá, popřípadě tmavě hnědá. Obsahuje okolo 7 % P, z toho 80 % je rozpustného ve 2% kyselině citronové. Termofosfáty se vyrábějí rozkladem fosfátů při vysokých teplotách (900-1500 °C).

3.6.3 Hnojiva s těžko rozpustnými sloučeninami fosforu

Přítomný fosfor je ve formě apatitů a pro rostliny je bez rozrušení vazeb nedostupný. Proto se ke hnojení používají mleté surové fosfáty. Podle jejich rozpustnosti v kyselině je řadíme do skupin s vysokým podílem fosforu rozpustného v kyselině mravenčí, se středním podílem rozpustného fosforu a s nízkým podílem rozpustného fosforu. Do této skupiny hnojiv se řadí hyperfosfát. Jde o šedý nebo šedohnědý prášek bez zápachu. Je velmi sypký a velmi prašný. Granulovaná forma tohoto hnojiva je označována jako hyperkorn. Obsahuje do 13 % fosforu, hyperkorn 12,3 % (Baier & Baierová 1985).

3.6.4 Organická (statková) hnojiva

Jsou většinou produkována přímo v zemědělském podniku. Jelikož v České republice stavy zvířat značně poklesly, je produkce organických hnojiv nedostačující a podniky bes živočišné výroby nemají možnost je získat. Obsah živin v organických hnojivech záleží především na druhu zvířat, jejich krmení a ošetřování, a živinném režimu půd dané oblasti. Působení statkových hnojiv je většinou pozvolné a dlouhodobé. Kromě dodávání živin do půdy ji také obohacují o velké množství organických látek, což výrazně přispívá k udržení či zvýšení půdní úrodnosti. Nejvíce fosforu ze statkových hnojiv obsahuje drůbeží kejda – 0,28 %. Kejda od jiných hospodářských ho obsahuje výrazně méně (od prasat – 0,13 %, od skotu 0,07 %). Co se týče obsahu fosforu v hnoji, je na tom nejlépe ten od skotu chovaného na huboké podestýlce – 0,15 %. Dále 0,14 % fosforu obsahuje ovčí hnůj v čerstvém stavu, 0,13 % koňský a 0,11 % hovězí. V močůvce hospodářských zvířat není fosfor obsažen vůbec. Dále se nesmí opomenout kompost, v jehož sušině při obsahu vody do 50 % lze najít 0,7 % fosforu (Vaněk et al. 2016).

3.7 Způsoby určování obsahu fosforu v půdě

3.7.1 Mehlich 3

Způsob testování půd na obsah dostupného fosforu je velkým tématem (Maguire & Sims 2002). Tato metoda byla vynalezena v roce 1984. Neomezuje se pouze na extrakci fosforu, ale i dalších prvků, jako jsou draslík, vápník, hořčík a sodík. Roztok Mehlich 3 je složen z 0,2 M kyseliny octové (CH_3COOH), 0,25 M dusičnanu amonného (NH_4NO_3), 0,015 M fluoridu amonného (NH_4F), 0,013 M kyseliny dusičné (HNO_3) a 0,001 M kyseliny ethylendiamintetraoctové (EDTA). Fosfor je v tomto roztoku extrahován pomocí kyseliny octové a fluoridu amonného. Draslík, vápník, sodík a hořčík jsou extrahovány působením ducičnanu amonného a kyseliny dusičné. EDTA a NH_4^+ pomáhají extrahovat další mikroprvky, Cu, Zn, Mn a Fe (Sen Tran & R. Simard 1993).

3.7.2 Olsenova metoda

Olsenova metoda byla vynalezena roku 1954. Je vhodnější pro alkalické půdy, zejména pro ty s pH 7,2 a vyšším. Mehlich 3 je méně vhodný, jelikož používá extrakční činidlo s pH 2,5 s téměř nulovou pufrací schopností proti změně pH. Tím pádem je značně snížena efektivita vyluhování (Kunzová 2009). V Olsenově metodě se používá HCO_3^- , CO_3^{2-} a OH^- s hodnotou pH 8,5. Dále 0,5 mol/l roztok hydrogenuhličitanu sodného (NaHCO_3), který slouží ke snížení koncentrace iontů Ca^{2+} vysrážením na nerozpustnou formu uhličitanu vápenatého (CaCO_3). Dále snižuje koncentraci železitých a hlinitých kationtů vytvořením oxyhydroxydů. Tím pádem se zvýší rozpustnost fosforu v půdním vzorku. Optimální hodnota fosforu podle Olsena je 10 mg P/kg. Je nižší než kritické hodnoty používané u Mehlicha 3, jelikož činidla v Olsenově metodě nevyluhují tolik fosforu z většiny půd, jako kyselá činidla v roztoku Mehlich 3 (Sims 2000).

4 Metodika

Odběr půdních a rostlinných vzorků pšenice ozimé byl prováděn v letech 2015 až 2017 z polních provozů nacházejících se v okresech Mělník, Rokycany, Nymburk, Litoměřice, Žatec, Hradec Králové, Přerov, Ústí nad Orlicí, Rakovník, Mladá Boleslav a Znojmo. Jednalo se o regiony s mírně teplými až velmi teplými klimatickými podmínkami. Přesná poloha odběrových míst byla zaměřena navigací GPS. Vzorky půd použité pro tuto práci měly hodnoty pH v rozmezí 7,0 až 8,02.

Pro vyhodnocení výsledků bylo využito odběrů nadzemní biomasy na začátku sloupkování ozimé pšenice (BBCH 31) a na konci květu (BBCH 69). Vzorky půdy byly odebírány do hloubky 30 cm. Obsah živin v orniční vrstvě půdy byl stanoven ve výluhu Mehlich 3 (Mehlich 1984) a ve vodném výluhu při vyluhovacím poměru vždy 1:10 w/v. Obsah přijatelného fosforu byl dále stanoven ve výluhu Olsen (Olsen et al. 1954). Odlišná byla doba třepání půdních výluhů: 10 minut v případě činidla Mehlich 3 (Zbíral 2000), 60 minut pro vodný výluh (Kowalenko 2008) a výluh Olsen (Olsen et al. 1954). Rostlinná nadzemní biomasa byla zmineralizována metodou suchého rozkladu (Mader & Čurdová 1997), pro stanovení celkového obsahu dusíku v rostlinné biomase byl použit rozklad na mokré cestě v prostředí kyseliny sírové (1:20 w/v) katalyzovaný prážkovým selenem. Měření bylo provedeno optickou emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem na přístroji ICP-OES Agilent 720 (Agilent Technologies, USA). Celkový obsah dusíku v nadzemní biomase ozimé pšenice byl stanoven metodou podle Kjeldahla na přístroji Vapodest 50s (Gerhardt, Spoková republika Německo).

Obsah fosforu ve výluhu Olsen byl stanoven v celkovém objemu 25 ml vodného roztoku: objem vzorku byl 2,5 ml, k němu byl přidán 1 ml molybdenového činidla (roztok molybdenanu amonného a zředěné kyseliny sírové) a redukční činidla: 1 ml roztoku chloridu cínatého v koncentrované kyselině chlorovodíkové a 2,5 ml síranu hydrazinu. Stanovení bylo provedeno na přístroji Lambda 25 (Perkin Elmer, USA) při vlnové délce 660 nm.

Výživný stav rostlin byl vyjádřen hmotnostním poměrem obsahů N/P v nadzemní biomase pšenice ozimé (Yan et al. 2015) a indexem výživy rostlin fosforem (PNI). PNI byl vyjádřen jako poměr naměřeného obsahu fosforu v nadzemní biomase a kritického obsahu fosforu v nadzemní biomase vypočítaného dle Belanger et al. (2015) rovnicí:

$$P_c = -0,677 + 0,221N - 0,00292N^2$$

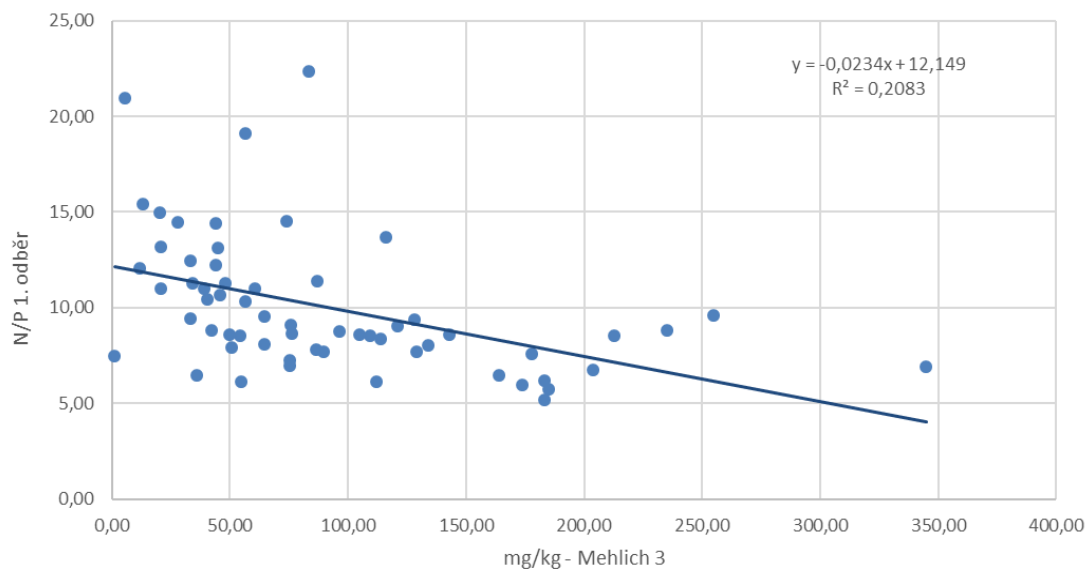
Kde obsah fosforu i dusíku (N) je dosazen v g/kg suché hmoty. Hodnoty PNI vyšší než 1,0 indikují nadbytečný příjem fosforu, naopak hodnoty nižší než 1,0 jsou projevem nedostatečného příjmu fosforu (Belanger et al. 2015).

Rostlinný materiál určený k analýzám byl homogenizován laboratorním střížným mlýnem SM100 (Retsch, Spolková republika Německo). Výsledky byly vyhodnocovány pomocí regresních rovnic v programu Microsoft Office Excel.

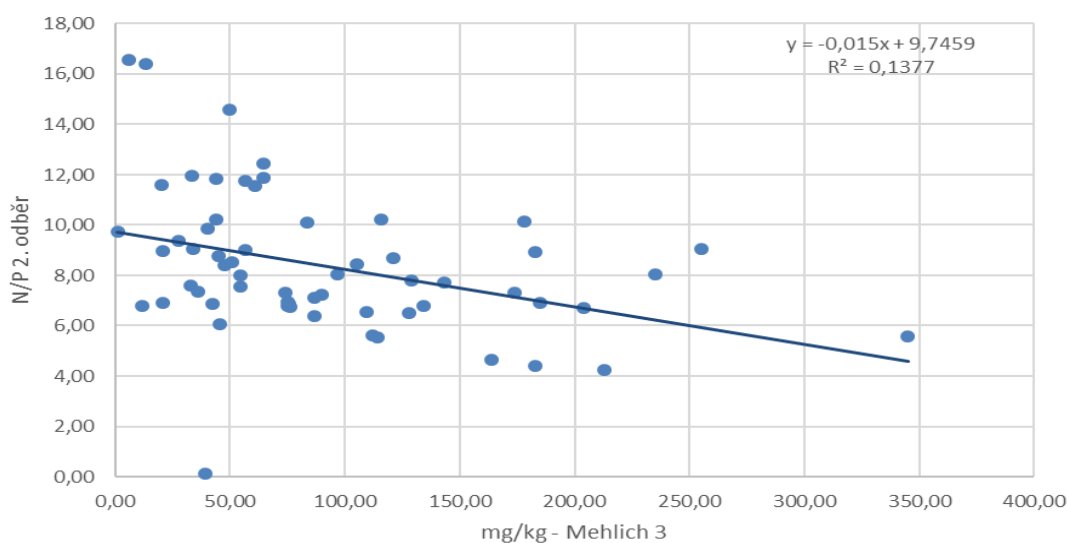
5 Výsledky

5.1 Mehlich 3

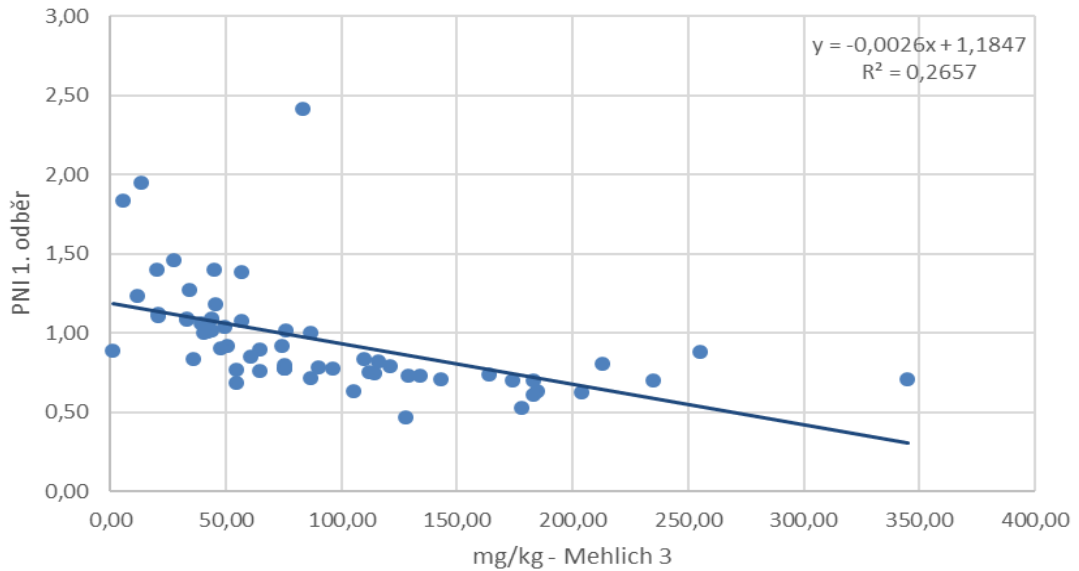
Graf č. 1. Vztah mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným ve výluhu Mehlich 3 a poměrem N/P v nadzemní biomase ozimé pšenice při prvním odběru. Korelace je negativní a korelační koeficient je $r = -0,46$, což představuje střední sílu.



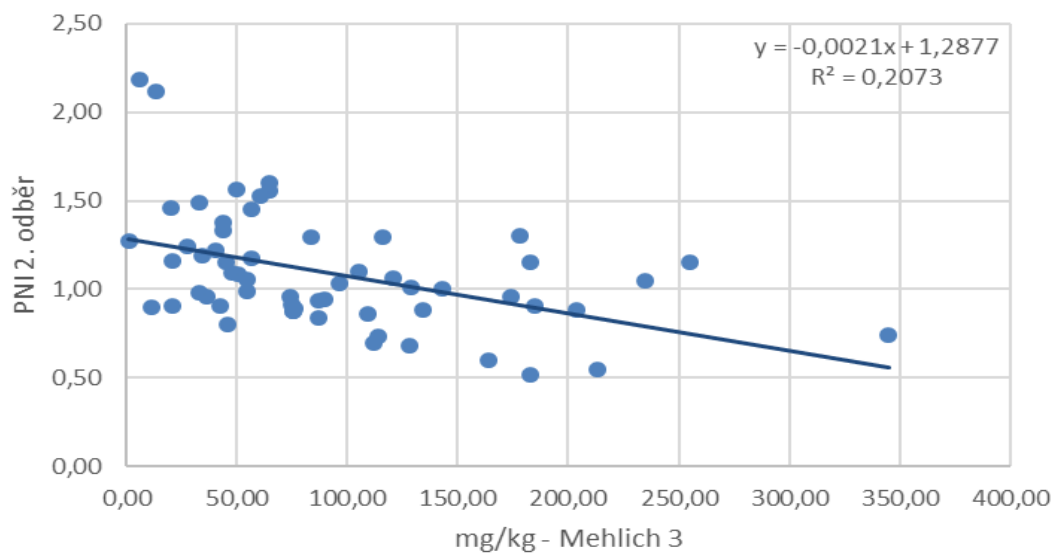
Graf č. 2. Vztah mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným ve výluhu Mehlich 3 a poměrem N/P v nadzemní biomase ozimé pšenice při druhém odběru. Korelační koeficient je $r = -0,37$ a představuje slabou sílu.



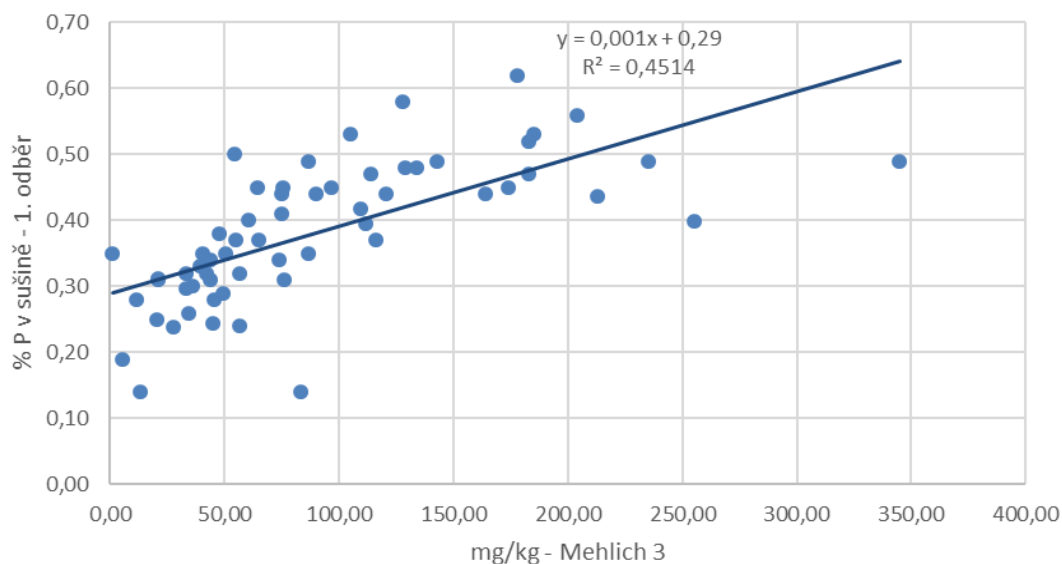
Graf č. 3. Negativní korelace mezi obsahem fosforu stanoveným výluhem Mehlich 3 a PNI indexem v nadzemní biomase ozimé pšenice při prvním odběru. Síla korelace je podle korelačního koeficientu $r = -0,52$ střední.



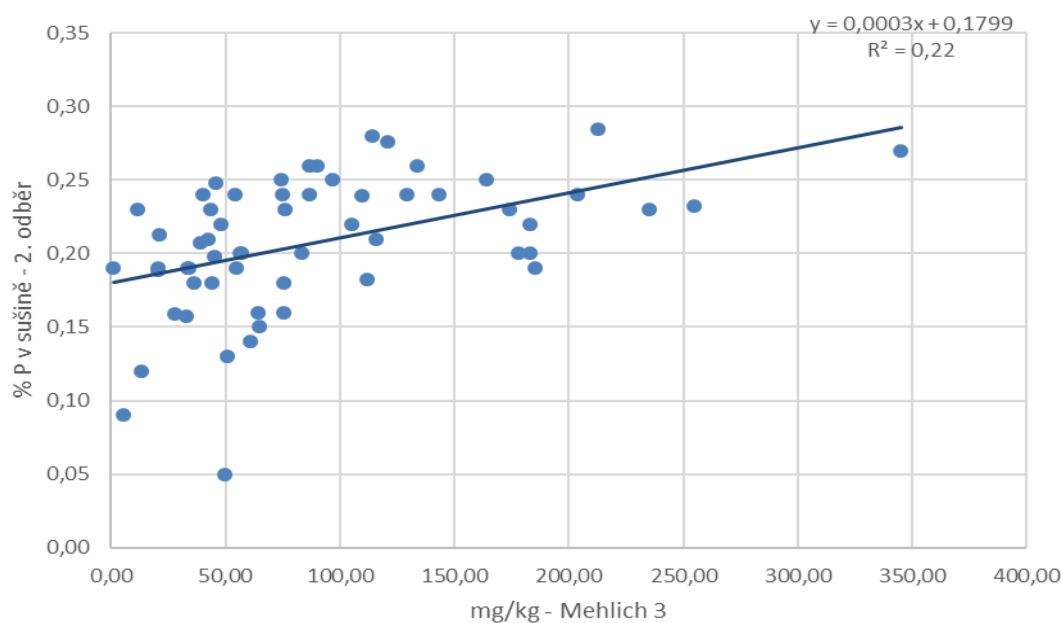
Graf č. 4. Negativní korelace mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným ve výluhu Mehlich 3 a PNI indexem v nadzemní biomase ozimé pšenice při druhém odběru. Korelační koeficient je $r = -0,46$ a síla korelace je tedy střední.



Graf č. 5. Pozitivní korelace mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným ve výluhu Mehlich 3 a obsahem fosforu v sušíně nadzemní biomasy rostlin ozimé pšenice při prvním odběru. Korelační koeficient je $r = 0,67$, tedy jde o silnou korelaci.

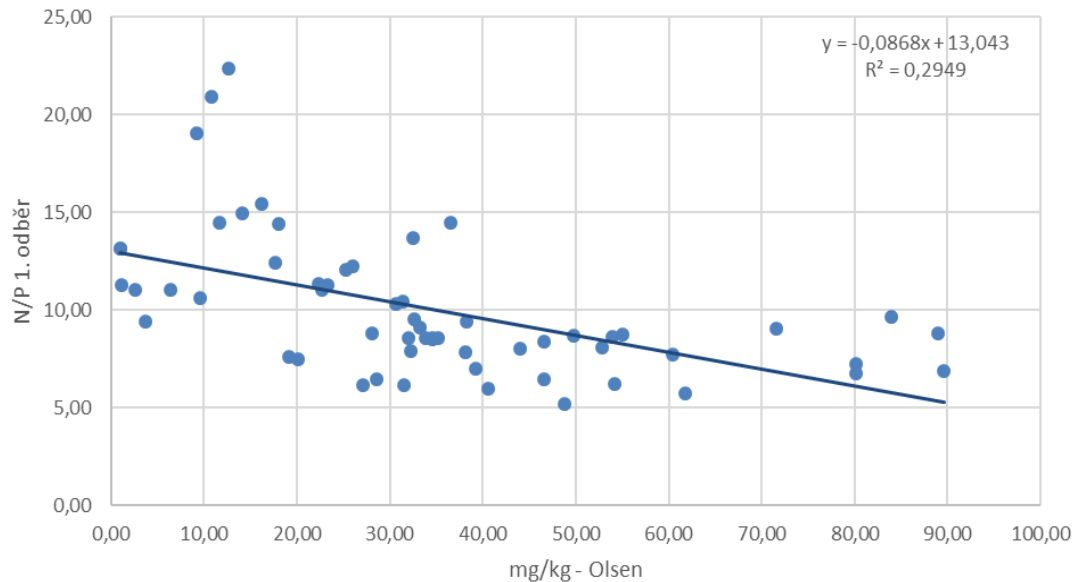


Graf č. 6. Pozitivní korelace mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným ve výluhu Mehlich 3 a obsahem fosforu v sušíně nadzemní biomasy rostlin ozimé pšenice při druhém odběru. Síla korelace je střední, jelikož korelační koeficient je $r = 0,47$.

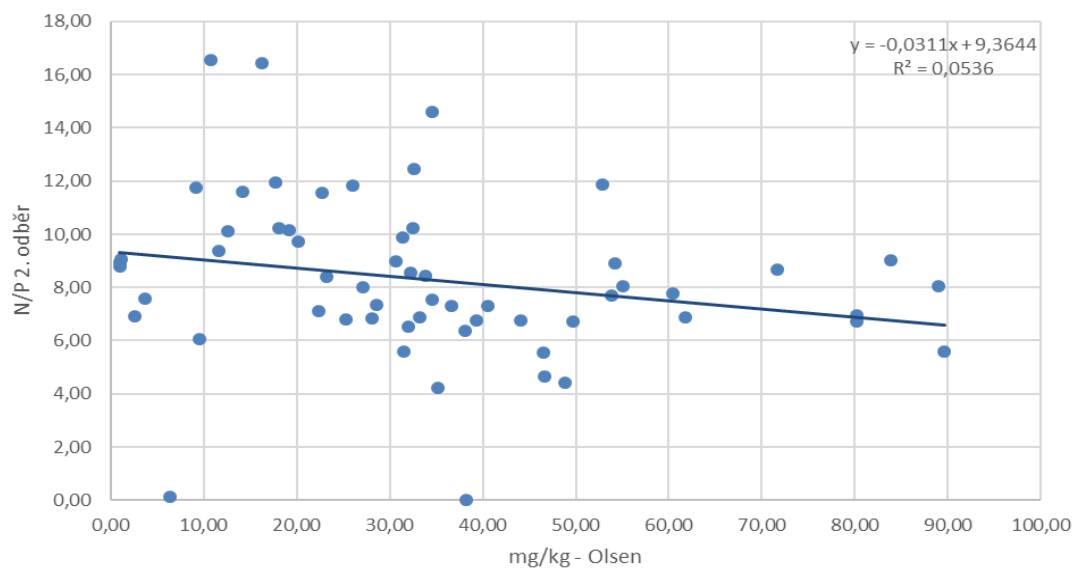


5.2 Olsenova metoda

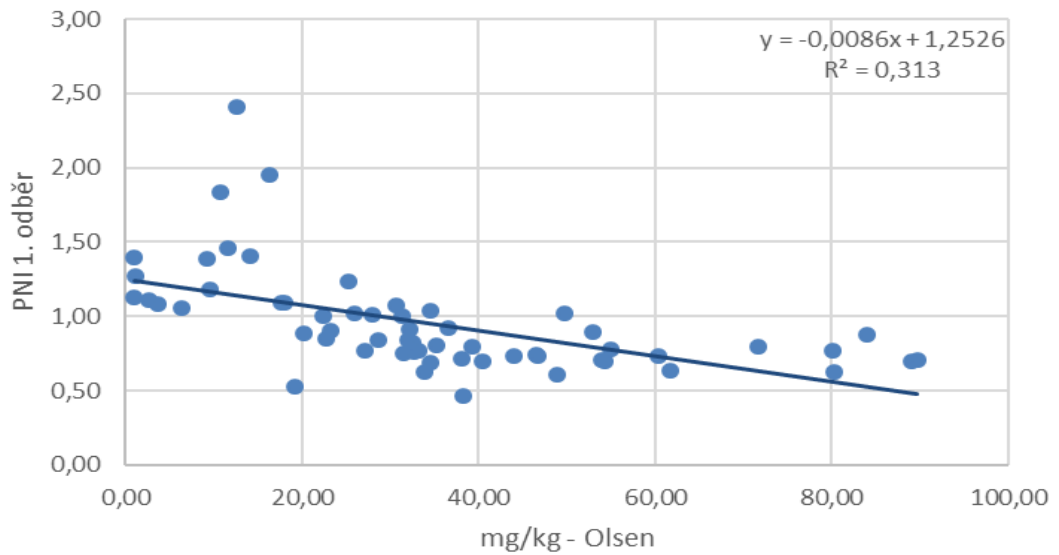
Graf č. 7. Negativní korelace mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným Olsenovou metodou a poměrem N/P v nadzemní biomase ozimé pšenice při prvním odběru. Podle korelačního koeficientu $r = -0,54$ jde o střední sílu korelace.



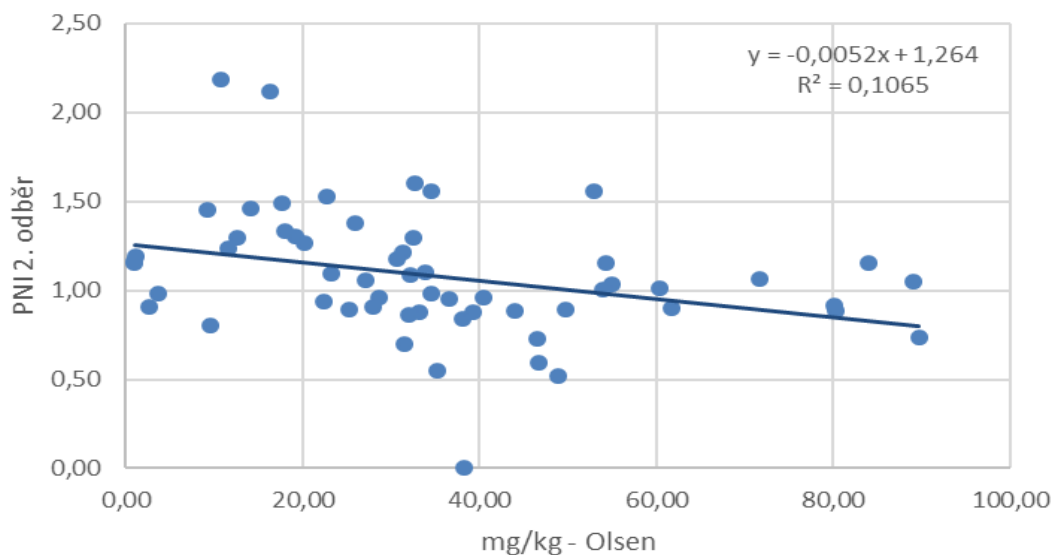
Graf č. 8. Negativní korelace mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným Olsenovou metodou a poměrem N/P v nadzemní biomase ozimé pšenice při druhém odběru. Síla korelace je slabá, protože korelační koeficient je $r = -0,23$.



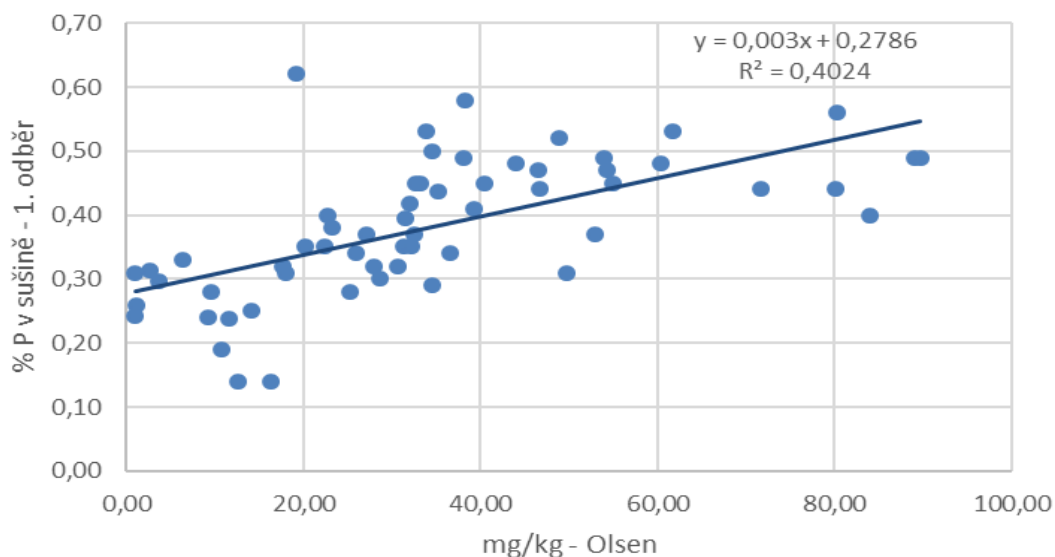
Graf č. 9. Negativní korelace mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným Olsenovou metodou a PNI indexem v nadzemní biomase ozimé pšenice při prvním odběru. Korelace je střední, korelační koeficient má hodnotu $r = -0,56$.



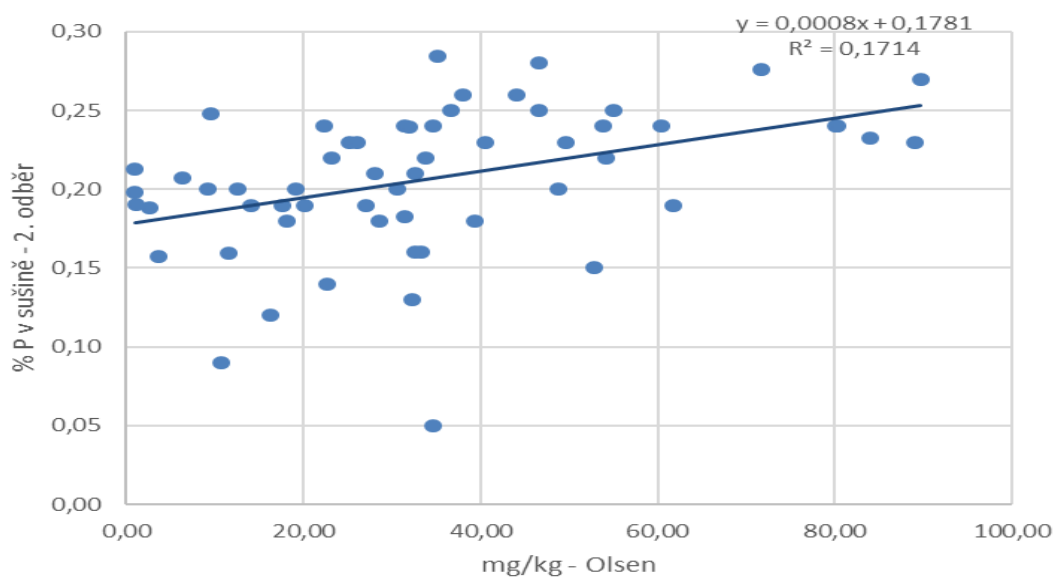
Graf č. 10. Negativní korelace mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným Olsenovou metodou a PNI indexem v nadzemní biomase ozimé pšenice při druhém odběru. Síla korelace je slabá, korelační koeficient je $r = -0,33$.



Graf č. 11. Pozitivní korelace mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným Olsenovou metodou a obsahem fosforu v sušíně nadzemní biomasy ozimé pšenice při prvním odběru. Korelace je silná, jelikož koeficient korelace je $r = 0,63$.

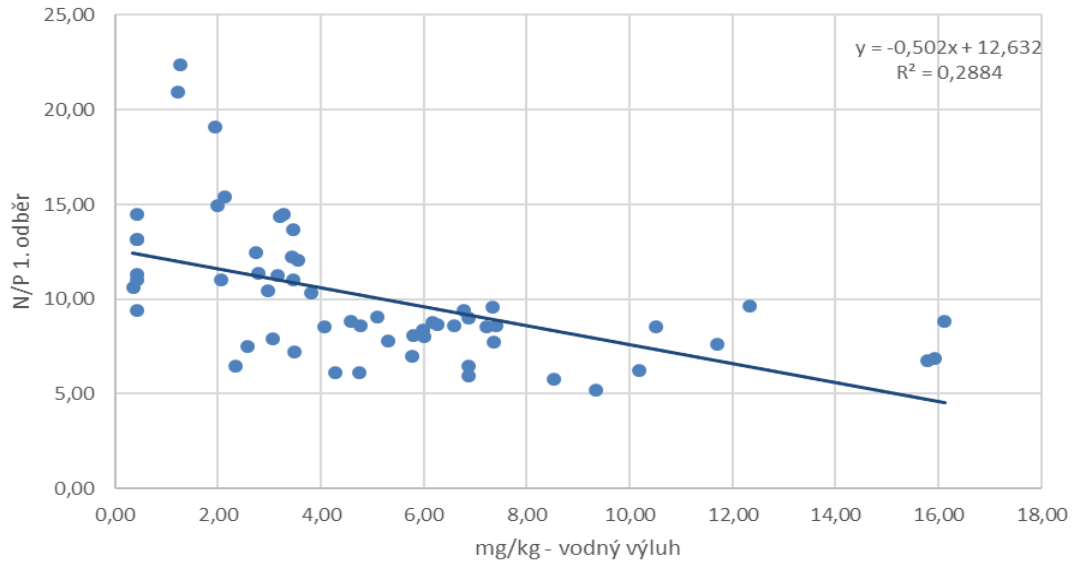


Graf č. 12. Pozitivní korelace mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným Olsenovou metodou a obsahem fosforu v sušíně nadzemní biomasy ozimé pšenice při druhém odběru. Síla korelace je střední, koeficient korelace je $r = 0,41$.

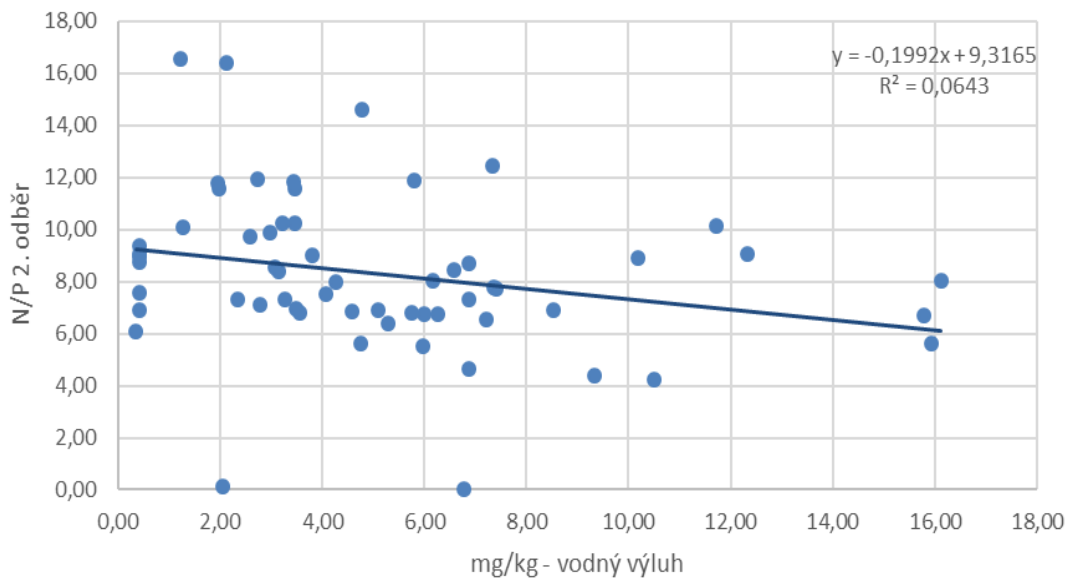


5.3 Vodný výluh

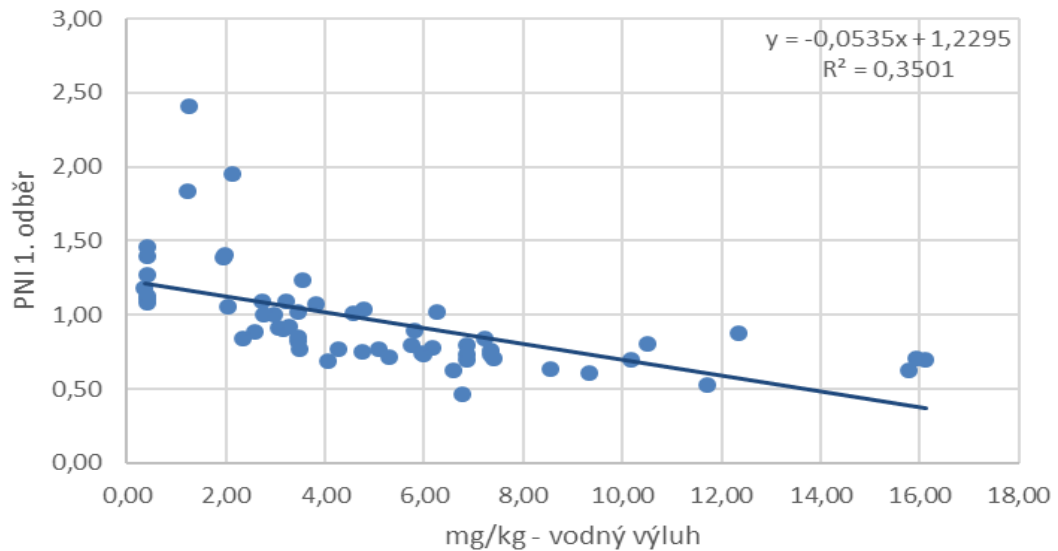
Graf č. 13. Korelace mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným vodným výluhem a poměrem N/P v nadzemní biomase ozimé pšenice při prvním odběru. Jde o střední sílu korelace, $r = -0,54$.



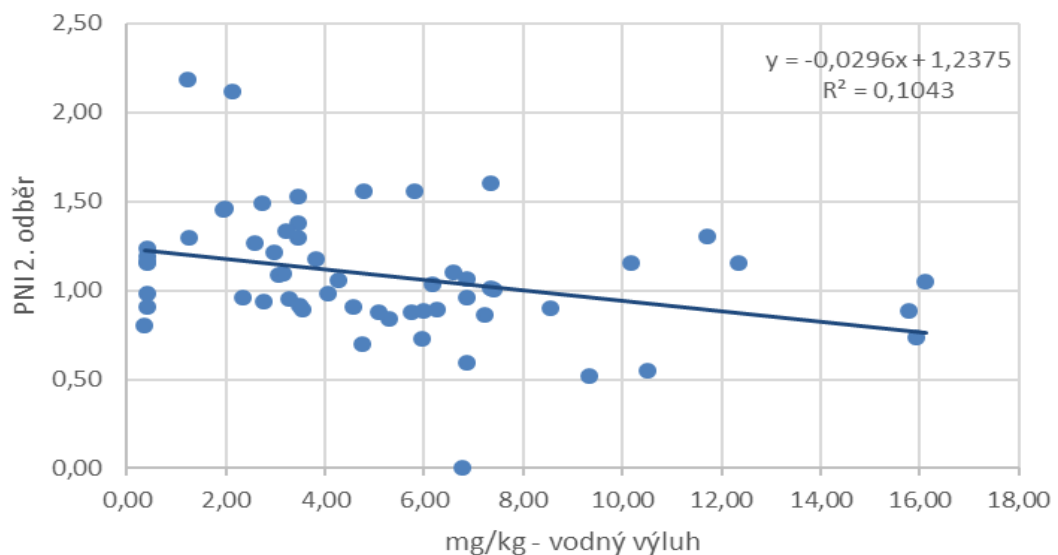
Graf č. 14. Slabá negativní korelace mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným vodným výluhem a poměrem N/P v nadzemní biomase ozimé pšenice při druhém odběru. Korelační koeficient je v tomto případě $r = -0,25$.



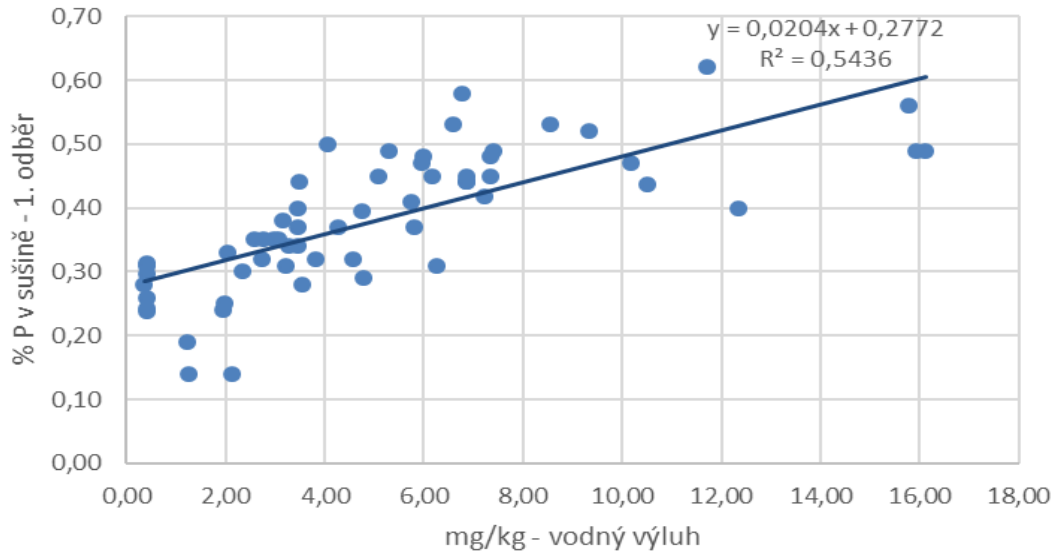
Graf č. 15. Střední negativní korelace mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným vodným výluhem a PNI indexem v nadzemní biomase ozimé pšenice při prvním odběru. Koeficient korelace je $r = -0,59$.



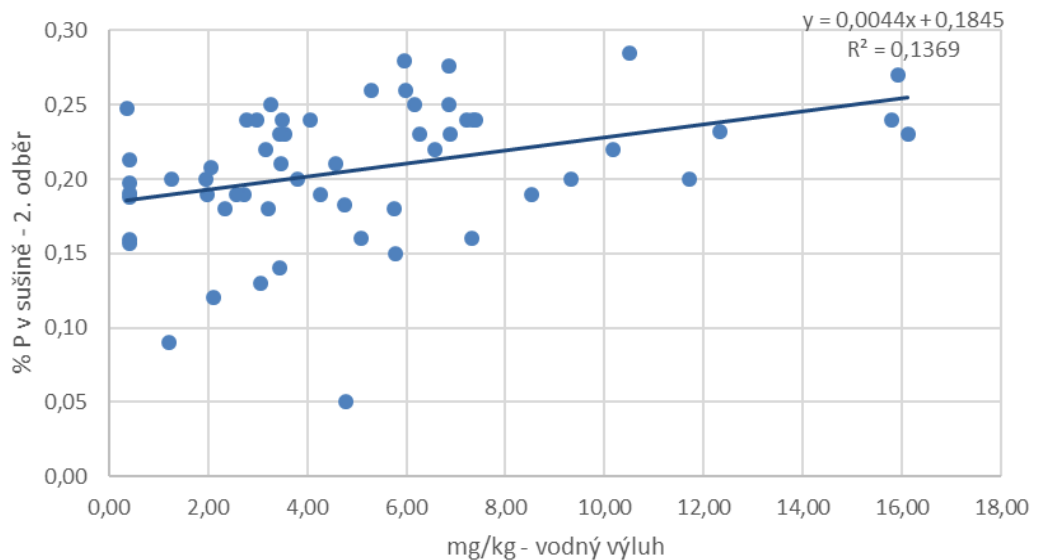
Graf č. 16. Vztah mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným vodným výluhem a PNI indexem v nadzemní biomase pšenice ozimé při druhém odběru. Síla korelace je slabá, $r = -0,32$.



Graf č. 17. Vztah mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným vodným výluhem a obsahem fosforu v sušíně nadzemní biomasy ozimé pšenice při prvním odběru. Koeficient korelace je $r = 0,74$.



Graf č. 18. Vztah mezi obsahem fosforu v půdě stanoveným vodným výluhem a obsahem fosforu v sušíně nadzemní biomasy ozimé pšenice při druhém odběru. Jde o slabou korelaci, $r = 0,37$.



6 Diskuze

V této práci byly zkoumány korelační vztahy mezi jednotlivými ukazateli obsahu fosforu v rostlině (obsah fosforu v sušině, poměr N/P a PNI index) a obsahy přijatelného fosforu v půdě stanovenými různými činidly (voda, Mehlich 3, Olsen). V případě obsahu fosforu v rostlině nebyl použit pouze samotný procentuální obsah fosforu v sušině, jelikož tento aspekt nezohledňuje ředící efekt v rostlině a tato charakteristika tedy nemusí být nejvhodnější. Z tohoto pohledu je lepší použití PNI indexu nebo poměru N/P v nadzemní biomase, jelikož tyto dvě charakteristiky zředující efekt zohledňují (Belanger et al. 2015).

Z metod půdních výluhů byl použit Mehlich 3, protože tato metoda se běžně používá i při agrochemickém zkoušení zemědělských půd ("Pracovní postupy pro agrochemické zkoušení půd v České republice v období 2017 až 2022" 2017). Olsenova metoda byla použita, protože díky zásaditému pH roztoku (8,5) je vhodnější pro použití na alkalických půdách (Kunzová 2009). Vodný výluh byl použit jako další způsob určení obsahu přijatelného fosforu v půdě. V další části práce se budu věnovat ideálním hodnotám sledovaných charakteristik a výsledkům z toho vyvozených.

Ideální hodnota poměru N/P v sušině nadzemní biomasy ozimé pšenice v době prvního odběru (BBCH 31) by měla být 14,5 a více (Lukas 2012). Mezi poměrem N/P v nadzemní biomase pšenice ozimé a obsahem fosforu v půdě zjištěným výluhem dle Olsena byla zjištěna středně silná negativní korelace. To znamená, že čím nižší bude hodnota obsahu fosforu v půdě, tím vyšší by měl být poměr N/P v nadzemní biomase rostliny. Abychom docílili ideální hodnoty poměru N/P, což je 14,5, musela by hodnota obsahu fosforu stanovená Olsenem být záporná, což se samozřejmě nemůže stát, proto tuto dvojici zjišťování obsahu fosforu v půdě a v rostlině nelze použít. Stejně tak tomu je i v případě stanovení obsahu fosforu v půdě pomocí výluhu Mehlich 3. Při hodnotě poměru N/P 14,5 by musely hodnoty obsahu fosforu v půdě být nižší než -100 mg/kg, což je opět nereálné a kombinaci těchto dvou charakteristik opět nelze použít. V případě stanovení obsahu fosforu v půdě pomocí vodného výluhu je situace obdobná. Znovu by musel obsah fosforu v půdě být záporný (-3,72 mg/kg), aby se hodnota poměru N/P dostala na optimum. Poměr N/P tedy není vhodný pro hodnocení příjmu fosforu rostlinou, jelikož na jeho základě nelze vyjádřit optimální hodnoty obsahu přijatelného fosforu v půdě.

Přibližně v době druhého odběru by měl být poměr N/P v nadzemní biomase rostlin pšenice vyšší než 10 (Baier & Baierová 1985). Z dosažených výsledků i u druhého odběru vyplývá, že by hodnoty obsahu v půdě stanovené všemi třemi metodami musel být záporné,

aby poměr N/P byl větší než 10. Konkrétně u vodného výluhu by byl ideální obsah fosforu v půdě -3,43 mg/kg, u výluhu Mehlich 3 -18,1 mg na kg a u výluhu Olsen -65,7 mg/kg.

Ve fázi prvního kolénka pšenice ozimé by se obsah fosforu v sušině nadzemní biomasy měl pohybovat okolo 0,33 % (Baier & Baierová 1985). Z dosažených výsledků vyplývá, že při stanovení obsahu fosforu v půdě pomocí extrakčního činidla Mehlich 3 by měl obsah fosforu v půdě být 40 mg/kg. Výborné zásobenosti fosforem v půdě podle Mehlicha 3 dosáhlo necelých 97 % zkoumaných vzorků. Při stanovení obsahu fosforu v půdě pomocí Olsenova výluhu, by měly jeho hodnoty nabývat 7,13 mg/kg a výše. Takovýchto hodnot dosáhlo 90 % zkoumaných vzorků. Při stanovení obsahu fosforu v půdě pomocí vodného výluhu, by jeho hodnoty měly být alespoň 1,12 mg/kg. Toto kritérium splňovalo celkem 88 % vzorků.

Baier & Baierová (1985) také uvádějí, že ideální hodnota procentuálního obsahu fosforu v sušině nadzemní biomasy pšenice ozimé v době kvetení je 0,23 %. Z dosažených výsledků tedy vyplývá, že ideální obsah fosforu v půdě stanovený výluhem Mehlich 3 je 167 mg/kg. V případě stanovení obsahu fosforu v půdě pomocí Olsenova výluhu je ideální hodnota 64,88 mg/kg. Při stanovení obsahu fosforu v půdě pomocí vodného výluhu je potom ideální obsah fosforu v půdě roven 10,34 mg/kg.

Belanger et al. (2015) uvádí, že ideální hodnota PNI indexu u ozimé pšenice je 1. Je-li nižší, značí to nedostatečný příjem fosforu. Jsou-li hodnoty naopak vyšší než 1, rostlina přijímá fosforu příliš. Z dosažených výsledků vyplývá, že obsah fosforu v půdě stanovený výluhem Mehlich 3 by měl být přibližně 71 mg/kg, aby byla hodnota PNI indexu rovna 1. Podle těchto charakteristik byl dostatečný obsah fosforu v půdě v 51 % zkoumaných vzorků. V případě zjišťování obsahu fosforu v půdě pomocí Olsenova výluhu nastává ideální hodnota PNI indexu při hodnotách půdního fosforu nižších než 29,3 mg/kg. Při vyšším obsahu fosforu v půdě stanoveným Olsenovou metodou by mělo podle zjištěných výsledků docházet k nižšímu příjmu fosforu rostlinou. Vyhovujících hodnot (tj. 29,3 a menších) bylo naměřeno u 30 % vzorků. U stanovení obsahu fosforu v půdě pomocí vodného výluhu by měly být hodnoty nižší než 4,29 mg/kg, aby byl PNI index roven 1 nebo vyšší.

Z hlediska síly korelace mezi obsahem fosforu v sušině nadzemní biomasy ozimé pšenice na konci odnožování a jednotlivých způsobů stanovení obsahu fosforu v půdě bylo zjištěno, že všechny zkoumané metody stanovení přijatelného obsahu fosforu v půdě byly s obsahem fosforu v sušině v silné korelaci. Nejsilnější vztah byl mezi obsahem fosforu v sušině nadzemní biomasy a obsahem fosforu v půdě stanoveným vodným výluhem

(korelační koeficient $r = 0,74$). Při stanovování obsahu fosforu v půdě pomocí výluhu výluhu Mehlich 3 byl korelační koeficient 0,67, což je druhá nejsilnější korelace. Při stanovení obsahu fosforu v půdě pomocí Olsenova výluhu byl korelační koeficient $r = 0,63$ a šlo tedy o nejslabší vztah mezi obsahem fosforu v sušině nadzemní biomasy ozimé pšenice při prvním odběru a obsahem fosforu v půdě stanoveným jednotlivými metodami.

U vzorků z druhého odběru nadzemní biomasy (konec kvetení) byla situace zcela odlišná, zde lze upřednostnit metodu s Olsenovým výluhem a s výluhem Mehlich 3, jelikož vodný výluh je s obsahem fosforu v sušině v nejslabším korelačním vztahu – $r = 0,37$, což značí slabou závislost. Naopak středně silná závislost byla zjištěna mezi obsahem fosforu v sušině nadzemní biomasy z konce kvetení a obsahem půdního fosforu ve výluhu Mehlich 3, kde byl korelační koeficient $r = 0,42$. Podobně byl na tom i fosfor v půdě stanovený Olsenovým výluhem a obsah fosforu v sušině nadzemní biomasy na konci kvetení. V tomto případě šlo taktéž o středně silnou korelaci ($r = 0,41$).

V případě prvního odběru vzorků a zkoumáním PNI indexu vyšlo najevo, že nejsilněji koreluje s obsahem fosforu v půdě stanoveným vodným výluhem ($r = - 0,59$), ovšem tuto metodu nelze významněji upřednostňovat, jelikož všechny tři metody byly s PNI indexem ve středně silné korelaci. Korelace o málo slabší, než u vodného výluhu se projevila mezi PNI indexem z prvního odběru a půdním fosforem stanoveným Olsenovou metodou ($r = - 0,56$). Z korelací mezi PNI indexem z prvního odběru a obsahem přijatelného fosforu v půdě byl nejnižší korelační koeficient s výluhem Mehlich 3 ($r = - 0,52$). U dvojice PNI z druhého odběru nadzemní biomasy a obsahem fosforu v půdě mluví výsledky zcela opačně. Nejsilněji koreluje PNI index s obsahem fosforu stanoveným výluhem Mehlich 3 ($r = - 0,46$) a lze tuto metodu tudíž upřednostnit, jelikož jako jediná je s PNI indexem z druhého odběru ve středně silném korelačním vztahu. Druhá nejsilnější korelace je mezi PNI indexem z druhého odběru a fosforem extrahovaným Olsenovým výluhem ($r = - 0,33$). Nejslabší korelace je mezi PNI indexem a fosforem vylouhovaným pomocí vodného výluhu ($r = - 0,32$). Ovšem poslední dvě jmenované metody jsou s PNI indexem pouze ve slabém korelačním vztahu.

Poměr N/P z prvního odběru rostlin nejsilněji koreloval s obsahem fosforu v půdě stanoveným vodným výluhem nebo Olsenem. U obou metod byl korelační koeficient $r = - 0,54$. Se stanoveným fosforem v půdě pomocí výluhu Mehlich 3 koreluje poměr N/P méně, konkrétně v tomto případě je korelační koeficient $r = - 0,46$. Všechny tři způsoby stanovení přijatelného obsahu fosforu v půdě s poměrem N/P korelovaly středně silně. Poměr N/P z druhého odběru nadzemní biomasy ozimé pšenice byl v nejsilnější korelaci s fosforem

v půdě stanoveným výluhem Mehlich 3 ($r = - 0,37$). Slabší korelace byla mezi N/P z druhého odběru a fosforem extrahovaným vodným výluhem ($r = - 0,25$). Nejmenší závislost vykazuje N/P a obsah přijatelného fosforu stanovený Olsenovou metodou. Všechny způsoby stanovení obsahu fosforu v půdě ovšem s poměrem N/P z druhého odběru korelují slabě.

Celkově lze tedy říci, že v době prvního odběru nadzemní biomasy ozimé pšenice výsledky korelovaly silně mezi obsahem fosforu v sušině rostliny a obsahem fosforu v půdě stanoveným vodným výluhem ($r = 0,74$). Dále byla silná korelace mezi obsahem fosforu v sušině rostliny a obsahem přijatelného fosforu v půdě stanoveným Olsenovou metodou ($r = 0,63$). Silná korelace byla i mezi obsahem fosforu v sušině nadzemní biomasy a obsahem přijatelného fosforu v půdě stanoveným výluhem Mehlich 3 ($r = 0,67$). Optimální hodnota obsahu přijatelného fosforu v půdě stanoveného vodným výluhem je minimálně 1,12 mg P/kg, výluhem Mehlich 3 minimálně 40 mg P/kg a Olsenovým výluhem 7,13 mg P/kg. V čase druhého odběru je nejsilnější korelace mezi PNI indexem a fosforem extrahovaným z půdy pomocí činidla Mehlich 3 ($r = - 0,46$) a mezi procentuálním obsahem fosforu v sušině nadzemní biomasy a fosforem extrahovaným Mehlichem 3 ($r = 0,47$). Aby PNI index nabýval ideálních hodnot, měl by obsah fosforu v půdě stanovený výluhem Mehlich 3 být 71 mg P/kg. Pro ideální hodnoty procentuálního obsahu fosforu v sušině nadzemní biomasy by měl obsah fosforu v půdě stanovený výluhem Mehlich 3 mít hodnotu 167 mg P/kg. Jelikož jde o vysokou hodnotu obsahu přijatelného fosforu v půdě, bylo by vhodné upřednostnit jako charakteristiku k hodnocení obsahu fosforu v rostlině PNI index.

7 Závěr

- Hypotéza, že výluh Mehlich 3 je vhodný k určování obsahu fosforu v alkalických půdách byla potvrzena, jelikož tento způsob byl v silné korelaci s obsahem fosforu v rostlině. Zároveň obsah fosforu stanovený výluhem Mehlich 3 nejsilněji koreloval při druhém doběru nadzemní biomasy s PNI indexem.
- Druhá z hypotéz, že vodný výluh není spolehlivou metodou pro stanovení obsahu fosforu na alkalických půdách, nebyla potvrzena. Obsah fosforu v půdě stanovený ve vodném výluhu silně koreloval s obsahem fosforu v sušině nadzemní biomasy pšenice ozimé při prvním odběru (BBCH 31).
- Hypotéza, že poměr N/P v nadzemní biomase ozimé pšenice a index výživy rostlin fosforem (PNI) jsou vhodnými charakteristikami k hodnocení obsahu fosforu v rostlině, byla z poloviny vyvrácena. Poměr N/P totiž není vhodnou charakteristikou, jelikož nelze vyjádřit optimální obsah fosforu v půdě, který by musel být, aby poměr N/P nabýval ideálních hodnot. Naproti tomu PNI index je vhodnou charakteristikou, jelikož optimální obsah fosforu v půdě lze vyjádřit.

8 Literatura

- Baier J, Baierová V. 1985. Abeceda výživy rostlin a hnojení, 1. vyd. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, Vaněk V, Pavlík M. 2008. Mobilita prvků a látek v rhizosféře, 1. vyd. Česká zemědělská univerzita, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, V Praze.
- 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. Powerprint, Praha, Česká zemědělská univerzita v Praze.
- Belanger G, Ziadi N, Pageau D, Grant C, Högnasbacka M, Virkajarvi P, Hu Z, Lu J, Lafond J, Nyiraneza J. 2015. A Model of Critical Phosphorus Concentration in the Shoot Biomass of Wheat. *Agronomy Journal* **107**:963-970.
- Bushuk W, Rasper V. 1994. Wheat: Production, Properties and Quality, 1. vydání. Chapman & Hall, Suffolk.
- Carver B. 2009. Wheat: science and trade, 1. vydání. Wiley-Blackwell, Ames, Iowa.
- Černý J, Shejbalová Š, Kovářik J, Kulhánek M. 2014. Předset'ové a podzimní hnojení pšenice ozimé. Page in www.agromanual.cz. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/predsetove-a-podzimni-hnojeni-psenice-ozime> (accessed 2019-03-30).
- ČSÚ . 2017. Osevní plochy ozimých plodin pro sklizeň v roce 2017. ČSÚ. Available from <https://www.czso.cz/csu/czso/osevni-plochy-ozimych-plodin-pro-sklizen-v-roce-2017> (accessed 2019-03-07).
- ČSÚ . 2018. Definitivní údaje o sklizni zemědělských plodin - 2017. Page in AGRÁRNÍ PORADENSKO-INFORMAČNÍ CENTRUM AGRÁRNÍ KOMORY ČESKÉ REPUBLIKY. Available from <http://www.apic-ak.cz/definitivni-udaje-o-sklizni-zemedelskych-plodin-2017.php> (accessed 2019-03-19).
- Faměra O. 1993. Základy pěstování ozimé pšenice, 1. vyd. Institut výchovy a vzdělávání Ministerstva zemědělství ČR, Praha.
- Hammond J, Broadley M, White P. 2004. Genetic Responses to Phosphorus Deficiency. *Annals of Botany* **94**:323-332.

- Kolář L, Kužel S. 2002. Organický fosfor v půdách. Pages 35-37 in Racionální použití hnojiv. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Kowalenko C. 2008. Extraction times and analysis methods influence soil test measurements of phosphorus and sulphur. *Canadian Journal of Soil Science* **88**:733-747.
- Kunzová E. 2009. Výživa rostlin a hnojení fosforem, 1. vydání. Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha.
- López Carnelo L, Ratto de Míguas S, Marbán L. 1997. Heavy metals input with phosphate fertilizers used in Argentina. *Science of The Total Environment* **204**:245-250.
- Lukas V. 2012. Stanovení a optimalizace diferencovaných dávek dusíkatých hnojiv v precizním zemědělství: metodika pro praxi, 1. vyd. Mendelova univerzita v Brně, Brno.
- Mader P, Čurdová E. 1997. Metody rozkladu biologických materiálů pro stanovení stopových prvků. *Chemické Listy* **91**:227-236.
- Maguire R, Sims J. 2002. Measuring Agronomic and Environmental Soil Phosphorus Saturation and Predicting Phosphorus Leaching with Mehlich 3. *Soil Science Society of America Journal* **vol. 66**:2033-2039. Available from <https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/66/6/2033> (accessed 2019-03-02).
- Mehlich A. 1984. Mehlich-3 soil test extractant - a modification of Mehlich-2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **15**:1409-1416.
- Mikanová O, Šimon T. 2011. Alternativní výživa rostlin fosforem, 1. vydání. Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha.
- Pracovní postupy pro agrochemické zkoušení půd v České republice v období 2017 až 2022. 2017. Pracovní postupy pro agrochemické zkoušení půd v České republice v období 2017 až 2022. ÚKZÚZ, V Praze.
- Novák J, Skalický M. 2012. Botanika: cytologie, histologie, organologie a systematika, 3. vyd. Powerprint, Praha.
- Olsen S, Cole C, Watanabe F, Dean L. 1954. Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction With Sodium Bicarbonate. Circular:1-18.
- Richter R, Hlušek R. 1994. Výživa a hnojení rostlin: Určeno pro posl. AF, ZF, 1. vyd. Vysoká škola zemědělská, Brno.
- Rodríguez D, Andrade F, Goudriaan J. 1999. Effects of phosphorus nutrition on tiller emergence in wheat. *Plant and Soil* **209**:283-295.
- Sen Tran T, R. Simard R. 1993. Mehlich III-Extractable elements. Pages 43-49 in *Soil sampling and methods of analysis*. Lewis Publishers, Boca Raton.

- Sims J. 2000. Soil Test Phosphorus: Olsen P. Pages 20-21 in *Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters*. Kansas State University, Manhattan.
- Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2016. *Výživa a hnojení polních plodin*, 1. vydání. Profi Press s.r.o., Praha.
- Yan W, Zhong Y, Schangguan Z. 2015. The relationships and sensibility of wheat C:N:P stoichiometry and water use efficiency under nitrogen fertilization. *Plant, Soil and Environment* **61**:201-207.
- Zbírál J. 2000. Determination of phosphorus in calcareous soils by Mehlich 3, Mehlich 2, CAL, and Egner extractants.. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **31**:3037-3048.
- Zimolka J, Edler S, Hřivna L, Jánský J, Kraus P, Mareček J, Novotný F, Richter R, Říha K, Tichý F. 2005. *Pšenice: pěstování, hodnocení a užití zrna*, 1. vyd. Profi Press, Praha.

