

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

Indikátory výživného stavu ozimé řepky fosforem

Diplomová práce

**Bc. Ondřej Plocek
Rostlinná produkce**

Ing. Ondřej Sedlář, Ph. D.

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Indikátory výživného stavu ozimé řepky fosforem" 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 14. 4. 2023

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Ondřeji Sedlářovi, Ph.D., za jeho trpělivost, ochotu, vstřícnost a cenné rady, které jsem dostával. Poděkování též patří mé rodině, která mě podporovala během celého studia.

Indikátory výživného stavu ozimé řepky fosforem

Souhrn

Řepka ozimá je plodinou, u které došlo v posledním půl století k velkým změnám v pěstitelské technologii. Fosfor kvůli nízké dostupnosti a nízké mobilitě ve většině půd je často limitujícím prvkem pro růst rostlin. Fosfor přijímají rostliny ve formě ortofosforečnanu H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} , které se vyskytují v půdních roztocích ve velmi nízkých koncentracích. Fosfor v rostlinách má významné postavení v biochemických reakcích a přenosu energie. Poměr N/P odráží postupný a dynamický charakter snížení obsahu živin lépe než konstantní indikátory. PNI se dá vypočítat porovnáním koncentrace fosforu v rostlinné biomase s kritickou koncentrací fosforu. Bélangerův model výpočtu kritického obsahu fosforu v rostlině je $P_c = 1,74 + 0,024N$.

Cílem diplomové práce je nalezení jednoduchého indikátoru výživného stavu fosforem u ozimé řepky, který bude v těsném vztahu s obsahem přijatelného fosforu v půdě a výnosem nadzemní biomasy ozimé řepky.

Vzorky půdy a nadzemní biomasy byly odebírány z polních provozních ploch v letech 2015 – 2020 v okresech Hradec Králové, Kutná Hora, Chomutov, Litoměřice, Louny, Mělník, Mladá Boleslav, Nymburk, Přerov a Znojmo.

Očekávalo se, že poměr obsahu dusíku k obsahu fosforu v nadzemní biomase ozimé řepky a index výživy rostlin fosforem korelují těsněji než obsah fosforu v rostlině s obsahem přijatelného fosforu v půdě. Dále se očekávalo, že index výživy rostlin fosforem (PNI phosphorus nutrition index) je v těsnějším vztahu s výnosem nadzemní biomasy rostlin v porovnání s poměrem obsahu dusíku k obsahu fosforu v nadzemní biomase ozimé řepky. Zjistilo se, že nejsilněji koreloval indikátor N/P v rostlině ve fázi začátku kvetení řepky s Olsenem a PNI s kritickou koncentrací fosforu od Bélanger et al. (2015) ve fázi začátku kvetení řepky s Olsenem. Dále se zjistilo, že u všech indikátorů fosforu v rostlině nebyl nalezen statisticky významný vztah s výnosem nadzemní části. Také se zjistilo, že metoda Olsen dosahuje silnější korelace s indikátory výživného stavu fosforu v nadzemní biomase ve fázi počátku kvetení řepky než metoda Mehlich 3.

Klíčová slova: fosfor, N/P, PNI, přijatelný obsah, řepka

Indicators of Winter Canola Phosphorus Status

Summary

Winter canola is a crop that has seen major changes in growing technology over the last half century. Phosphorus, due to its low availability and low mobility in most soils, is often the limiting element for plant growth. Phosphorus is taken up by plants in the form of orthophosphate H_2PO_4^- and HPO_4^{2-} , which are present in soil solutions in very low concentrations. In plants, phosphorus plays an important role in biochemical reactions and energy transfer. The N/P ratio reflects the gradual and dynamic nature of nutrient reduction better than constant indicators. PNI can be calculated by comparing the phosphorus concentration in plant biomass with the critical phosphorus concentration. Bélanger's model for calculating the critical phosphorus content of a plant is $P_c = 1.74 + 0.024N$. The aim of this thesis is to find a simple indicator of the phosphorus nutritional status of winter canola that is closely related to the acceptable phosphorus content in the soil and the yield of above-ground biomass of winter rape. Soil and aboveground biomass samples were collected from field plots in 2015 - 2020 in the districts of Hradec Králové, Kutná Hora, Chomutov, Litoměřice, Louny, Mělník, Mladá Boleslav, Nymburk, Přerov and Znojmo.

It was expected that the ratio of nitrogen to phosphorus content in the above-ground biomass of winter canola and the plant phosphorus nutrition index correlate more closely than the phosphorus content of the plant with the content of acceptable phosphorus in the soil. Furthermore, the plant phosphorus nutrition index (PNI phosphorus nutrition index) was expected to be more closely correlated with the yield of aboveground plant biomass compared to the ratio of nitrogen to phosphorus content in aboveground biomass of winter canola. It was found that the plant N/P ratio was most strongly correlated with the critical phosphorus concentration of Bélanger et al. (2015) at the stage of the onset of flowering of canola with available phosphorus in soil (Olsen) and PNI at the stage of the onset of flowering of canola with Olsen. It was also found that for all phosphorus indicators in the sundew, no statistically significant relationship was found with the yield of the aerial part. It was also found that the Olsen method achieved a stronger correlation with indicators of phosphorus nutritional status in aboveground biomass at the stage of the onset of flowering of canola than the Mehlich 3 method.

Keywords: phosphorus, N/P, PNI, available content, canola

Obsah

1 Úvod	8
2 Cíl práce	9
2.1 Hypotézy	9
3 Literární rešerše	10
3.1 O plodině	10
3.1.1 Význam pěstování řepky.....	10
3.1.1.1 Potravinářství.....	10
3.1.1.2 Krmivářství.....	11
3.1.1.3 Oleochemie.....	11
3.1.1.4 Zdroj obnovitelné energie – bionafta a využití čistého řepkového oleje	11
3.2 Fosfor v rostlině	12
3.2.1 Funkční vlastnosti fosforu ve fotosyntéze.....	12
3.2.2 Fytin	13
3.2.3 Reakce rostlin na nedostatek fosforu.....	13
3.2.3.1 Změna poměru nadzemní biomasy ku kořenům	14
3.2.3.2 Zvýšená produkce organických kyselin v exsudátech.....	15
3.2.3.3 Sekrece fosfatáz kořeny.....	15
3.2.3.4 Intenzivní rozvoj arbuskulární mykorrhizy (AM)	16
3.2.3.5 Tvorba klastrových kořenů (kořenových shluků).....	16
3.2.3.6 Antokyanové zbarvení	16
3.2.3.7 Změna koncentrace živin	17
3.2.4 Deficit fosforu z hlediska výnosu	17
3.3 Fosfor v půdě	17
3.4 Indikátory stavu fosforu v půdě	20
3.4.1 Mehlich-3.....	20
3.4.2 Olsen	21
3.4.3 Ostatní indikátory	21
3.4.3.1 AEM.....	21
3.4.3.2 Bray-1.....	21
3.4.3.3 Morgan	22
3.4.3.4 CAL.....	22
3.5 Indikátory stavu fosforu v rostlině	22
3.5.1 Fosfor v rostlině	22
3.5.2 Poměr N/P	23

3.5.3	PNI.....	23
3.6	Hnojení fosforem	23
3.6.1	Minerální fosforečná hnojiva.....	25
3.6.1.1	Superfosfáty	25
3.6.1.2	Hyperfosfáty.....	25
3.6.1.3	Amofos	25
3.6.1.4	Mleté fosfáty	25
3.6.1.5	Dolofos	26
3.6.2	Organická fosforečná hnojiva	26
3.6.2.1	Čistírenské kaly.....	26
3.6.2.2	Kostní moučka	27
3.6.2.3	Drůbeží trus.....	27
3.7	Dusík.....	27
3.8	Dusík v půdě.....	28
3.9	Dusík v rostlině.....	28
4	Metodika	30
4.1	Odběr vzorků z polních provozů.....	30
4.2	Chemické analýzy	30
4.4	Výpočet PNI	31
4.5	Statistické hodnocení vzorků	31
5	Výsledky	32
6	Diskuze	46
6.1	Rostlinné indikátory fosforu	46
6.2	Metody pro hodnocení obsahu půdního fosforu	46
6.3	Porovnávání vztahů mezi fosforem v půdě a fosforem v rostlině	47
6.4	Vzájemné porovnání rostlinných indikátorů.....	48
6.4.1	Hledání optimálních hodnot indikátorů příjmu fosforu ve fázi počátku prodlužovacího růstu řepky	48
6.4.2	Hledání optimálních hodnot fosforu ve fázi začátku kvetení řepky	48
6.5	Vyjádření optimálních hodnot obsahu přijatelného fosforu v půdě	49
6.6	Vztah rostlinných indikátorů fosforu s tvorbou výnosu nadzemní biomasy řepky	
	50	
7	Závěr	51
8	Literatura.....	52

1 Úvod

Řepka ozimá se ve spotřebě živin řadí mezi velmi náročné plodiny. Pro dobrý 4 t výnos semene odebere rostlina nadzemní biomasou z jednoho hektaru 44-72 kg fosforu (Baranyk et al. 2005).

Fosfor je základní makroživina nezbytná pro normální růst a vývoj vyšších rostlin. Význam fosforu v rostlině je především energetický a stavební (Kunzová et al. 2012). Za podmínek při nedostatku fosforu rostliny používají různé strategie pro zvýšení jeho příjmu a využití (Bastani & Hajiboland 2017). Fosfor v rostlině se může hodnotit obsahem fosforu v nadzemní biomase, dále také lze využít indikátory výživného stavu rostlin fosforem, které berou v potaz zředovací efekt během vegetace a jejichž hodnoty jsou v průběhu růstu rostlin stabilnější než prostý obsah živiny, to jsou například indikátory poměr N/P, což je poměr dusíku s fosforem, a PNI, který vznikl z angličtiny a jedná se o porovnání naměřeného obsahu fosforu v biomase s nějakou kritickou koncentrací. (Sedlář et al. 2020a).

V této diplomové práci je porovnáván vztah jednotlivých indikátorů fosforu v ozimé řepce jak mezi sebou, tak s fosforem v půdě, který byl extrahován za pomoci činidel Mehlich 3 a Olsen, a také s množstvím vyprodukované nadzemní biomasy.

2 Cíl práce

Cílem diplomové práce je nalezení jednoduchého indikátoru výživného stavu fosforem u ozimé řepky, který bude v těsném vztahu s obsahem přijatelného fosforu v půdě a výnosem nadzemní biomasy ozimé řepky.

2.1 Hypotézy

- Poměr obsahu dusíku k obsahu fosforu v nadzemní biomase ozimé řepky a index výživy rostlin fosforem korelují těsněji než fosfor v rostlině s obsahem přijatelného fosforu v půdě.
- Index výživy rostlin fosforem je v těsnějším vztahu s výnosem nadzemní biomasy rostlin v porovnání s poměrem obsahu dusíku k obsahu fosforu v nadzemní biomase ozimé řepky.

3 Literární rešerše

3.1 O plodině

Řepka ozimá je plodinou, u které došlo v posledním půl století k velkým změnám v pěstitelské technologii. Z plodiny širokořádkové, plečkované, málo hnojené a minimálně chemicky ošetřované se stala jedna z nejvíce intenzifikovaných polních plodin našeho zemědělství (Bečka et al. 2013). Pěstuje se na mnoha kontinentech – s jejím rozšířením se můžeme setkat v USA, Kanadě a Argentině, je pěstována na severu Afriky, v Austrálii i na Novém Zélandu, hlavní oblastí je euroasijský kontinent. Mezi významné producenty se řadí Indie, Čína, oblast Kavkazu, Kazachstánu a velká část Evropy (Venclová 2017). Řepka olejná (*Brassica napus* L. var. *napus*) je nejvíce rozšířená olejnina mírného pásma. Vznikla jako amfitetraploid se 38 chromosomy, její plané formy nejsou známy. Řepkové semeno obsahuje kromě žádoucích složek (dusíkaté látky, polysacharidy, triglyceridy, steroly, fosfolipidy a galaktolipidy, popeloviny, celulóza) také nežádoucí složky - glukosinoláty (1 %), fyty (3 %), tanin (2 %), sinapin (2 %), lignin (5 %) a volné mastné kyseliny (0,2 %) (Koprna & Havel 2002).

3.1.1 Význam pěstování řepky

Hlavním cílem pěstování řepky je dosažení maximálního výnosu semen, které jsou díky svým vlastnostem a složení nenahraditelnou komoditou. Pěstování řepky nepředstavuje žádné konkrétní problémy, protože se dokáže přizpůsobit různým polním podmínkám (Varényiová & Ducsay 2015). Z řepky se vyrábí vysoce kvalitní olej. Řepka je v současnosti třetím největším zdrojem globálních dodávek rostlinného oleje po sójovém a palmovém (Zhu et al. 2016). Složení mastných kyselin u řepkového oleje bylo značně upraveno šlechtěním. Olej s nízkým obsahem kyseliny erukové obsahuje téměř optimální rovnováhu mastných kyselin pro lidské zdraví a výživu a našel široké uplatnění v potravinářském průmyslu. Olej s odlišným složením mastných kyselin, včetně oleje s vysokým obsahem kyseliny erukové, má značný potenciál pro nepotravinářské účely (Qiu et al. 2006). Řepka poskytuje nejen rostlinný olej s vynikající nutriční hodnotou, ale také moučku pro krmení zvířat a je zdrojem pro výrobu bionafty s vynikajícími tokovými vlastnostmi v chladném počasí v důsledku její nízké saturace (Zhu et al. 2016).

3.1.1.1 Potravinářství

Většina moderních odrůd *B. napus* je označována jako 00 odrůdy, protože mají semena s nízkým obsahem glukosinolátů a kyseliny erukové (Feng et al. 2011). Tyto sekundární metabolity se nacházejí převážně v rostlinách řádu *Brassicales/Capparales* a jsou normálně produkovány jako součást přirozené obrany proti všeobecným býložravcům (Lou et al. 2008). Snížené koncentrace glukosinolátů jsou často důsledkem programů křížení. Koncentrace glukosinolátů v jejich semenech se dramaticky snížila z > 100 na $< 20 \mu\text{mol g}^{-1}$ (Feng et al. 2011).

Tento fakt vlastně přímo podmínil současný rozvoj pěstování řepky, protože až do té doby byl řepkový olej podřadný, vhodný jen pro průmyslové využití. Tato razantní kvalitativní

změna od základů změnila jeho vlastnosti a z podřadného oleje se náhle stal kvalitní potravinářský olej s širokými možnostmi uplatnění. Olej běžně pěstovaných odrůd řepky olejné je používán pro studenou kuchyni i na pečení a fritování, jak v tekuté formě, tak ve formě margarínu a ztuženého pokrmového tuku (Koprna & Havel 2002).

Řepkový a sojový olej jsou dva nejčastěji používané typy jedlých rostlinných olejů ve světě. Pokud srovnáváme sojový a řepkový olej z hlediska potravinářského, je nesporným faktem, že řepka má nižší jodové číslo, což znamená vyšší oxidační stabilitu řepkového oleje (Truhlář et al. 2006). Řepkový olej je vysoce kvalitním olejem určeným zejména pro tepelné zpracování pokrmů, neboť velmi dobře snáší vyšší teploty a díky oxidační stabilitě má delší trvanlivost (Baranyk et al. 2005).

3.1.1.2 Krmivářství

Obsah oleje v semeni je 40 až 45 %, zbytek biomasy semen řepky tvoří sušinu ve výši přibližně 55 až 60 % suché hmotnosti semen. Výsledný velkoobjemový a levný šrot ze semen řepky je primárně začleněn na trh s krmivou pro zvířata. Řepková moučka je konkurenceschopným zdrojem krmiva pro zvířata díky vysokým hodnotám bílkovin a energie. V současné době se řepkový šrot pro svou vysokou kvalitu bílkovin (hrubý protein 35 až 40 % hm.) používá při výrobě krmiv pro dojný skot, drůbež, prasata a farmové ryby (Wanasundara 2011).

V zahraničí se běžně přidávají řepkové komponenty do krmných směsí v maximální možné míře. V praxi zde však existuje i obecně vyšší informovanost o skutečné hladině glukosinolátů v používané řepce (Baranyk et al. 2007).

Glukosinoláty jsou glykosidy obsahující síru a dusík, jejichž přítomnost v řepce byla dříve hlavním problémem při využití této rostliny jako krmiva. Bylo prokázáno, že tyto sloučeniny mají některé nepříznivé účinky, jako je snížení výkonnosti zvířat nebo snížení aktivity štítné žlázy u plodů zvířat a rostoucích zvířat (Chmielewska et al. 2021).

3.1.1.3 Oleochemie

Oleochemické látky jsou obnovitelné chemické látky získané z rostlinných olejů a jiných tuků, včetně živočišných, nebo dokonce syntetizované z metabolismu mikroorganismů. V některých případech vznikají oleochemické látky také jako vedlejší produkty při výrobě biopaliv (Tesser et al. 2020). Pro oleochemii je významná možnost rozkladu olejů a tuků buď hydrolyzou, nebo alkoholýzou. Rozkladem vznikají mastné kyseliny, glycerol a estery mastných kyselin (Baranyk et al. 2007). Glycerol má obrovské průmyslové využití, zejména ve farmaceutickém a kosmetickém průmyslu (Katagi et al. 2020).

3.1.1.4 Zdroj obnovitelné energie – bionafta a využití čistého řepkového oleje

Hlavními zdroji bionafty jsou v současné době methylestery ze sóji, řepky olejné a palmy olejné, které se obvykle přimíchávají v nízkém množství do nafty (obvykle 2 nebo 5 %, ale až 20 %) (Prince 2010). V České republice zcela dominuje produkce řepkového oleje. Ostatních olejů se produkuje výrazně méně. Jelikož jejich výroba je drahá, využívají se převážně pro potravinářské účely (Šmidrkal et al. 2008).

Pro výrobu bionafty je dobře zavedeno několik obecně uznávaných technologií. Nejběžnější technologií používanou pro přípravu bionafty je transesterifikace olejů (triglyceridů) alkoholem (methanolem), čímž vzniká bionafta (metylestery mastných kyselin, FAME) jako hlavní produkt a glycerol jako vedlejší produkt (Prasad 2017).

3.2 Fosfor v rostlině

Fosfor přijímají rostliny ve formě ortofosforečnanu H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} , které se vyskytují v půdních roztocích ve velmi nízkých koncentracích (0,1–10 μm). Optimum pH pro příjem ortofosforečnanu je 4,5–5,0. V tomto pH rostliny preferují příjem H_2PO_4^- oproti HPO_4^{2-} . Ačkoli se celkový obsah fosforu v půdě obvykle pohybuje od 500 do 2000 ppm, celkový biologicky dostupný fosfor, měřený půdními extrakčními činidly, může být pouze několik ppm. Až polovina půdního fosforu může být organická, pocházející z rostlinných zbytků a půdních organismů. Organický fosfor musí být mineralizován, než ho mohou rostliny přijímat (Vance et al. 2003).

Pokud jde o spotřebu živin rostlinami, fosfor, dusík a draslík jsou vyžadovány na nejvyšší úrovni ze šesti základních makroživin a fosfor nelze nahradit jinými prvky (Ha & Tran 2014).

Hlavními místy, kde se zabudovává esterifikovaný fosfor, jsou nukleové kyseliny, fosfolipidy, fosforylované, ve vodě rozpustné metabolity s nízkou relativní molekulovou hmotností (běžně označované jako P-estery) a fosforylované proteiny (Veneklaas et al. 2012).

Kyselina fosforečná patří mezi nezbytné komponenty nukleových kyselin. Jejich monomerem jsou nukleotidy skládající se z dusíkatých heterocyklických bází, monosacharidů ribosy nebo deoxyribosy a kyseliny fosforečné. Nukleotidy se navzájem spojují v polynukleotidový řetězec. Fosfor v nukleových kyselinách je nositelem jejich acidity, a tedy i vysoké koncentrace kationtů ve strukturách nukleových kyselin (Pavlíková et al. 2008).

Místem největší koncentrace organického fosforu v rostlině je soubor nukleových kyselin, který obecně obsahuje 40–60 % fosforu nalezeného v kombinovaném organickém fosforu (tj. celkový fosfor mínus anorganický). Fosfolipidy jsou důležité pro činnost membrán. I když nemusí být možné zmenšit celkovou plochu membrán, může dojít ke zvýšení účinnosti jejich syntézy a složení (Veneklaas et al. 2012).

3.2.1 Funkční vlastnosti fosforu ve fotosyntéze

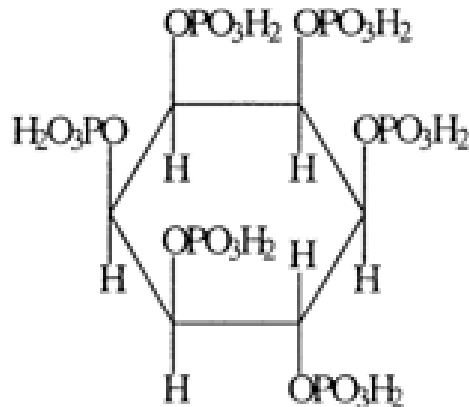
Fosfor je základním prvkem ve světelné fázi fotosyntézy, kde absorbované světlo pohání elektronový transportní řetězec v thylakoidní membráně za vzniku ATP a NADPH. Fosfor také hraje zásadní roli v reakcích za tmy (Calvin-Bensonův cyklus), ve kterých se ATP a NADPH používají k přeměně CO_2 na sacharidy ve stromatu chloroplastů. Když jsou rostliny vystaveny nedostatku fosforu, vedou snížené hladiny anorganického fosfátu v chloroplastech ke snížení produkce ATP, protože anorganický fosforečnan spolu s CO_2 a H_2O jsou primárními substráty pro fotosyntézu. Navíc během nedostatku fosforu větší část NADP^+ zůstává v redukované formě (NADPH), protože ji nelze využít v Calvin-Bensonově cyklu kvůli omezení ATP. Výrazným rysem nedostatku fosforu je proto výrazné snížení asimilace CO_2 a snížení produkce biomasy (de Bang et al. 2020).

Produktivita rostlin závisí na fotosyntéze a proces fotosyntézy se spoléhá na sloučeniny obsahující fosfor. Efektivní využití fosforu ve fotosyntéze je tedy potenciálně důležitým

determinantem plodin PUE. PUE je množství celkové biomasy nebo výnosu, které se vyprodukuje na jednotku přijatého fosforu. Účinnost využití fotosyntetického fosforu (PPUE max) je definována jako okamžitá světlem nasycená rychlost fotosyntézy listů vyjádřená na jednotku listového fosforu (Veneklaas et al. 2012).

3.2.2 Fytin

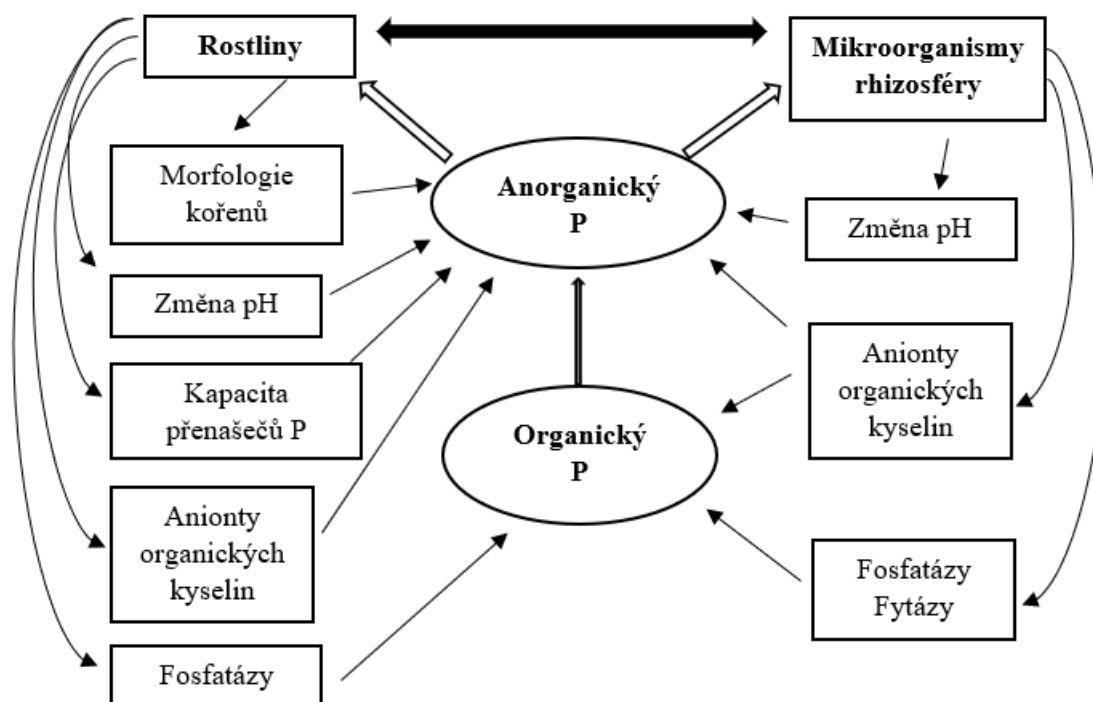
Významnou organickou sloučeninou fosforu v rostlinách je fytin. Je to vápenato-hořečnatá sůl kyseliny fytové, která se tvoří a hromadí v semenech (Vaněk et al. 2016). Kyselina fytová byla poprvé identifikována v roce 1855 (obrázek 1). Kyselina fytová má 12 nahraditelných protonů, což jí umožňuje vytvářet komplexy s multivalentními kationty a kladně nabitými proteiny, a proto ji lze nalézt v mnoha formách (Oatway et al. 2001).



Obrázek 1. Základní struktura kyseliny fytové (Oatway et al. 2001)

3.2.3 Reakce rostlin na nedostatek fosforu

Fosfor kvůli nízké dostupnosti a nízké mobilitě ve většině půd často omezuje primární produktivitu přírodních a zemědělských ekosystémů. Aby se cévnaté rostliny vyrovnaly s nízkým obsahem fosforu, vyvinuly si různé podzemní strategie ke zvýšení příjmu fosforu (Wen et al. 2019).



Obrázek 2. Reakce rostlin na nedostatek fosforu a jeho příjem. Upraveno od Rengel & Marschner (2005).

Obrázek 2 znázorňuje rostlinné a mikrobiální mechanismy pro zvýšení dostupnosti fosforu v rhizosféře. S mykorhizní kolonizací se nepočítá. Rostliny a mikroorganismy mohou zvýšit dostupnost anorganického fosforu změnou pH rhizosféry a vylučováním aniontů organických kyselin. Rostliny mohou také zvýšit kapacitu příjmu fosforu zvýšením plochy kořenového povrchu díky růstu dlouhých a tenkých kořenů s četnými tenkými kořenovými vlásky a změnou kapacity transportérů fosforu zapuštěných do plazmatické membrány. Rostliny a mikroorganismy mohou mobilizovat fosfor z organických zásob a převést jej na dostupné anorganické formy pomocí fosfatáz. Enzym fytázy vylučovaný mikroorganismy je schopen přeměnit fytát na estery fosforu, které mohou fosfatázy rozložit na anorganický fosfor. Šipky v obrysu ukazují příjem fosforu (Rengel & Marschner 2005).

3.2.3.1 Změna poměru nadzemní biomasy ku kořenům

Při nedostatku fosforu rostliny často reagují tvorbou velmi členitého a hustého kořenového systému tak, aby kořeny lépe prostoupily půdu a mohly využít další mechanismy pro zvýšení mobility fosforu. Současně také dochází k omezenému růstu biomasy. Zvyšuje se především podíl kořenů. Také dochází k výraznému nárůstu sacharidů v kořenech a zároveň i ke zvýšenému obsahu fosforu v kořenech. Dále se zvyšuje hustota kořenového vlášení na jednotku délky kořene (Balík et al. 2021).

3.2.3.2 Zvýšená produkce organických kyselin v exsudátech

Při nedostatku fosforu rostliny vylučují širokou škálu organických sloučenin ke zvýšení mobilizace fosforu z málo rozpustných zdrojů. Exudované anionty organických kyselin mohou hrát roli jak při solubilizaci minerálních živin, tak jako růstové substráty pro mikroorganismy. Typické karboxyláty nacházející se v kořenových exsudátech zahrnují citronan, jablečnan, malonan, octan, fumaran, jantaran, mléčnan a šťavelan (Rengel & Marschner 2005). Karboxyláty jsou organické anionty, které když jsou v dostatečně vysoké koncentraci, mohou mít větší potenciál než fosforečnan chelatovat kationty v půdní matrici, čímž přenášejí fosfor do roztoku a zvyšují jeho dostupnost pro příjem rostlinami (Pearse et al. 2006). Karboxyláty mohou být vylučovány kořeny s deficitem fosforu značnou rychlostí. Průměrná rychlost 0,57 nmol citronanu cm⁻¹ kořen h⁻¹ pro řepku olejku (Rengel & Marschner 2005).

K využití fosforu dochází prostřednictvím solubilizace mikroby, např. bakteriemi, houbami nebo biohnojivy produkujícími fytohormony, siderofory a antibiotika. Nicméně faktory ovlivňující solubilizaci fosforu jsou pH a teplota, které jsou klíčovými hráči pro dynamiku adsorpce fosforu z půdy (Ikhajiagbe et al. 2020).

Organické kyseliny, jako je kyselina jablečná a kyselina citrónová, se vyskytují převážně jako dvojmocné a trojmocné anionty při pH cytosolu 7,0–7,5 a pohyb těchto aniontů z kořenových buněk je energeticky pasivní proces vyplývající ze strmého gradientu koncentrace karboxylátů. Proto je exsudace organických aniontů z kořenových buněk pravděpodobně zprostředkována aktivací aniontových kanálů propustných pro jablečnan a citronan v plazmatické membráně kořenových buněk, což usnadňuje odtok karboxylátů (Wang et al. 2007).

Organické kyseliny přispívají k větší rozpustnosti fosforečnanů vápenatých nebo fosforečnanů železitých a hlinitých. Tvorbou hlinitých chelátů inaktivují hliník, který by jinak nepříznivě působil na růst kořenů. Vojtěška a lupina bílá vylučují především kyselinu citrónovou, pro jiné plodiny, například kukuřici, pšenici a řepku, je dominantní kyselina jablečná, pro řepu je to kyselina šťavelová (Balík et al. 2021).

3.2.3.3 Sekrece fosfatáz kořeny

Univerzální odpovědí rostlin na nedostatek fosforu je syntéza enzymů kyselých fosfatáz (APáz). Tyto enzymy jsou všudypřítomné v rostlinných orgánech a aktivitu APázy lze detekovat během vývoje. APázy se podílejí na poskytování fosforu během klíčení semen ze skladovaného fytátu a vnitřní remobilizaci fosforu (Vance et al. 2003). Tyto enzymy také odštěpují fosforečnan z organických sloučenin v půdě a uvolňují jej pro příjem do rostliny (Pavlíková et al. 2008).

V řadě půd je přijatelnost organického fosforu limitována především nízkou rozpustností některých jeho forem, jako Ca a Fe / Al fytátů, které mohou tvořit rozhodující podíl organického fosforu v půdě. Avšak kyselých fosfatáz vylučovaných rostlinami vykazují pouze omezenou hydrolytickou aktivitu vůči fytátům a uvolňování specifických fytáz se vyskytuje více u mikroorganismů než u rostlin. (Balík et al. 2021).

3.2.3.4 Intenzivní rozvoj arbuskulární mykorhizy (AM)

Arbuskulární mykorhizní (AM) houby jsou důležitou součástí půdního mikrobiálního společenství. Vytvářejí symbiotický vztah s 90 % suchozemských rostlinných druhů. Dodávají živiny, zejména fosfor, hostitelské rostlině výměnou za uhlík. Tento symbiotický vztah může vést ke zvýšené odolnosti hostitelské rostliny vůči suchu, půdním houbovým patogenům a těžkým kovům. Existují důkazy, které naznačují, že AM houby zlepšují strukturu půdy (Gosling et al. 2013).

Největším přínosem AM symbiózy je zvýšená výživa rostlin fosforem. V polních podmínkách je většina anorganického fosforu získána mykorhizní cestou. Fyziologické studie prokázaly, že příjem anorganického fosforu prostřednictvím AM hub je odlišnou funkční alternativou k přímému příjmu rostlinou, protože hyfy AM hub zvětšují zónu, ze které mohou rostliny čerpat anorganický fosfor z půdy (Sawers et al. 2017).

3.2.3.5 Tvorba klastrových kořenů (kořenových shluků)

Rostliny si vyvinuly četné adaptivní mechanismy, aby se vyrovnaly s nedostatkem fosforu. Patří mezi ně modifikace kořenové architektury. Specializované postranní kořeny, takzvané klastrové kořeny, vytváří například lupina bílá při nedostatku fosforu v půdě (Wang et al. 2010). Kořeny klastrů se vyznačují vysokou schopností uvolňovat organické anionty jako je citronan a jablečnan (Wang et al. 2007).

Kořenové klastry u rostlin (také nazývané klastrové/proteoidní kořeny) jsou uznávány spolu s kořenovými noduly a mykorhizami jako tři hlavní kořenové modifikace pro zvýšení příjmu živin z půdy (Lamont et al. 2014).

Existují dva důležité aspekty tvorby kořenových shluků: rhizosferní mikroby podporující růst rodičovských kořenů, které jsou schopny nést více shluků (nepřímý účinek); a rhizosférické mikroby, jež specificky podporují iniciaci kořenových shluků (přímý účinek) (Lamont et al. 2014).

3.2.3.6 Antokyanové zbarvení

Rostliny vykazují několik charakteristických fyziologických reakcí, jakmile jsou vystaveny podmínkám s nedostatkem fosforu. Tyto reakce se obvykle rozvíjejí přibližně jeden týden po vystavení limitním hladinám fosforu a odrážejí adaptaci biochemických a metabolických procesů na jeho nedostatek (Ha & Tran 2014).

Antokyanany jsou přirozeně se vyskytující sloučeniny, které jsou syntetizovány biosyntézou flavonoidů. Jsou zodpovědné za pigmentaci rostlin a dodávají různým rostlinným pletivům speciální barvy (včetně modré, fialové a červené). Antokyanany jsou většinou produkovány ve vegetativních pletivech v reakci na environmentální stresové podmínky, jako jsou nízké teploty, útoky patogenů, nutriční deficit a těžké kovy (Chen et al. 2022).

Akumulace antokyanového pigmentu se běžně vyskytuje v pletivech listů za účelem ochrany chloroplastů a nukleových kyselin před intenzivním ultrafialovým světlem (Ha & Tran 2014). Vzhledem ke svým antioxidačním vlastnostem antokyanany chrání rostliny před zpomalením růstu a buněčnou smrtí. Antokyanany snižují oxidační stres vyčítáním reaktivních forem kyslíku vyvolaných abiotickým stresem, což umožňuje rostlinám reagovat

na abiotický stres (Chen et al. 2022). Ne všechny druhy rostlin však vyvinou anthokyanózu, pokud jsou vystaveny nedostatku fosforu. Výjimkami jsou například brambory, cukrová řepa a rýže (de Bang et al. 2020).

3.2.3.7 Změna koncentrace živin

Nedostatek fosforu má také za následek změny koncentrací jiných živin. Konkrétně obsah makroživin – Ca, Mg a Na – a mikronutrientů – B, Cu a Mo – se při nedostatku fosforu snižuje. Koncentrace železa je však znatelně zvýšena, přibližně dvojnásobně (Ha & Tran 2014).

3.2.4 Deficit fosforu z hlediska výnosu

Nejdůležitějšími faktory ovlivňujícími výnos plodin jsou mráz v zimě, množství srážek (nadměrné nebo nedostatečné), teplota a nedostatečné zásobení rostlin živinami v kritických fázích tvorby výnosu. Všechny tyto faktory významně ovlivňují hustotu rostlin v zimním období a ovlivňují vývoj výnosové složky během jarního vegetačního období (Grzebisz et al. 2018).

Řepka je jednou z plodin, které potřebují více fosforu. Přísun fosforu má velký vliv na růst a vývoj rostliny i na výnos semen a jejich kvalitu (Yang et al. 2016).

Fosfor a draslík jsou primární živiny, které se podílejí na vyrovnávání produktivity dusíku. Jakýkoli nedostatek v dodávce fosforu má za následek poruchu v dodávce dusíku, což následně ovlivňuje rychlost růstu rostlin (Grzebisz et al. 2018).

Před květem je fosfor absorbován většinou vegetativními orgány, jako jsou kořeny, stonky a listy. Část fosforu je transportována do šesulí, kde podporuje jejich růst, proto má obsah fosforu v různých orgánech velký vliv na růst šesulí a semen (Yang et al. 2016).

Výnos řepky olejky lze zvýšit mnoha způsoby. Nejpravděpodobněji ke zvýšení výnosu dojde, pokud se zvýší počet semen na jednotku plochy. Proto je důležité zjistit, do jaké míry ovlivňuje stav výživy rostlin kritická stadia tvorby výnosové složky (Grzebisz et al. 2018).

3.3 Fosfor v půdě

Ačkoli se celkový obsah fosforu v půdě obvykle pohybuje od 500 do 2000 ppm, celkový biologicky dostupný fosfor, měřený půdními extrakčními činidly, může být pouze několik ppm (Vance et al. 2003). Fosfor vystupuje v půdě v organické i anorganické formě (Adhami et al. 2014).

Nejdůležitější anorganické sloučeniny fosforu jsou hydrogenfosforečnan vápenatý, oktakalciumfosforečnan, hydroxylapatit, fluorapatit, chlorapatit, strengit, variscit. Hydroxylapatit a fluorapatit se vyskytují v půdách většinou v isomorfních směsích, což je dáno podobnou velikostí iontů OH^- a F^- . Apatit je stabilní pouze v alkalických půdách a při $\text{pH} < 7$ dochází k jeho rozkladu. Rozpustnost fosforečnanů vápenatých při stejné hodnotě pH klesá v řadě: dikalciumfosforečnan > oktakalciumfosforečnan > hydroxylapatit > fluorapatit (Balík et al. 2008).

Znalost různých anorganických frakcí fosforu v půdě spolu s jejich distribucí v půdě je tedy velmi důležitá pro přístup k dlouhodobé dostupnosti fosforu pro plodiny a pro formulování vhodných doporučení pro hnojiva. To pomůže nejen zvýšit biologickou dostupnost půdního

fosforu, ale také snížit znečištění vody jeho odtokem. Zvýšit účinnost aplikace fosforu, udržet produktivitu plodin, obnovit zdraví půdy a také splnit část požadavků na minerální hnojiva je nezbytné maximalizovat recyklaci fosforu ze zbytků plodin a organických a minerálních hnojiv (Mitran et al. 2016).

Organický fosfor však tvoří důležitou část celkového fosforu v půdě (30–65 %), který může být dostupný po hydrolyze na anorganické formy. Půdní organická frakce fosforu zahrnuje různé chemické formy, jež se liší svou náchylností k degradaci půdními enzymy, a tedy svou potenciální dostupností pro rostliny (Requejo & Eichler-Löbermann 2014).

Podstatnou část organického fosforu tvoří fytin (až 50 % organického fosforu), dále fosfolipidy, nukleové kyseliny, nukleoproteidy a fosforylované lipidy, které se nacházejí v kořenové hmotě a dále se do půdy dostávají posklizňovými zbytky (opad listů, strniště, vedlejší produkty – sláma, chrást, nať) a statkovými hnojivy. Velká část organicky vázaného fosforu v půdách je výsledkem biologické sorpce fosforu půdními mikroorganismy, které fosfor imobilizují do svých těl. Takto vázaný fosfor může být po odumření mikroorganismů v dalších procesech mineralizace uvolněn a zpřístupněn pro rostliny, a má tedy velký význam pro zajištění výživy rostlin fosforem (Vaněk et al. 2016).

Průměrná zásoba přístupného fosforu v zemědělské půdě ČR činí podle aktuálních výsledků 89 mg.kg⁻¹. Zemědělská půda s nízkou zásobou fosforu, která potřebuje intenzivní hnojení, představuje více než 24,76 % výměry ČR. Půda s vyhovující zásobou, která také potřebuje mírné dosycení touto živinou, zahrnuje dalších 27,42 % výměry. Hnojit a zvýšit obsah fosforu by tedy potřebovalo 52,2 % výměry zemědělské půdy ČR. Vysokou a velmi vysokou zásobu přístupného fosforu vykazuje 25,33 % výměry ČR. Přehled průměrných hodnot přístupného fosforu a podíl půd s jeho nízkou, vysokou a velmi vysokou zásobou za územně správní celky a ČR je uveden v tabulce 1 (Smatanová 2022).

Tabulka 1. Průměrná zásoba fosforu v zemědělské půdě v ČR. Upraveno dle Smatanová (2022).

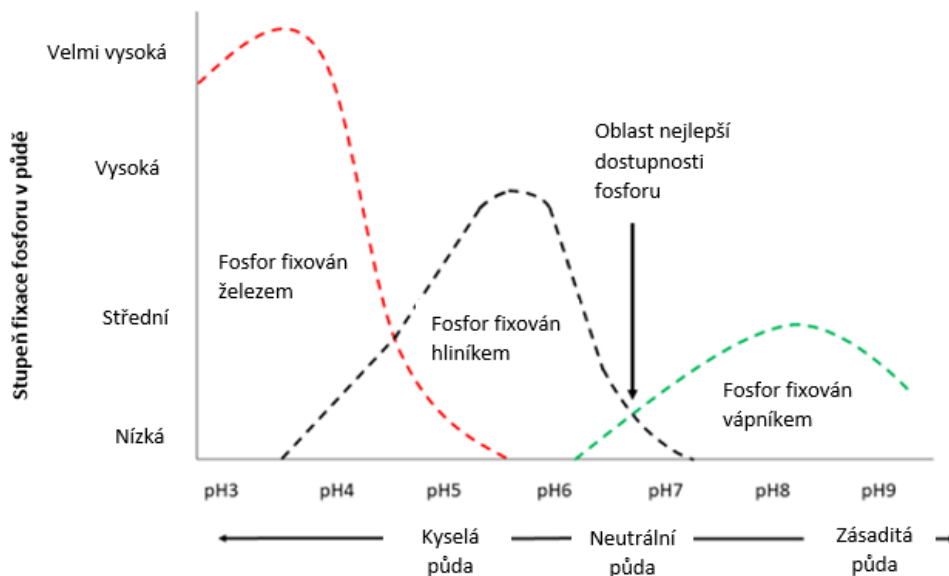
Kraj	Vážený průměr P (mg.kg ⁻¹)	Podíl půd - % výměry (vážené průměry)	
		Nízký obsah	Vysoký a velmi vysoký obsah
Praha-hl. město	74	39,38	14,12
Středočeský	93	27,15	24,98
Jihočeský	88	28,52	26,20
Plzeňský	75	32,58	20,05
Karlovarský	85	24,55	29,83
Ústecký	96	25,40	30,29
Liberecký	104	10,59	40,61
Královéhradecký	104	12,21	35,09
Pardubický	86	22,96	22,27
Vysočina	103	16,21	32,50
Jihomoravský	86	29,87	20,13
Olomoucký	88	20,63	22,81
Moravskoslezský	77	23,59	19,10
Zlínský	73	35,25	15,35
Česká republika	89	24,76	25,33

V porovnání s cyklem 2011–2016 agrochemického zkoušení zemědělských půd se obsah přístupného fosforu v cyklu 2017–2022 v absolutních hodnotách na zemědělské půdě nezměnil (90 mg.kg⁻¹). Podle kategorií zásobenosti je výměra zemědělské i orné půdy s nízkou zásobou fosforu meziročně srovnatelná (Smatanová 2022).

Sorpce fosforu je jednou z nejvíce studovaných reakcí v půdě. Sorpce může zahrnovat adsorpční a srážecí reakce. Sorpci fosforu definujeme jako ztrátu orthofosforečnanu do pevných fází půd, ke které může dojít buď adsorpcí, nebo srážením. První je specifická adsorpce nebo výměna ligandu, kdy fosforečnanový anion nahradí hydroxyl na krystalu hydratovaných Al nebo Fe struktur. Tento mechanismus je kineticky popsán jako velmi rychlý a dokončený během několika dnů. Druhý mechanismus, nespecifická adsorpce, je zprostředkován protonací hydroxylového povrchu, který vytváří kladné náboje a přitahuje záporně nabitě anionty, jako je orthofosforečnan (Iyamuremye & Dick 1996).

Proces srážecí reakce může být pomalý a může trvat roky. Půdní reakce má hlavní roli při srážení fosforu. Za alkalických podmínek Ca²⁺ řídí rozpustnost fosforu, kde orthofosforečnan snadno tvoří méně rozpustné fosforečnany vápenaté. Za kyselých podmínek řídí Al³⁺ a Fe³⁺ rozpustnost fosforu s orthofosforečnanem, který se snadno vysráží jako vysoce nerozpustné fosfátové sloučeniny (Iyamuremye & Dick 1996).

Sorpce fosforu půdou hraje důležitou roli v osudu fosforu přidávaného do půdy z minerálních hnojiv a statkových hnojiv a tím i dostupnost půdního fosforu rostlinám (Kleinman & Sharpley 2002).



Obrázek 3. Vliv pH na mobilitu fosforu v půdě. Upraveno dle Penn & Camberato (2019).

3.4 Indikátory stavu fosforu v půdě

Pro stanovení správných doporučení pro hnojení fosforem jsou zapotřebí přesné metody pro stanovení dostupnosti půdního fosforu (Ziadi et al. 2009). Dobrý extraktant simuluje schopnost kořenů přijímat živiny, extrahovat několik zájmových prvků a je vhodný pro předpověď dostupnosti fosforu v půdách, které se liší svými vlastnostmi. V praxi však může být pro konkrétní zeměpisnou oblast nebo půdu doporučen více než jeden extraktant (Azeez et al. 2013).

3.4.1 Mehlich-3

Metoda Mehlich 3, vyvinutá Adolfem Mehlichem jako víceprvková půdní extrakce, se široce používá v agronomických a environmentálních studiích pro hodnocení stavu půdního fosforu. Tato metoda je považována za účinnou v širokém spektru půdních typů a je často označována jako univerzální půdní testovací extraktant (Ziadi et al. 2009). Víceprvkové extraktanty jsou lepší než klasické metody, protože jsou nákladově efektivní a lze je analyzovat pomocí víceprvkových analyzátorů, jako je indukčně vázaná plazma (ICP), anebo mikrovlnná plazma (MP) s atomovou emisní spektroskopií (AES) (Fukuda et al. 2017).

Roztok Mehlich 3 má složení: 0,2 M kyselina octová, 0,25 M dusičnan amonný, 0,015 M fluorid amonný, 0,013 M kyselina dusičná a 0,001 M kyselina ethylendiamintetraoctová (ETDA) (Shuai et al. 2016). Dle Baranyka et al. (2007) je optimální hodnota Mehlich 3 v rozmezí 81 – 115 mg P/kg půdy.

Tabulka 2. Hodnocení obsahu přijatelného fosforu metodou Mehlich 3 + doporučené dávkování. Upraveno dle Baranyk et al. (2007).

Obsah prvku v půdě	Fosfor	
	(mg/kg)	Doporučená dávka P (kg/ha)
Nízký	Do 50	60
Vyhovující	51 – 80	45
Dobrý	81 – 115	30
Vysoký	116 – 185	15
Velmi vysoký	Nad 185	-

3.4.2 Olsen

Olsen je činidlo vhodné pro půdy, které obsahují uhličitany vápenaté a mají pH vyšší než 7 (Ippolito & Barbarick 2006). Olsenova metoda je časově náročná, protože se jedná o kolorimetrickou metodu a pro analýzu fosforu je třeba použít postup například s kyselinou askorbovou. Navíc, aby byla tato metoda spolehlivá a reprodukovatelná, je třeba pečlivě dodržovat některá pravidla; například pH extrakčního roztoku musí být upraveno na 8,5 a denně kontrolováno, protože je nestabilní (Iatrou et al. 2014).

Tabulka 3. Hodnocení obsahu přijatelného fosforu metodou Olsen + doporučené dávkování. Upraveno dle Kunzová (2009).

Kategorie zásobenosti	mg P/kg	EVH v OJ t/ha Dávky hnojiva v kg P/ha		
		<5,0	5,0 – 6,0	>6,0
Nízký	<26	30	35	40
Vyhovující	27 – 35	20	15	30
Dobrý	36 – 45	10	15	20
Vysoký	46 – 57	0	10	15
Velmi vysoký	>58	0	0	0

3.4.3 Ostatní indikátory

3.4.3.1 AEM

Membrány se používají jak v laboratoři, tak v in situ pro měření toků fosforečnanů v půdách a jsou považovány za jeden z lepších ukazatelů biologicky dostupného fosforu. Tyto metody jsou založeny na výměně membránově vázaného protiontu, jako je chlorid nebo uhličitán. Jejich principem je simulovat působení příjem aniontů kořeny rostlin (Bentley et al. 1999). Metoda AEM vyžaduje 18hodinovou extrakci. Během období extrakce mohou frakce fosforu v půdě kolísat, což vede k nepřesným a proměnlivým měřením (Drake et al. 2014).

3.4.3.2 Bray-1

Metoda Bray-1 je použitelná pro kyselé půdy (Nasukawa et al. 2019). Bray 1 obsahuje 0,025 M HCl a 0,03 M NH₄F o pH roztoku 2,6 (Stevens et al. 2018). Touto extrakční metodou

se obecně zjišťuje množství půdního fosforu a může extrahovat formy fosforu, které nejsou přímo rostlině dostupné (Six et al. 2013).

3.4.3.3 Morgan

Morganův test se používá k extrakci fosforu v půdě dostupného pro rostliny a je široce používán v Irsku, Massachusetts, Vermontu, Maine, Connecticutu a ve státech Rhode Island v USA pro doporučení nebo plánování hnojiv (Croffie et al. 2022). Roztok Morgan (1,25 M octan sodný, pufovaný na pH = 4,8) je slabší extrakční roztok, který neobsahuje fluor a je navržen tak, aby napodoboval výměnu exsudátů kořenů rostlin s labilním fosfátem (Young et al. 2017).

3.4.3.4 CAL

Extraktant CAL je doposud používán v především v Rakousku a Německu. Roztok je díky vyšší koncentraci reagensů, vyšší pufovací schopnosti extrakčního činidla a menším poměru navážky půdy k činidlu méně ovlivňován přítomností karbonátů, a proto v alkalických půdách extrahuje více fosforu než Mehlich 3 (Kulhánek et al. 2021). Složení činidla CAL je 0,30 M CH₃COOH, 0,05 M octanu vápenatého a 0,05 M mléčnanu vápenatého (Zbiral & Němec 2002).

3.5 Indikátory stavu fosforu v rostlině

K hodnocení přijatého množství fosforu rostlinou se nabízí využití obsahu fosforu v nadzemní biomase uváděného nejčastěji v procentech nebo mg fosforu na kilogram suché hmotnosti rostlinné biomasy. Obsah fosforu v nadzemní biomase rostlin se však mění v závislosti na růstu rostlin, proto musí být optimální obsah fosforu v rostlinných pletivech vztažen vždy k určité vývojové fázi, což s sebou přináší komplikace v přesnosti určení toho, kdy má rostlina živiny dost, a kdy už naopak trpí jejím nedostatkem. Indikátory výživného stavu rostlin fosforem, které berou v potaz zředovací efekt během vegetace a jejichž hodnoty jsou v průběhu růstu rostlin stabilnější než prostý obsah živiny, jsou poměr N/P a PNI (Sedlár et al. 2020a). Jednotlivé rostliny se příliš neliší v nároku na fosfor, jeho příjem je rovnoměrný po celou dobu vegetace (Kejř 2007).

3.5.1 Fosfor v rostlině

Testování rostlinných pletiv umožňuje posoudit nutriční stav plodin a lze je použít k úpravám hnojení fosforem, aby se lépe vyrovnaly dávky fosforu s potřebami plodin. Tradiční experimentální metody pro stanovení obsahu fosforu v rostlinách jsou však komplikované a časově náročné, což je činí neefektivními pro odhad vhodných aplikačních dávek fosforečného hnojiva. Sušení vzorků navíc vede k přeměně organofosforečnanu na anorganický a může zvýšit koncentraci anorganického fosforečnanu v pletivu (Kong et al. 2022).

Dle Bečka et al. (2007) je optimální obsah fosforu v sušině nadzemní biomasy u ozimé řepky během fáze jarní regenerace 0,48 % a ve fázi kvetení 0,46 %.

3.5.2 Poměr N/P

Zvýšená atmosférická depozice dusíku v posledních desetiletích zvýšila dostupnost dusíku ve srovnání s jinými prvky. Výsledkem je, že dříve dusíkem limitovaná vegetace se v některých případech stala nadměrně zásobenou dusíkem a omezena fosforem nebo jinými minerálními prvky (Güsewell 2004). U rostlin s vyššími koncentracemi dusíku a fosforu je poměr N/P nižší (Veneklaas et al. 2012). Nicméně kritické poměry N/P se mezi rostlinnými druhy a mezi vývojovými stádii liší, a proto rozsah 14–16 nelze použít univerzálně (Wanek & Zotz 2011). Dle Grzebisz et al. (2019) je poměr N/P v listech ozimé řepky ve fázi růžice (BBCH 30) od 9,7 do 20,4. Poměr N/P v listech ozimé řepky ve fázi vývoje květenství (BBCH 57-59) je od 9,7 do 15,7.

3.5.3 PNI

Minimální koncentrace fosforu v pletivech potřebná k dosažení maximální biomasy plodiny je vhodným analytickým nástrojem pro posouzení stavu výživy plodiny fosforem. Tento koncept, původně vyvinutý pro dusík v různých plodinách, je založen na předpokladu, že mezi koncentracemi živin a akumulací biomasy existuje alometrický vztah. Vydělením skutečné koncentrace fosforu v rostlinné biomase hodnotou kritické koncentrace je vyjádřen výživný stav rostlin fosforem (PNI) se zohledněním zřed'ovacího efektu (Nyiraneza et al. 2021). PNI dokáže efektivně rozlišit nedostatek fosforu v rostlině, jeho optimální hladinu nebo jeho nadbytek během období reprodukčního růstu. Potvrzení dostatku fosforu v tomto období může pomoci provést nápravná opatření, zejména v zavlažovaných podmínkách (Xie et al. 2022). Optimální hodnota PNI je 1, menší hodnota představuje nedostatek fosforu a vyšší hodnota než 1 ukazuje na nadbytek fosforu (Vistoso et al. 2021).

Aplikací fosforečných listových hnojiv v sezóně by se napravit nedostatek fosforu, zlepšila se produkce fotoasimilátů a zlepšila se tvorba sušiny a translokace z vegetačních orgánů do semen, i když pouze omezené množství fosforu může být absorbováno do rostliny prostřednictvím listů. Proto může PNI odhadnout dostatečnost výživy fosforem, což by představovalo rychlou a nákladově efektivní možnost. Tato metodika nabízí spolehlivý způsob, jak korigovat výživu fosforem během kritického období růstu a zajistit maximální výnosy, aniž byste museli při seti aplikovat velké dávky fosforu. Tato strategie by mohla pomoci dosáhnout mnohem efektivnějšího využití fosforečného hnojiva a minimalizovat náklady a ohrožení životního prostředí spojené s aplikací fosforu ve vysokých dávkách (Xie et al. 2022).

3.6 Hnojení fosforem

Udržitelné hnojení fosforem je celosvětově jednou z ekonomicky a ekologicky důležitých strategií zemědělského managementu pro produkci plodin. Nízká dostupnost půdního fosforu rostlinami je však jedním z limitujících faktorů pro podporu ekonomické produkce plodin (Ortas & Islam 2018). Zlepšení účinnosti používání fosforečných hnojiv pro růst plodin vyžaduje lepší získávání fosforu rostlinami z půdy. Vzhledem k tomu, že pouze 15–30 % aplikovaného fosforečného hnojiva přijmou plodiny v roce jeho aplikace (Veneklaas et al.

2012). Zbývající fosfor se hromadí v půdě a je potenciálně k dispozici pro příjem plodinami v následujících letech (Bastani & Hajiboland 2017).

Při aplikaci fosforečných hnojiv do půdy se více než 80 % fosforu akumuluje v půdě prostřednictvím mnoha procesů a mechanismů, jako je sorpce, srážení, mikrobiální mobilizace a imobilizace fosforu a další procesy (Wang et al. 2019).

V současné době jsou hlavním zdrojem fosforu surové fosfáty, neobnovitelný zdroj, který se stává vzácným a drahým. Asi 90 % fosfátů je určeno pro výrobu potravin, 82 % se používá v hnojivech, 7 % jako krmivo pro zvířata a 1–2 % pro potravinářské přísady (Oliveira & Machado 2013). V roce 2021 byly v Maroku zjištěny zásoby přibližně 50 miliard metrických tun surových fosfátů, což z něj činí zemi s největšími zásobami této komodity na světě. Celkově existují celosvětové zásoby fosfátových hornin ve výši přibližně 71 miliard metrických tun (Garside 2021). Vzhledem k tomu, že jde o neobnovitelný zdroj, očekává se vrchol produkce fosforečanů kolem roku 2030–2040, pokud současná poptávka po hnojivech zůstane konstantní (Oliveira & Machado 2013).

Tabulka 4. Zásoby fosfátových hornin po celém světě v roce 2021 podle zemí od Garside (2021).

Stát	Množství (mil. tun)	Stát	Množství (mil. tun)
Maroko	50000	Saúdská Arábie	1400
Čína	3200	Austrálie	1100
Egypt	2800	Finsko	1000
Alžírsko	2200	Spojené Státy	1000
Brazílie	1600	Jordánsko	1000
Jižní Afrika	1600	Rusko	600

Pro základní hnojení používáme zpravidla tuhá hnojiva. Kapalná volíme pro přihnojení v průběhu vegetace nebo při seti „pod patu“. Jejich aplikace bývá realizována současně s hnojivy draselnými prostřednictvím směsí jednosložkových hnojiv, nebo případně společně s hnojivy kombinovanými (Baranyk et al. 2005). V každém případě je nutné tuhá fosforečná hnojiva zapracovat (pro malou vertikální pohyblivost fosforu) do celého orničního profilu. Nejvhodnější termín hnojení fosforečnými hnojivy je koncem léta nebo na podzim, kdy lze hnojiva při zpracování půdy dobře zapravit do orničního profilu (výjimkou jsou periody sucha zhoršující zpracovatelnost půdy). Pro zvýšení účinnosti dodávaného fosforu a jeho využitelnosti rostlinami je především nutné upravit půdní reakci tak, aby se pH půdy pohybovalo ideálně v rozpětí 6,0 – 7,0. Úpravu hodnoty pH půdy vápněním je však nutné provádět v dostatečném časovém předstihu před aplikací fosforečných hnojiv. Půdní prostředí je rozhodující pro volbu hnojiva. Na kyselejších půdách se lépe uplatňují granulované formy hnojiv typu superfosfátů, anebo se mohou používat ve vodě nerozpustná fosforečná hnojiva – fosfáty. Pro půdy neutrální až zásadité jsou vhodné všechny druhy superfosfátů (Čermák et al. 2019).

3.6.1 Minerální fosforečná hnojiva

Ve fosforečných hnojivech je zvláště důležitá rozpustnost fosforu. Ve skutečnosti je dostupnost pro rostliny podmíněna rozpustností fosforečných sloučenin v půdní vodě. V důsledku toho mohou fosfority poskytovat živiny rostlinám pouze tehdy, je-li fosfor rozpustný v průmyslovém procesu. V polních podmínkách k rozpustnosti dochází pouze v případě subkyselých půd (pH 5,5–6,5), ale je každopádně velmi pomalá. Mnohem častěji dochází k opačné reakci, tj. ke srážení rozpustných forem fosforu (Sambo & Nicoletto 2017).

3.6.1.1 Superfosfáty

Superfosfát jednoduchý – základní složka je $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. Nedoporučuje se jím hnojit na kyselých půdách, protože o-dihydrogenfosforečnanový iont se váže na hliník a železo, jestliže není sorpční komplex nasycen vápníkem. Je vhodný pro půdy výše od slabě kyselého pH. Superfosfát granulovaný dvojitý – základní složka je $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Obsahuje 14,4 % fosforu (33 % P_2O_5). Dodává se ve formě šedých až šedohnědých granulí. Je vhodnější na kyselé půdy než superfosfát jednoduchý a je vhodný na slabě kyselé půdy až po neutrální. Superfosfát granulovaný trojitý – základní složka je $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. Obsahuje 19,8 % fosforu (45 % P_2O_5). Dodává se ve formě šedých až šedohnědých granulí. Nehodí se pro půdy bohatě zásobené vápníkem s vyšším obsahem železa a vápníku a pro půdy silně kyselé (Kunzová 2009).

3.6.1.2 Hyperfosfáty

Hyperkorn je fosforečné hnojivo obsahující MgO, vyrábí se ve formách Hyperkorn 11,3 % fosforu (26 % P_2O_5) + 2 % MgO a Hyperkorn 11,3 % fosforu (26 % P_2O_5) + 2,5 % MgO. Dodává se v granulované formě. Je vhodný i do kyselých půd a využití fosforu se zvýší kombinací s organickým hnojením. Uvolňování fosforu ve formě ortofosforečnanových iontů je pozvolné, a proto je vhodný pro zásobní hnojení, zvláště pastvin (Kunzová 2009).

3.6.1.3 Amofos

Je šedobílé granulované organominerální hnojivo s 12 % obsahem N a 52 % obsahem P_2O_5 . Podstatnou složkou je fosforečnan amonný, který se získává z apatitového koncentráту neutralizací kyseliny fosforečné amoniakem. Dodávají se různé druhy s kolísajícím obsahem dusíku a fosforu. Z celkového obsahu fosforu je min. 40 % vodorozpustného P_2O_5 (Vozár et al. 2018).

3.6.1.4 Mleté fosfáty

Z fosforitů se nejlépe osvědčují gafsafosfáty původem z Tunisu s průměrným obsahem 12,4 % fosforu (28,5 % P_2O_5). Při jemnosti 0,063mm je fosforit Gafsa ve svém účinku na kyselých půdách rovnocenný superfosfátu. Doporučuje se v kombinaci s organickým hnojením (Kunzová 2009).

3.6.1.5 Dolofos

Vyskytuje se ve dvou formách Dolofos 15 – obsahuje 6,5 % fosforu (15 % P_2O_5) a Dolofos 26 – obsahuje 11,3 % fosforu (26 % P_2O_5) (Kunzová 2009). Dolofos se používá zejména k hnojení kyselých půd, ale můžeme jím hnojit i na půdách slabě kyselých a neutrálních. Fosfor, vápník a hořčík působí pomaleji, což je výhodné zejména na lehčích a středních půdách. Nejvhodnější období pro použití Dolofosu je na podzim po sklizni při orbě a přípravě půdy k setí, nebo na jaře při předseťové přípravě. Hnojivo může být přednostně použito k zásobnímu hnojení fosforem pro všechny plodiny. Po aplikaci hnojiva je vhodné jeho zapravení do půdy. O dávce Dolofosu rozhoduje rozbor půdy na obsah přípustného fosforu (Anonym 1).

3.6.2 Organická fosforečná hnojiva

Odpady zvířat a lidí se již dlouho používají jako hnojiva, zejména v Evropě, Asii a v Číně. Dokonce i někteří američtí indiáni prý zakopali mrtvou rybu do každého kukuřičného pole, aby zvýšili výnosy. Takové materiály obsahují malá procenta fosforu a dalších rostlinných živin, které jsou rostlinami asimilovatelné. V minulosti se v Asii a Evropě používala surová odpadní voda na plodiny, ale objemově nemělo množství velký význam. Ve Spojených státech a většině evropských zemí se použití surové odpadní vody považuje za nepřijatelné. Některé komunální čistírny odpadních vod získávají přijatelná hnojiva s nízkým obsahem živin po použití speciálních sterilizačních procesů, odstranění těžkých kovů a sušení. Získaný objem hnojiv je však malý. Mezi další organické materiály tradičně používané jako hnojiva s využitelným obsahem živin patří guáno (usazeniny nahromaděného ptačího trusu), rybí moučka a kostní moučka. Organické zdroje fosforu v hnojivech dnes představují méně než 1 % celkové celosvětové spotřeby (Roy 2017).

3.6.2.1 Čistírenské kaly

Kaly z čistíren odpadních vod mohou být pro půdy zajímavým zdrojem živin a organické hmoty. Jelikož se jedná o odpadní materiály, je nutné, aby neobsahovaly znečišťující prvky (zejména těžké kovy) a patogeny pro rostliny, zvířata a člověka. Kaly mohou být rozmístěny po půdě nebo použity při kompostování spolu s jinými materiály. V zemědělství jsou přímo využitelné kaly pocházející z čištění odpadních vod pocházejících výhradně z civilních nebo výrobních zařízení s podmínkou, že jejich vlastnosti se podstatně neliší od vlastností civilních kalů. Využití v zemědělství je povoleno pouze tehdy, pokud byly kaly upraveny (Sambo & Nicoletto 2017).

Fosfor lze získat z popela nebo výluhů čistírenských kalů. Výroba fosforu z výluhů čistírenských kalů byla v posledním desetiletí svědkem velkého zájmu díky své flexibilitě, pokud jde o konečné produkty a nízkou spotřebu energie ve srovnání s regenerací fosforu z popela. Regenerace fosforu z čistírenských kalů je skutečně univerzální a může přinést mnoho různých vysoce hodnotných fosforečných hnojiv, jako je struvit, fosforečnan vápenatý a vivianit. Pro tento postup se obvykle používá kapalná frakce vyhnílého kalu. Výsledek je omezen rozpuštěným fosforem v kalu, což je přibližně 5–20 % celkového fosforu (Sun et al. 2022).

3.6.2.2 Kostní moučka

Mleté zvířecí kosti mohou být dobrým zdrojem fosforu pro zemědělské využití, protože představují hojnou surovinu z místních zdrojů pro výrobu hnojiv na bázi kostí (Hurisso et al. 2021). Surové zvířecí kosti běžně obsahují 8–10 % fosforu (20–25 % P_2O_5), a jsou tedy poměrně bohatým zdrojem. Mleté kosti jako hnojivo se začaly komerčně používat v Evropě na počátku devatenáctého století. Kostní moučka je vyráběna dodnes, ale pouze ve velmi malém množství, především pro zásobování pomalu dostupnými živinami pro skleníkové a pokojové rostliny. Kolem roku 1830 bylo zjištěno, že předúprava kostní moučky zředěnou kyselinou sírovou značně zvýšila dostupnost fosforu pro rostliny a tento proces výroby se stal běžným. Zahájení této výroby je zjevným začátkem rozvoje průmyslu minerálních hnojiv. Vzhledem k tomu, že zásoba kostí byla velmi omezená, bylo brzy (asi 1840) zjištěno, že podobná úprava těžené fosforečné rudy kyselinou učinila fosfor „dostupným“ jako hnojivo. Tak se zrodil stále důležitý „superfosfátový“ průmysl (Roy 2017).

3.6.2.3 Drůbeží trus

Drůbeží trus je objemný, vydává nepříjemný zápach a je obtížné s ním manipulovat, ale je cenným zdrojem živin, který lze recyklovat a použít v rostlinné výrobě. Karbonizace hnoje snižuje hmotnost, objem a nepříjemný zápach a výsledný produkt se snadněji přepravuje, skladuje a aplikuje na poli. Karbonizovaný kuřecí trus (CCM) je až pětikrát bohatší na obsah fosforu ve srovnání se sušeným (Tagoe et al. 2010).

CCM je nový materiál pro úpravu půdy, který je relativně levnější než anorganické fosforečné hnojivo, má nízký obsah dusíku, ale vysoký obsah fosforu a je snadno dostupný (Tagoe et al. 2010).

Aplikace CCM do půdy zvyšuje pH půdy a tím i dostupnost fosforu. Zlepšuje provzdušňování v rhizosféře, zvyšuje schopnost půdy zadržovat vodu a zvyšuje obsah organické hmoty v půdě a hladiny výměnného draslíku a hořčíku (Tagoe et al. 2010).

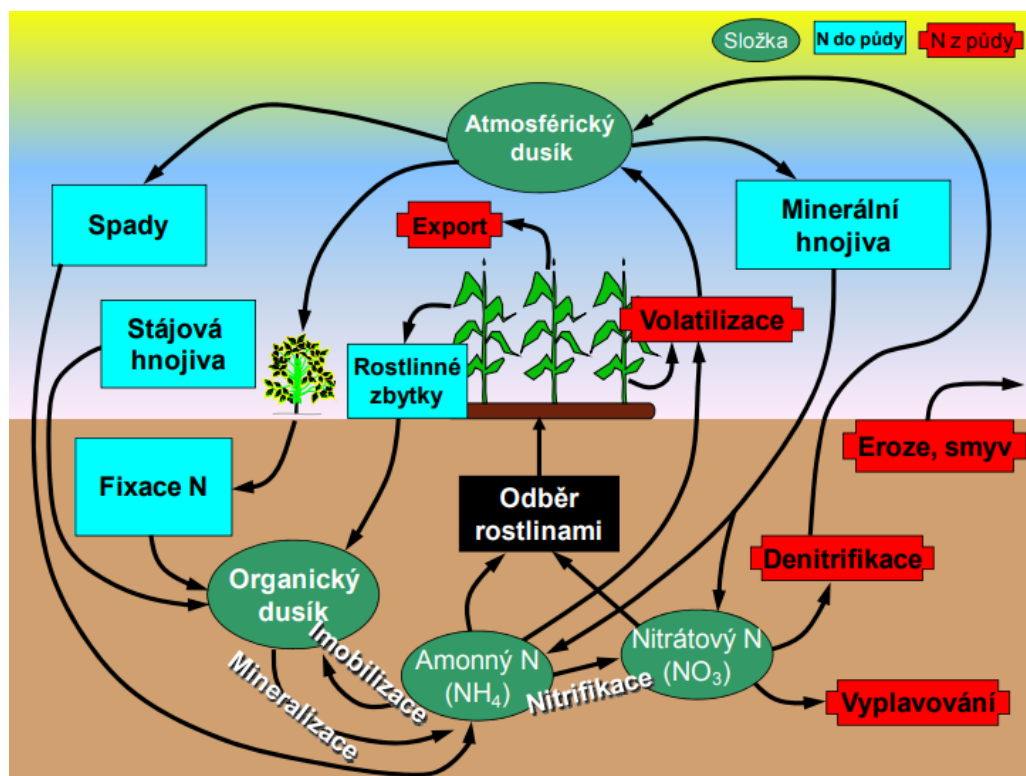
Ptačí guáno obsahuje různé koncentrace fosforu, typicky v rozmezí od 0,12 do 16 % fosforu v sušině (Zhong et al. 2017). Guáno mořského ptáka ovlivňuje hladiny mikroživin, pH půdy, vlhkost půdy a salinitu půdy, i když tyto účinky jsou proměnlivější. Tyto změny půdních charakteristik způsobené guánem často vedou k podstatným změnám v mnoha aspektech rostlinných společenstev, včetně změn v celkovém rostlinném pokryvu, rostlinné biomase a stavu rostlinných živin (Young et al. 2011).

3.7 Dusík

Dusík a fosfor patří mezi nejdůležitější prvky, které udržují stabilní výnos u mnoha zemědělských plodin (Krouk & Kiba 2020). Jejich vzájemná interakce napomáhá k výživě rostlin například tvarováním kořenové architektury prostřednictvím větvení kořenů a zvýšení kolonizace houbami arbuskulární mykorhizy (Schleuss et al. 2020).

Dusík s uhlíkem představují nejvýznamnější prvky v koloběhu živin v přírodě. Mají rozhodující postavení ve všech živých soustavách a značný vliv na životní prostředí. Dusík je

nepostradatelnou živinou nejen pro rostliny, ale pro všechny živé organismy, včetně půdních mikroorganismů. Patří k základním stavebním prvkům nejdůležitějších sloučenin živé hmoty – bílkovin. Koloběh dusíku v přírodě je znázorněn na následujícím schématu (Vaněk et al. 2016).



Obrázek 4. Koloběh dusíku v přírodě. Dle Balík et al. (2012).

3.8 Dusík v půdě

Většina dusíku v půdě (98-99 %) se nachází v organické formě. Ke zdrojům organického dusíku patří zejména biomasa mikroorganismů, metabolity organismů žijících v půdě, rostlinné a živočišné zbytky. Rozložitelné organické dusíkaté látky jsou v půdě činností půdních mikroorganismů mineralizovány až na výsledný amoniak, který může být sorpčně poután a z půdního roztoku je přijímán rostlinami, nitrifikován nebo denitrifikován. Vedle rozkladu organických dusíkatých látek v půdě však dochází též k syntéze nových látek na bázi dusíku (Mikanová & Šimon 2013).

Stanovení obsahu N a jeho forem je důležité pro pochopení dynamiky a přeměn dusíku v půdě a pro určení hnojení dusíkatými hnojivy tak, aby nedocházelo k degradaci půdní organické hmoty a byla zachována trvale udržitelná úrodnost orných půd (Balík et al. 2012).

3.9 Dusík v rostlině

Dusík tvoří v rostlinách podstatnou součást aminokyselin, bílkovin i enzymů a koenzymů, chlorofylu, nukleových kyselin a jiných látek. Podporuje především růst výhonků a tvorbu zelené listové hmoty. Při porušení syntézy bílkovin dochází k hromadění dusíku v rostlinách ve formě nitrátů (Kunzová et al. 2012).

Rostliny přijímají dusík ve formě kationtu amonného – NH_4^+ , nebo aniontu nitrátového (dusičnanového) – NO_3^- . O příjmu obou iontů rozhodují hlavně vnější podmínky, ale i sama rostlina. Výrazný vliv na příjem iontů dusíku vykazuje pH prostředí. V půdách s kyselějším pH převažuje příjem NO_3^- a v půdách s neutrálním až alkalickým pH se příjem obou iontů vyrovnává nebo je vyšší příjem NH_4^+ . Také teplota zasahuje do příjmu těchto iontů – při nižší teplotě se snižuje příjem a využití NO_3^- (Vaněk et al. 2016).

Dusík je klíčovou složkou chlorofylu, zintenzivňuje fotosyntézu v plodinách. Nepravidelný obsah dusíku ovlivňuje výnos rostlin. Množství dusíku potřebné pro každou plodinu se liší. Barva listů je indikátorem stavu živin mnoha rostlin, zejména obsahu chlorofylu v listu. Barva a textura listu určuje stav dusíku v plodině, protože nedostatek dusíku mění barvu listu. Pokud je barva listu zelená, znamená to, že je list zdravý, a pokud rostlina trpí nedostatkem dusíku, bývá žlutý (Haider et al. 2021).

Při nadbytku dusíku dochází k prodloužení vegetační doby. U rostlin vzrůstá náchylnost na napadení chorobami a škůdci a rostliny zvyšují svou citlivost k abiotickým stresům. U řepky má vliv zvýšený obsah bílkovin na snížení olejnatosti semen. Mezi obsahem bílkovin a oleje v semenech působí antagonistický vztah (Hassan et al. 2007).

Rostliny postupně využívají přijatý minerální dusík k tvorbě organických dusíkatých sloučenin. Zatímco NH_4^+ mohou rostliny bezprostředně využít k syntéze aminokyselin, nitrátový dusík musí být nejprve převeden (redukován) na amonný dusík (Vaněk et al. 2016).

Rostlina dokáže dusík efektivně přesouvat. Během vegetace je nejvyšší obsah dusíku v listech. Tento dusík je následně reutilizován pro tvorbu semen. Původně bylo součástí aminokyselin v listech až 95 % dusíku obsaženého v semenech (Xu et al. 2012).

4 Metodika

4.1 Odběr vzorků z polních provozů

Vzorky půdy a nadzemní biomasy byly odebírány z polních provozních ploch v letech 2015 – 2020 v okresech Hradec Králové, Kutná Hora, Chomutov, Litoměřice, Louny, Mělník, Mladá Boleslav, Nymburk, Přerov a Znojmo. Vzorky nadzemní biomasy rostlin byly odebrány na výšku strniště cca 3 cm. Rostlinné vzorky byly vysušeny při teplotě 45 °C. Vzorky nadzemní biomasy ozimé řepky byly odebírány na začátku kvetení řepky (BBCH 61 - 65).

Půdní vzorky byly odebrány vždy jen jednou během vegetace s první odebíranou růstovou fází, odebírán byl půdní profil 0 – 30 cm.

Půdní reakce byla stanovena jako výměnné pH v 0,01 mol/l roztoku CaCl₂ (1:2,5 w/v), doba třepání 60 minut (Zbiral et al. 2016).

4.2 Chemické analýzy

Rostlinný materiál byl mineralizován rozkladem na suché cestě (Mader & Čurdová 1997). Obsah živin v půdě a rostlinách byl stanoven optickou emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem na přístroji ICP-OES Agilent 720 (Agilent Technologies Inc., USA).

Obsah přijatelného fosforu v půdě ve výluhu dle Olsena byl stanoven fotometricky na přístroji Lambda 25 (Perkin Elmer, USA) při vlnové délce 660 nm. Vyextrahované fosforečnany jsou při tomto stanovení reakcí s molybdenanem redukovány chloridem cínatým na molybdenovou modř.

Pro stanovení celkového obsahu dusíku v rostlinné biomase byl použit rozklad na mokré cestě v prostředí kyseliny sírové (1:20 w/v) katalyzovaný práškovým selenem. Obsah celkového dusíku v nadzemní biomase byl stanoven metodou podle Kjeldahla na přístroji Vapodest 50S (Gerhardt, Spolková republika Německo). Rostlinný materiál určený k analýzám byl homogenizován laboratorním střížným mlýnem SM100 (Retsch, Spolková republika Německo).

Půda byla po vysušení při laboratorní teplotě zhomogenizována a přeseta na sítu s velikostí ok 2 mm. Přístupný obsah živin v půdě byl stanoven metodami uvedenými v tabulce 7.

Tabulka 5. Sledované způsoby stanovení obsahu přijatelných živin v půdě

Vyluhovadlo	Vyluhovací poměr w/v	Doba třepání	Zdroj
Mehlich 3	1:10	10 minut	Mehlich 1984
Olsen (0,5 mol/l NaHCO ₃)	1:20	2 h	Olsen et al. 1954

4.4 Výpočet PNI

Pro výpočet indexu výživy rostlin fosforem byl kritický obsah fosforu v nadzemní biomase řepky (P_c) vypočítán dle následujících modelů:

$$P_c = 1,74 + 0,024N \text{ (Bélanger et al. 2015)}$$

$$P_c = 0,21 \% \text{ fosforu ve fázi počátku kvetení řepky (Pinkerton 1991)}$$

N je obsah dusíku v nadzemní biomase udávaný v g/kg sušiny. Hodnota P_c je vyjádřena v g/kg.

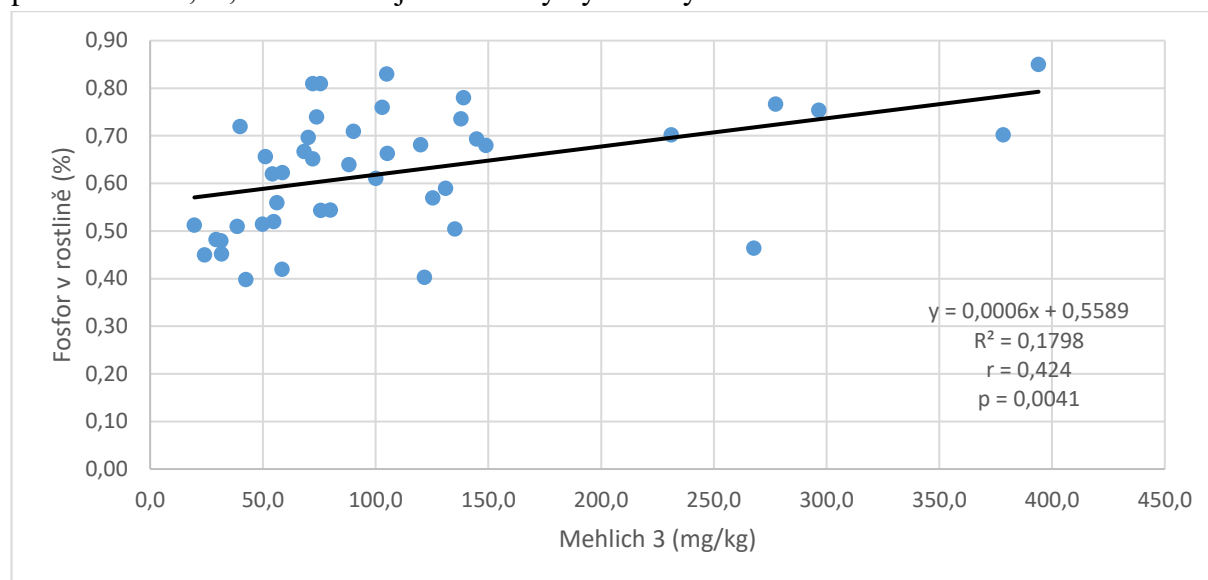
Index výživy rostlin fosforem (PNI) byl vypočítán jako poměr obsahu fosforu naměřeného v nadzemní biomase rostlin a kritického obsahu fosforu (Fontana et al. 2021).

4.5 Statistické hodnocení vzorků

Statistické šetření bylo provedeno v programu Statistica 13 (TIBCO Software Inc., USA), za využití modelu korelační matice a regresní a korelační analýzy. Vzniklé grafy a matice byly upraveny v programu Microsoft Excel a hodnoceny metodou, čím je regresní koeficient blíže 1,0, tím silnější vztah mezi sledovanými parametry existuje, 0,0 – 0,2 velmi slabý vztah, 0,2 – 0,4 slabý, 0,4 – 0,6 středně silný, 0,6 – 0,8 silný a 0,8 – 1,0 velmi silný vztah (Anonym 2).

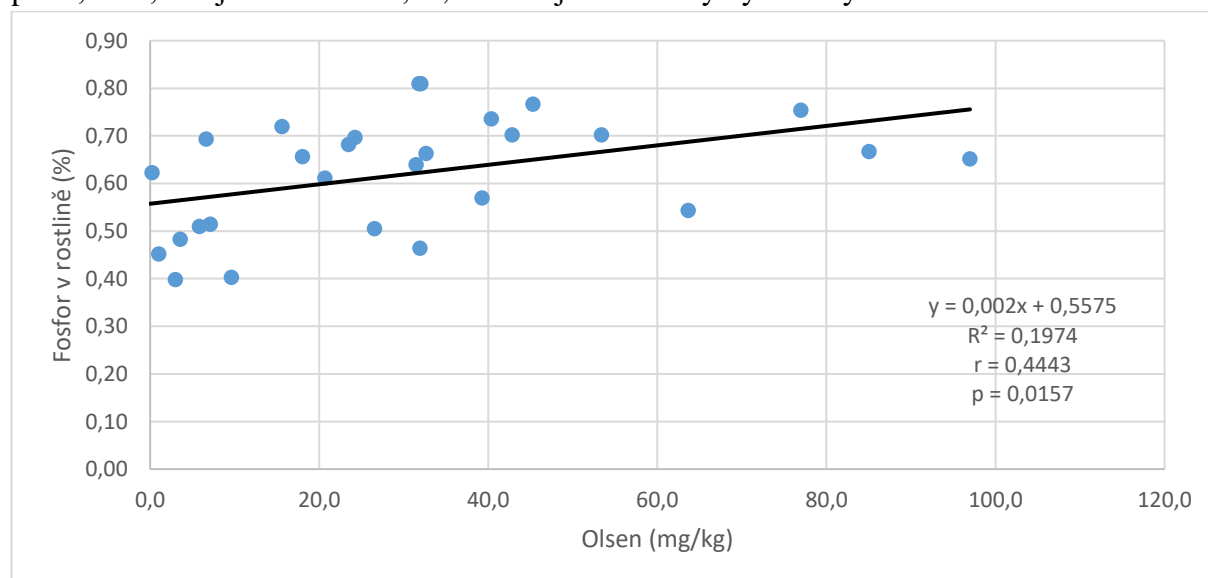
5 Výsledky

Z grafu 1, který popisuje regresní vztah obsahu fosforu v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu na obsah přístupného fosforu v půdě stanoven extrakčním činidlem Mehlich 3, je patrná hodnota koeficientu determinace (R^2) 0,1798. Korelační analýzou byl tento vztah vyhodnocen jako středně silný. Dle statistiky je hodnota p menší než 0,05, takže existuje statisticky významný vztah.



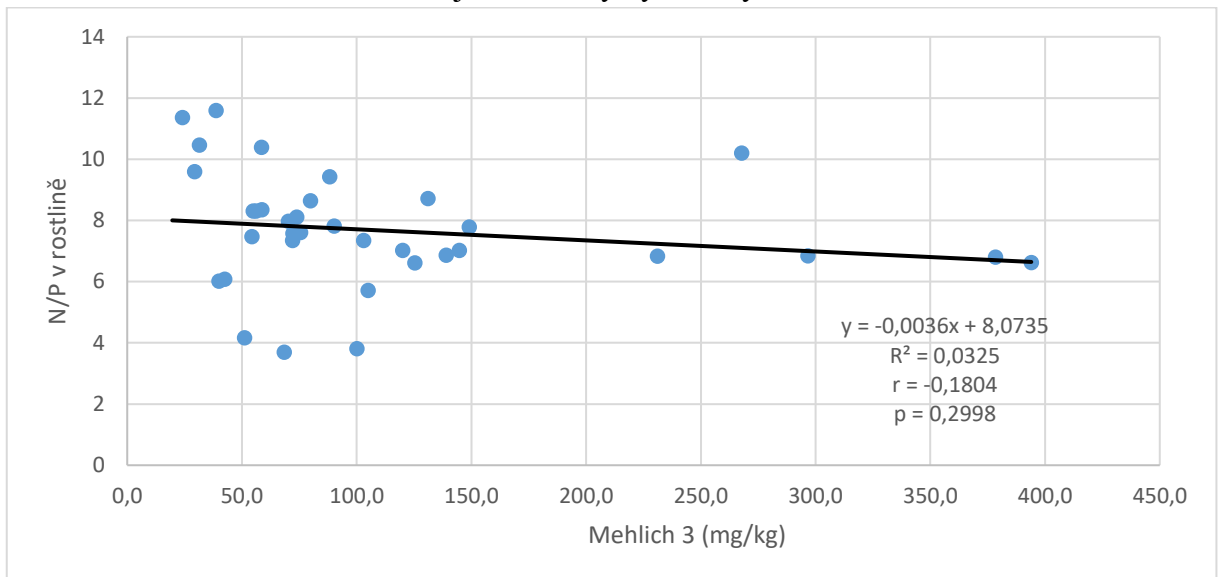
Graf 1. Závislost obsahu fosforu v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu na obsah přístupného fosforu v půdě (Mehlich 3)

Graf 2 uvádí závislost obsahu fosforu v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu na obsah přístupného fosforu v půdě zjištěný metodou Olsen. Korelační analýza tento vztah vyhodnotila jako střední, protože je $r = 0,4443$. Dle statistiky je hodnota $p = 0,0157$, což je menší než 0,05, a existuje statisticky významný vztah.



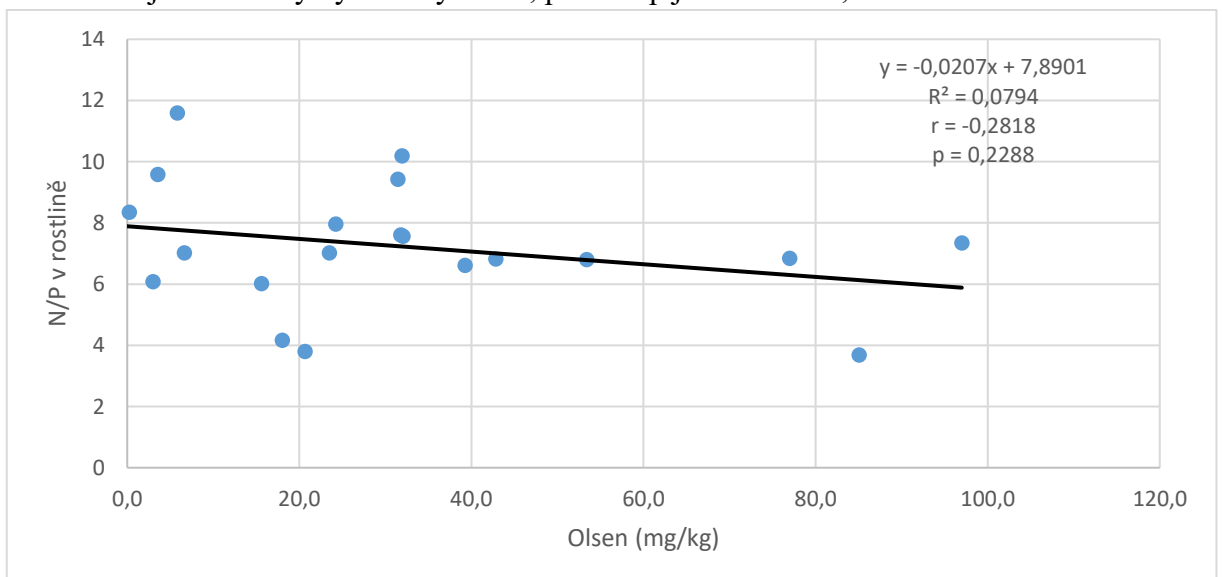
Graf 2. Závislost obsahu fosforu v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu na obsah přístupného fosforu v půdě (Olsen)

Bodový graf 3 znázorňuje závislost poměru N/P v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu na obsah přístupného fosforu v půdě zjištěný za pomoci činidla Mehlich 3. Z grafu vyplývá velmi slabá negativní korelace. Dle statistiky je hodnota p vyšší než 0,05, což znamená, že neexistuje statisticky významný vztah.



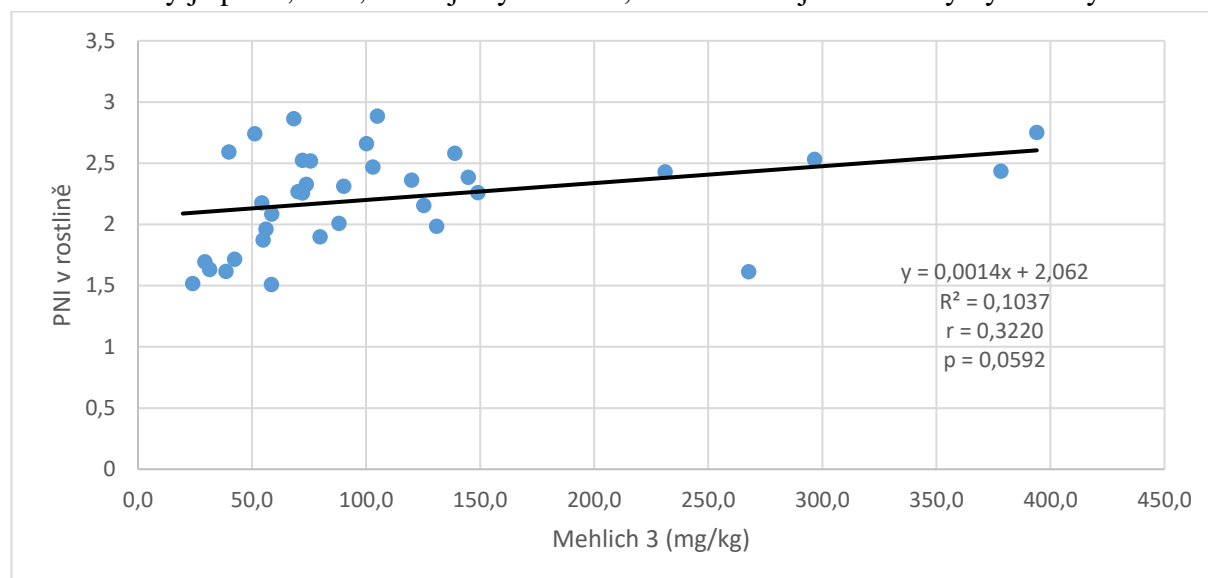
Graf 3. Závislost poměru N/P v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu na obsah přístupného fosforu v půdě (Mehlich 3)

Graf 4 popisuje regresivní vztah poměru N/P v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu na obsah přístupného fosforu v půdě zjištěný metodou Olsen. Z grafu je patrná negativní slabá korelace. Dle statistiky je hodnota $p = 0,2288$ a z toho vyplývá, že neexistuje statisticky významný vztah, protože p je větší než 0,05.



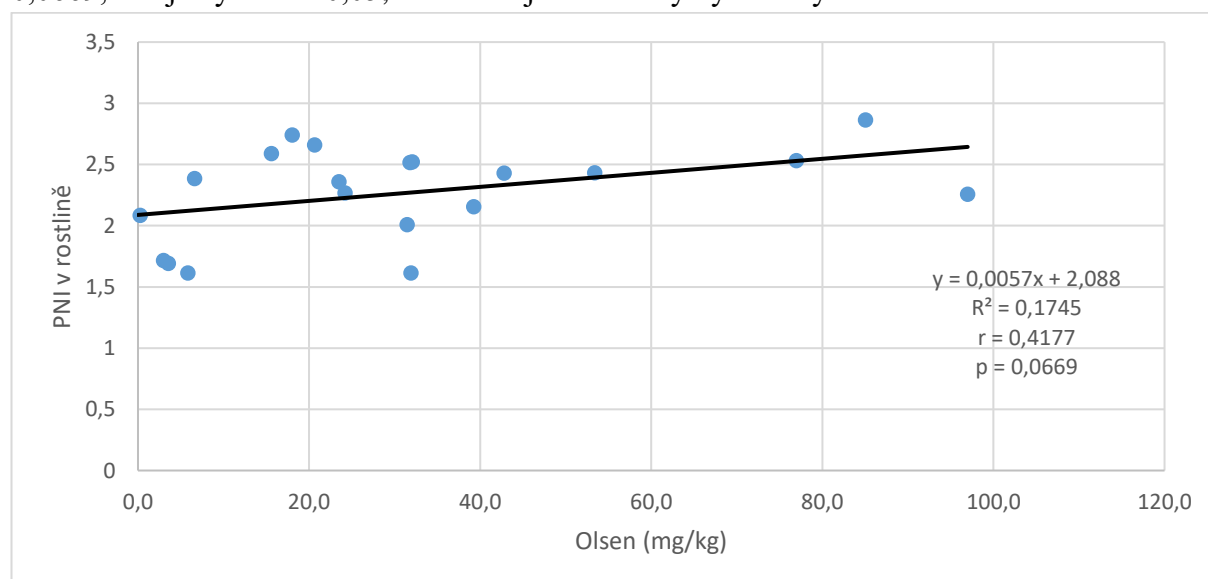
Graf 4. Závislost poměru N/P v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu na obsah přístupného fosforu v půdě (Olsen)

Graf 5 ukazuje závislost PNI v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu na obsah přístupného fosforu v půdě, který byl zjištěn za pomoci extrakční metody Mehlich 3. Z grafu je patrná pozitivní slabá korelace, protože je $r = 0,322$. Dle statistiky je $p = 0,0592$, takže je vyšší než $0,05$ a neexistuje statisticky významný vztah.



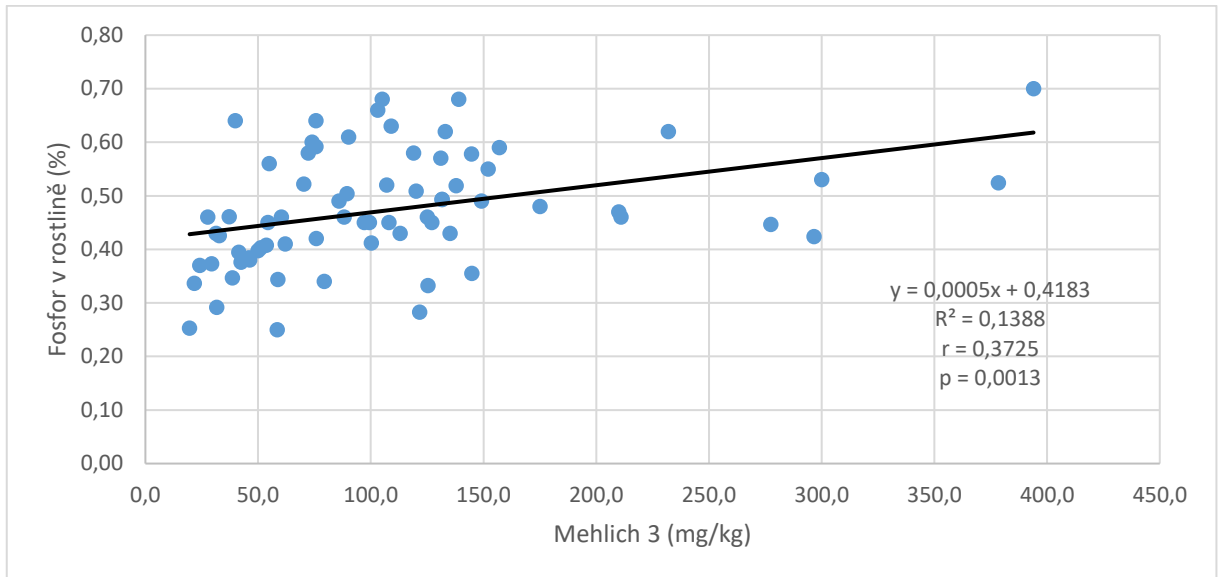
Graf 5. Závislost PNI v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu na obsah přístupného fosforu v půdě (Mehlich 3)

Bodový graf 6 znázorňuje závislost PNI v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu na obsah přístupného fosforu v půdě zjištěný s pomocí metody Olsen. Z grafu je patrná středně silná pozitivní korelace. Ze statistiky vyplývá, že je hodnota $p = 0,0669$, což je vyšší než $0,05$, a neexistuje statisticky významný vztah.



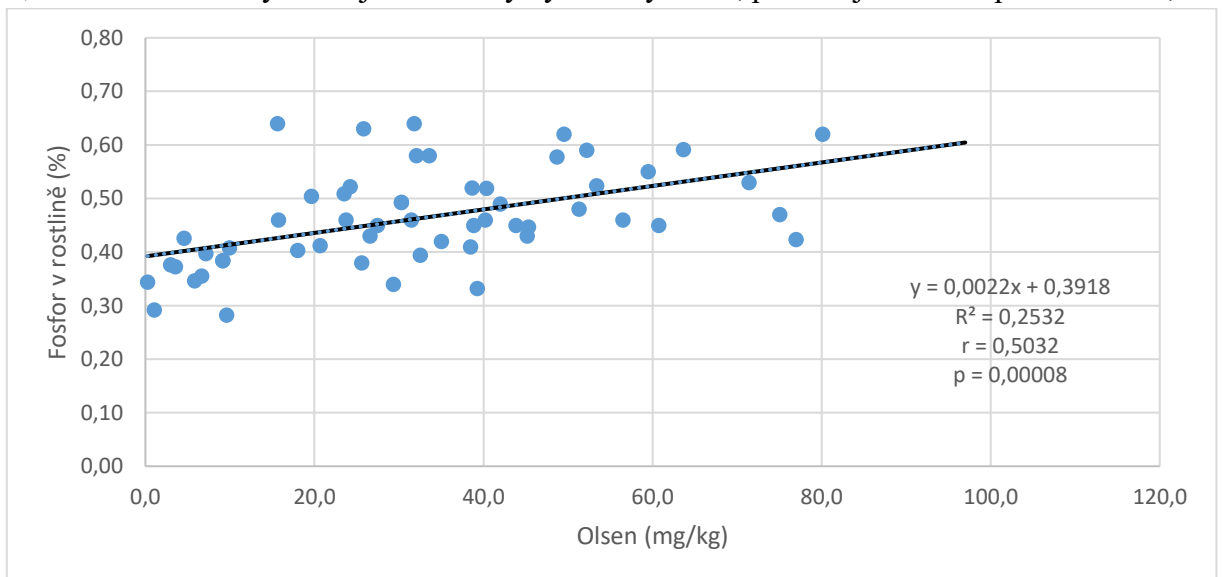
Graf 6. Závislost PNI v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu na obsah přístupného fosforu v půdě (Olsen)

Z grafu 7, který popisuje regresivní vztah obsahu fosforu v nadzemní biomase ozimé řepky během fáze začátku kvetení na obsah přístupného fosforu v půdě stanoven extrakčním činidlem Mehlich 3, je patrná hodnota koeficientu determinace (R^2) 0,1388. Korelační analýzou byl tento vztah vyhodnocen jako slabá korelace ($r = 0,3725$). Dle statistiky je hodnota $p = 0,0013$, což je menší než 0,05, a existuje statisticky významný vztah.



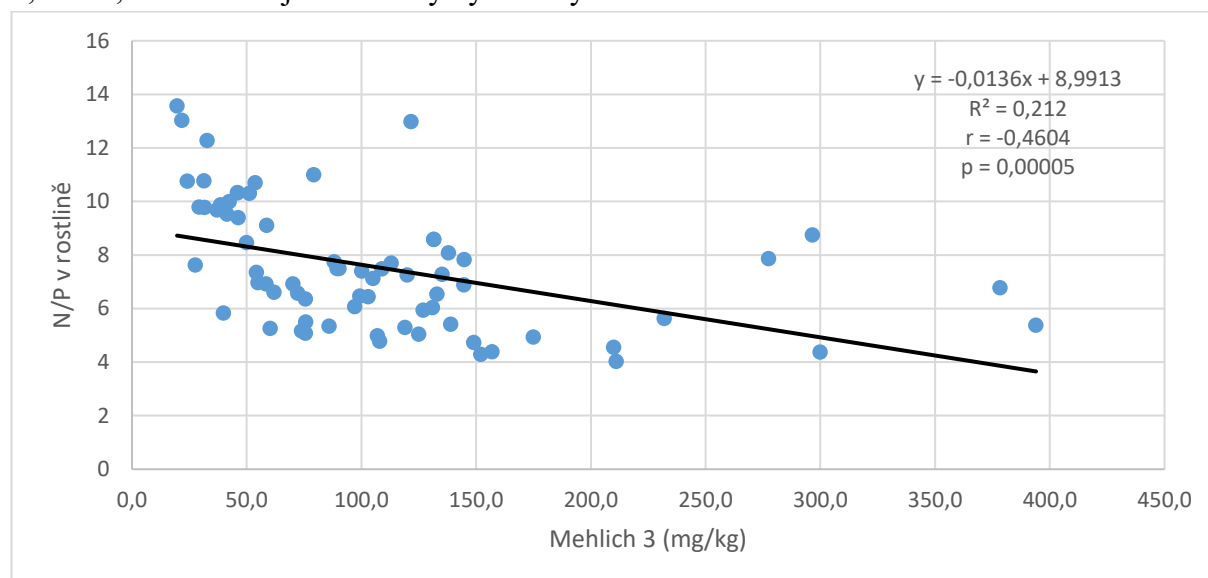
Graf 7. Závislost obsahu fosforu v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsah přístupného fosforu v půdě (Mehlich 3)

Bodový graf 8 popisuje regresní vztah obsahu fosforu v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsah přístupného fosforu v půdě zjištěný za pomoci metody Olsen. Korelační analýzou byl tento vztah vyhodnocen jako pozitivní a středně silný, protože $r = 0,5032$. Dle statistiky existuje statisticky významný vztah, protože je hodnota p menší než 0,05.



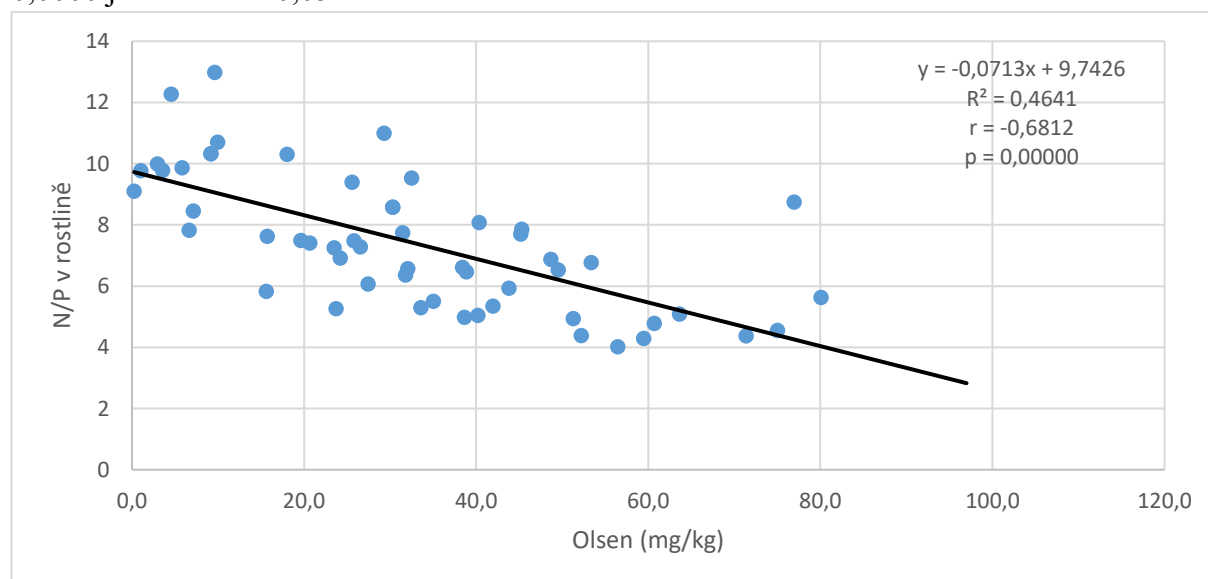
Graf 8. Závislost obsahu fosforu v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsah přístupného fosforu v půdě (Olsen)

Graf 9 znázorňuje závislost poměru N/P v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsah přístupného fosforu v půdě zjištěný extrakčním činidlem Mehlich 3. Z grafu vyplývá negativní korelace, která je dle metodiky středně silná. Dle statistiky je hodnota $p = 0,00005$, takže existuje statisticky významný vztah.



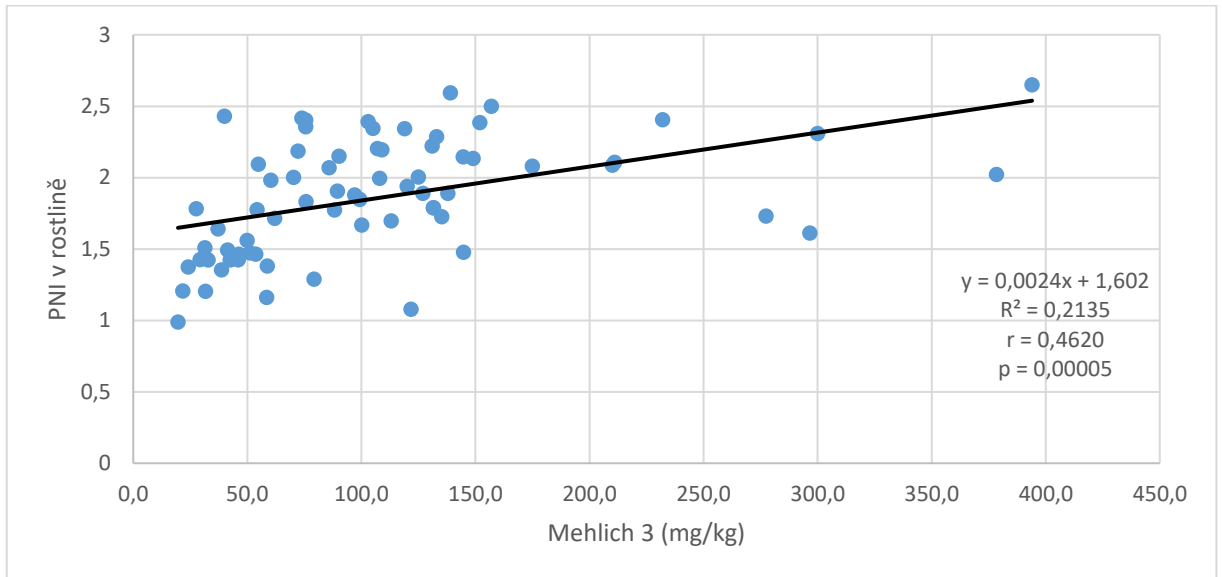
Graf 9. Závislost poměru N/P v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsah přístupného fosforu v půdě (Mehlich 3)

Graf 10 ukazuje závislost poměru N/P v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsah přístupného fosforu v půdě, který byl zjištěn díky metody Olsen. Z grafu je patrná silná negativní korelace. Dle statistiky existuje statisticky významný vztah. Hodnota $p = 0,0000$ je menší než 0,05.



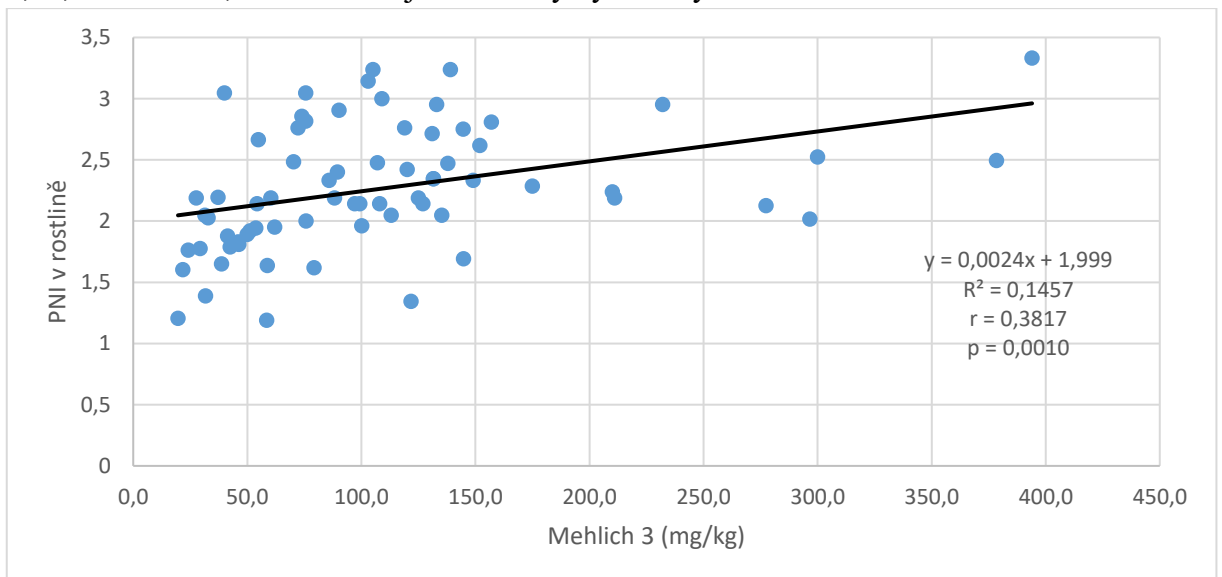
Graf 10. Závislost poměru N/P v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsah přístupného fosforu v půdě (Olsen)

Bodový graf 11 popisuje regresní vztah PNI s P_c dle Bélanger et al. (2015) v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsah přístupného fosforu v půdě, který byl zjištěn metodou Mehlich 3. Korelační analýzou je zjištěn pozitivní středně silný vztah. Zde existuje statisticky významný vztah, protože r je menší než 0,05.



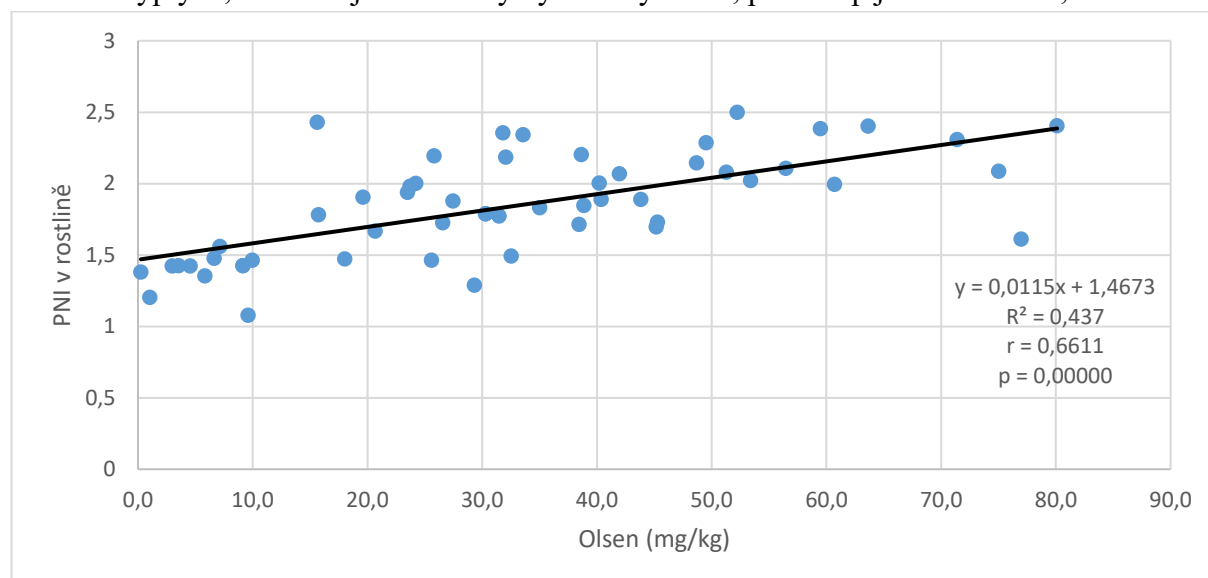
Graf 11. Závislost PNI s P_c dle Bélanger et al. (2015) v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsah přístupného fosforu v půdě (Mehlich 3)

Graf 12 popisuje regresní vztah PNI s P_c dle Pinkerton (1991) v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsah přístupného fosforu v půdě zjištěn Mehlichem 3. Z grafu vyplývá pozitivní korelace, která je dle metodiky slabá. Dle statistiky je hodnota p menší než 0,05, to znamená, že zde existuje statisticky významný vztah.



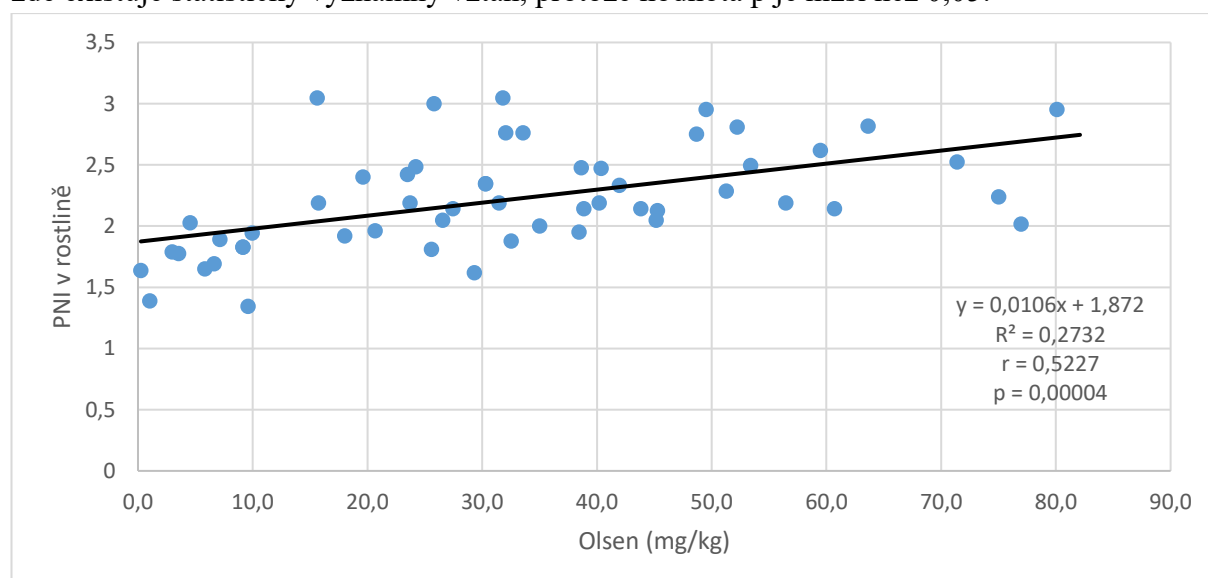
Graf 12. Závislost PNI s P_c dle Pinkerton (1991) v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsahu přístupného fosforu v půdě (Mehlich 3)

Graf 13 znázorňuje závislost PNI s P_c dle Bélanger et al. (2015) v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsah přístupného fosforu v půdě, který byl zjištěn metodou Olsen. Z grafu je patrná silná pozitivní korelace. Dle statistiky je hodnota $p = 0,00000$ a z toho vyplývá, že existuje statisticky významný vztah, protože p je menší než 0,05.



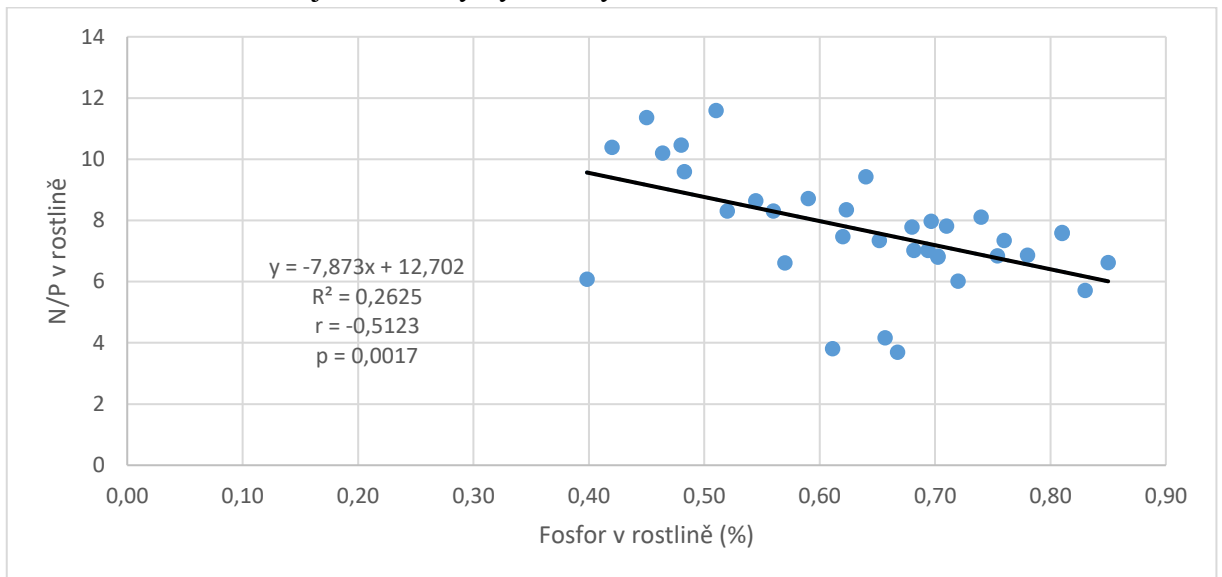
Graf 13. Závislost PNI s P_c dle Bélanger et al. (2015) v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsahu přístupného fosforu v půdě (Olsen)

Z grafu 14, který popisuje závislost PNI s P_c dle Pinkerton (1991) v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsah přístupného fosforu v půdě zjištěný metodou Olsen, je patrná pozitivní korelace, která je dle metodiky středně silná. Statistika ukázala, že zde existuje statisticky významný vztah, protože hodnota p je nižší než 0,05.



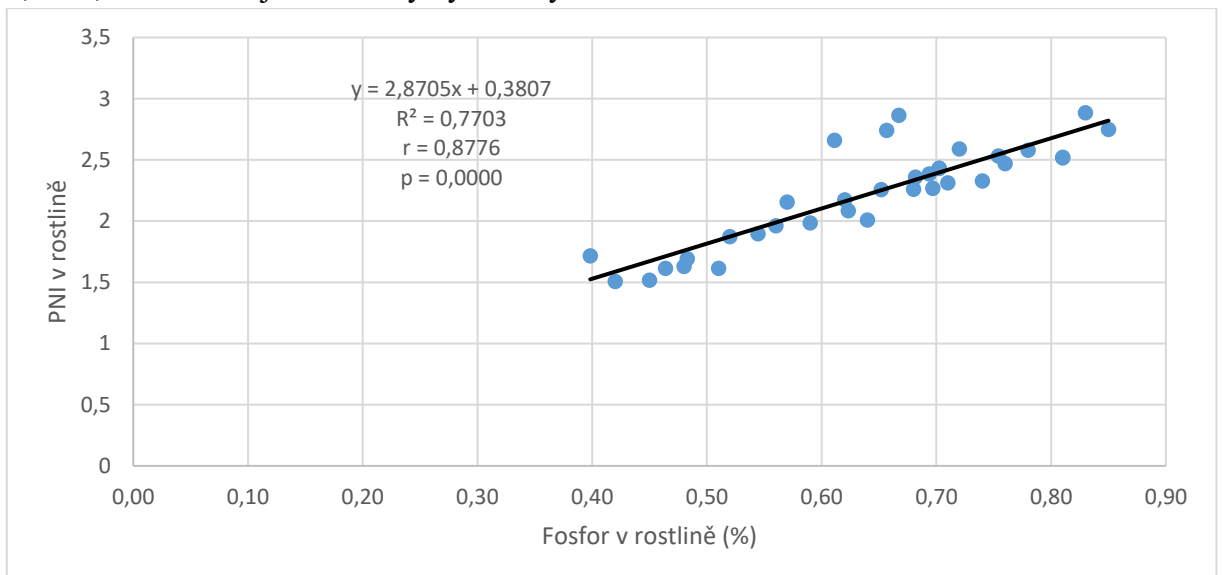
Graf 14. Závislost PNI s P_c dle Pinkerton (1991) v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsahu přístupného fosforu v půdě (Olsen)

Graf 15 uvádí závislost poměru N/P v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu na obsah fosforu v rostlině. Korelační analýza tento vztah vyhodnotila jako negativní středně silný, protože je $r = -0,5123$. Dle statistiky je hodnota $p = 0,0017$, což je menší než $0,05$, a existuje statisticky významný vztah.



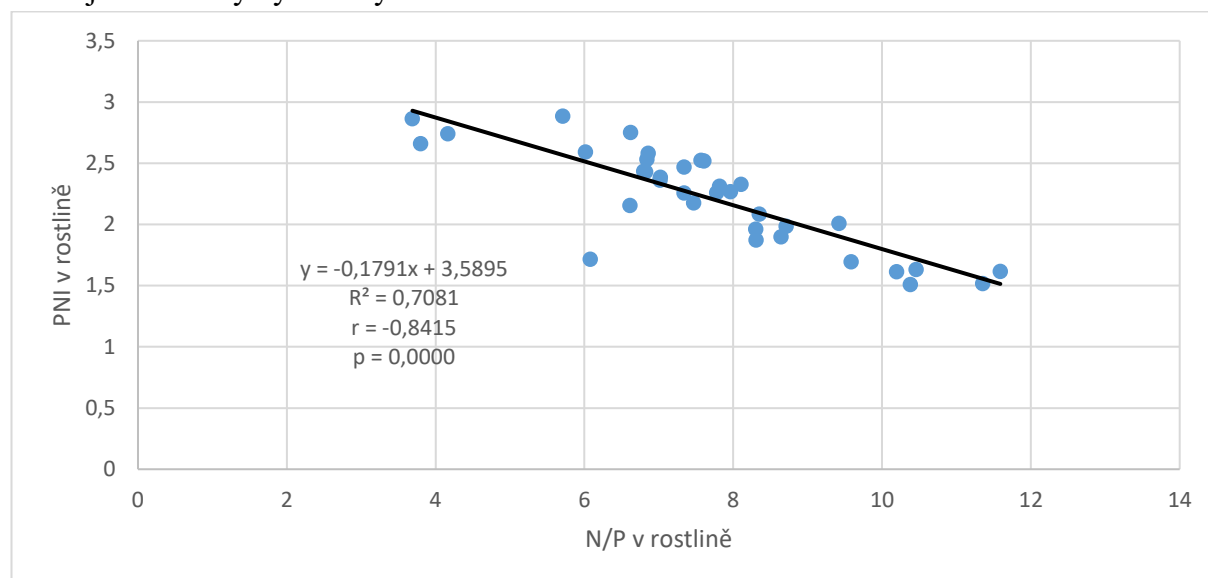
Graf 15. Závislost N/P na fosfor v rostlině v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu.

Graf 16 znázorňuje závislost PNI s P_c dle Bélanger et al. (2015) v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu na obsah fosforu v rostlině. Z grafu vyplývá pozitivní korelace, která je dle metodiky velmi silná. Dle statistiky je hodnota $p = 0,0000$, takže existuje statisticky významný vztah.



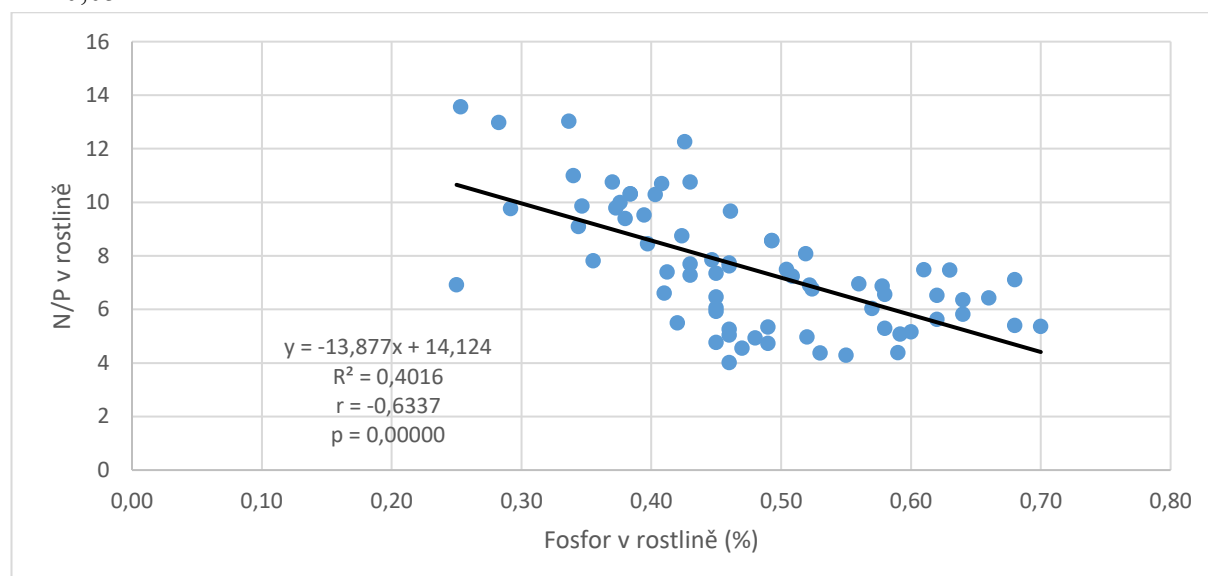
Graf 16. Závislost PNI s P_c dle Bélanger et al. (2015) na fosfor v rostlině v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu.

Graf 17 znázorňuje závislost PNI s P_c dle Bélanger et al. (2015) v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu na N/P v rostlině. Z grafu vyplývá negativní korelace, která je dle metodiky velmi silná. Dle statistiky je hodnota $p = 0,0000$, takže existuje statisticky významný vztah.



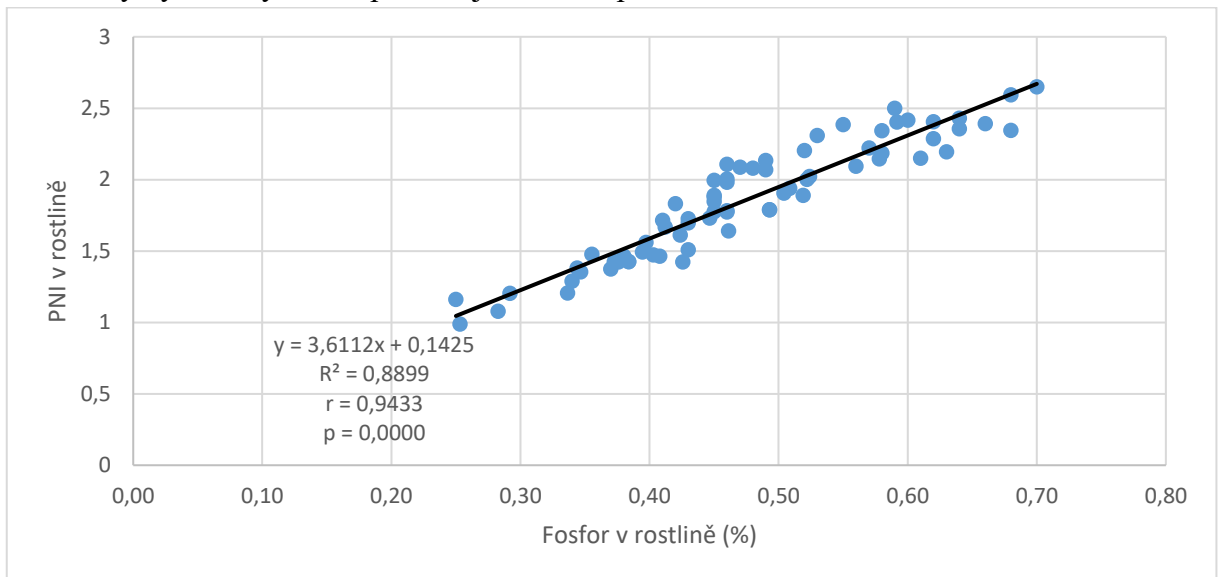
Graf 17. Závislost PNI s P_c dle Bélanger et al. (2015) na N/P v rostlině v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku prodlužovací fáze růstu.

Z grafu 18, který popisuje závislost poměru N/P v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsah fosforu v rostlině, je patrná negativní korelace, jež je dle metodiky silná. Statistika ukázala, že zde existuje statisticky významný vztah, protože hodnota p je nižší než 0,05.



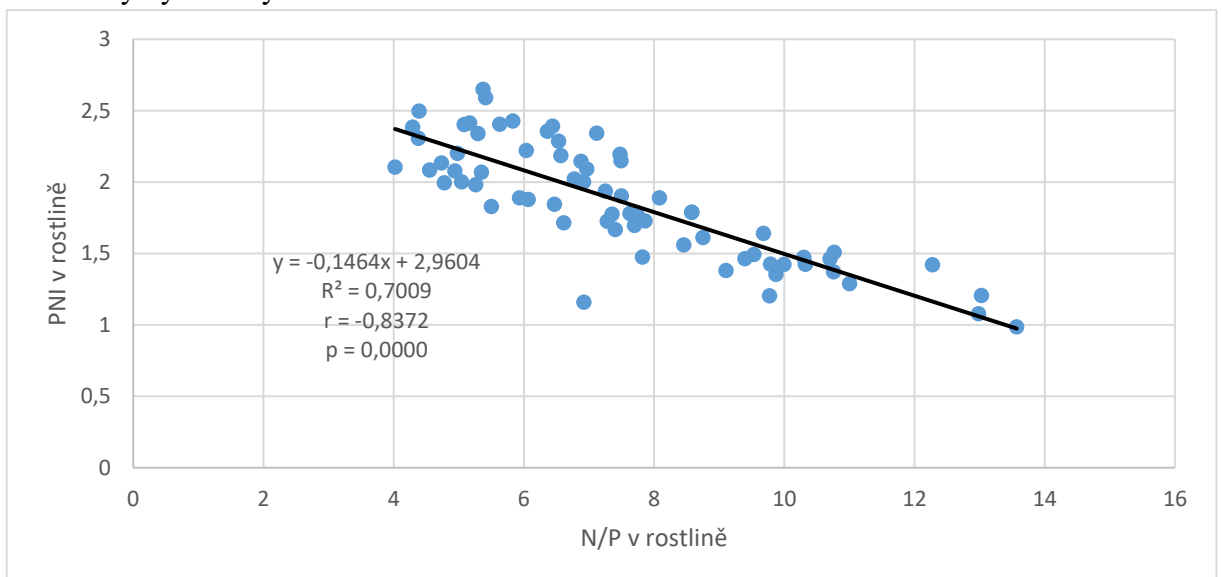
Graf 18. Závislost N/P na fosfor v rostlině v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení.

Bodový graf 19 popisuje regresní vztah PNI s P_c dle Bélanger et al. (2015) v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsah fosforu v půdě. Korelační analýzou byl tento vztah vyhodnocen jako pozitivní a velmi silný, protože $r = 0,9433$. Dle statistiky existuje statisticky významný vztah, protože je hodnota p menší než 0,05.



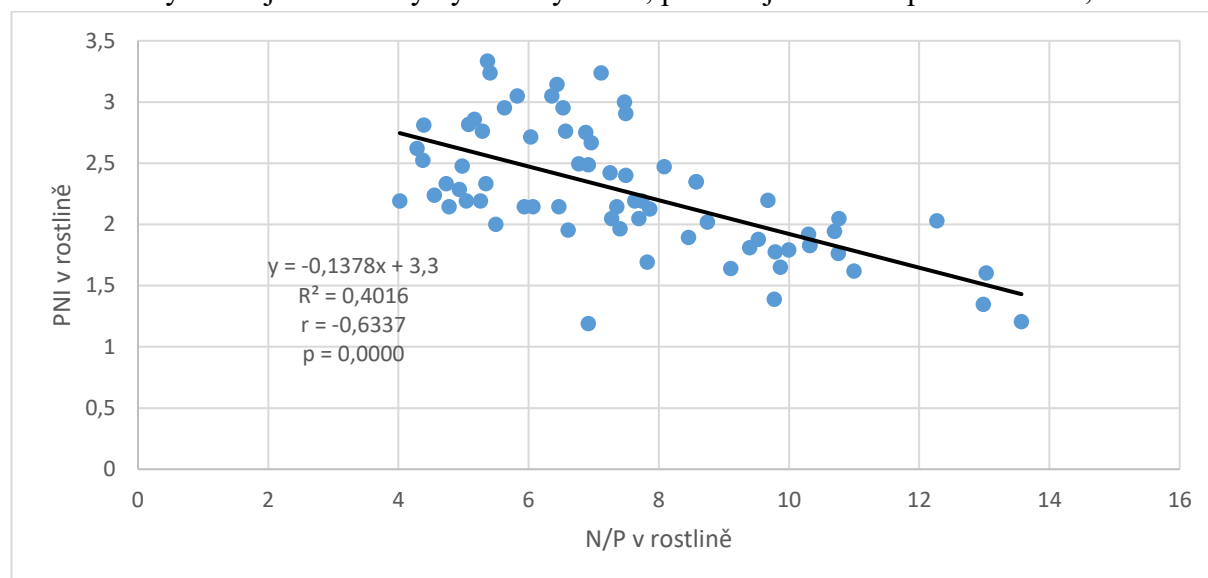
Graf 19. Závislost PNI s P_c dle Bélanger et al. (2015) na fosfor v rostlině v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení.

Graf 20 znázorňuje závislost PNI s P_c dle Bélanger et al. (2015) v nadzemní biomase ozimé řepky během počátku kvetení na poměr N/P v rostlině. Z grafu vyplývá negativní korelace, která je dle metodiky velmi silná. Dle statistiky je hodnota $p = 0,0000$, takže existuje statisticky významný vztah.



Graf 20. Závislost PNI s P_c dle Bélanger et al. (2015) na N/P v rostlině v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení.

Bodový graf 21 popisuje regresní vztah PNI s P_c dle Pinkerton (1991) v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení na obsah fosforu v rostlině definovaný poměrem N/P. Korelační analýzou byl tento vztah vyhodnocen jako negativní a silný, protože $r = -0,6337$. Dle statistiky existuje statisticky významný vztah, protože je hodnota p menší než 0,05.



Graf 21. Závislost PNI s P_c dle Pinkerton (1991) na N/P v rostlině v nadzemní biomase ozimé řepky během začátku kvetení.

Mezi fosforem v půdě zjištěným extrakčními činidly a indikátory fosforu v rostlině ve fázi prodlužovacího růstu řepky pro kyselou i alkalickou půdu nebyl průkazný žádný vztah.

V tabulce 6 jsou uvedeny korelační vztahy mezi fosforem v půdě v kyselém prostředí a fosforem v nadzemní biomase řepky během začátku kvetení. Fosfor v půdě byl extrahován metodami Olsen a Mehlich 3. Mezi rostlinnými indikátory jsou fosfor v rostlině, N/P a dva indexy výživy fosforem. U metody Mehlich 3 zde dochází u všech indikátorů ke slabé korelaci, ale pouze N/P a PNI s P_c dle Bélanger et al. (2015) dosáhly nad hladinu významnosti. U metody Olsen jsou všechny vztahy silné a všechny korelace statisticky významné.

Tabulka 6. Korelační matice pro kyselou půdu v době růstu řepky ve fázi začátku kvetení.

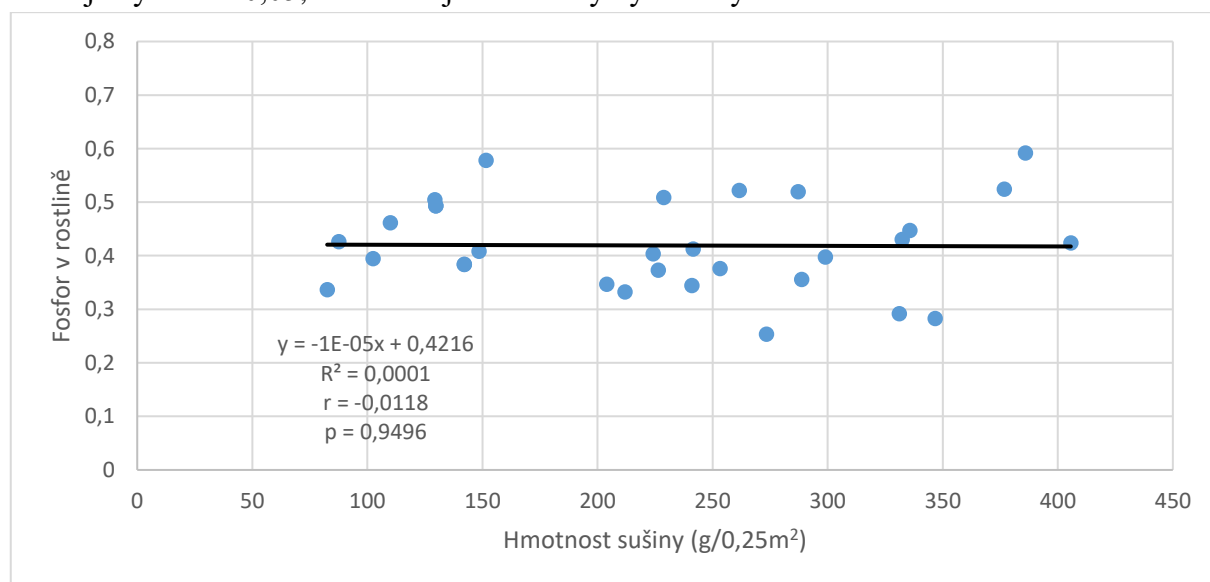
Proměnné	Korelace: označ. korelace jsou významné na hlad. < 0,05000			
	Fosfor v rostlině (%)	N/P v rostlině	PNI s P_c dle Bélanger et al. (2015)	PNI s P_c dle Pinkerton (1991)
Mehlich 3 (mg/kg)	0,294354	-0,368204	0,341968	0,294354
Olsen (mg/kg)	0,607929	-0,687177	0,689508	0,607929

Korelační matice, která byla upravena do podoby tabulky 7, popisuje korelační vztahy mezi fosforem v půdě v alkalickém prostředí extrahovaný činidly Mehlich 3 a Olsen a mezi indikátory fosforu v řepce během fáze počátku kvetení. U metody Mehlich 3 s indikátory fosfor v rostlině a PNI s Pc dle Pinkerton (1991) dochází ke slabé korelaci, která není statisticky významná. U indikátorů N/P a PNI s Pc dle Bélanger et al. (2015) dochází ke střední korelaci se statisticky významným vztahem. U metody Olsen s indikátory fosfor v rostlině a PNI s Pc dle Pinkerton (1991) dochází ke slabé korelaci bez statistické významnosti. U indikátorů N/P a PNI s Pc dle Bélanger et al. (2015) dochází k významnému statistickému vztahu s metodou Olsen, ale indikátor N/P se vyznačuje silnou korelací oproti PNI s Pc dle Bélanger et al. (2015), kde je korelace střední.

Tabulka 7. Korelační matice pro alkalickou půdu v době růstu řepky ve fázi začátku kvetení.

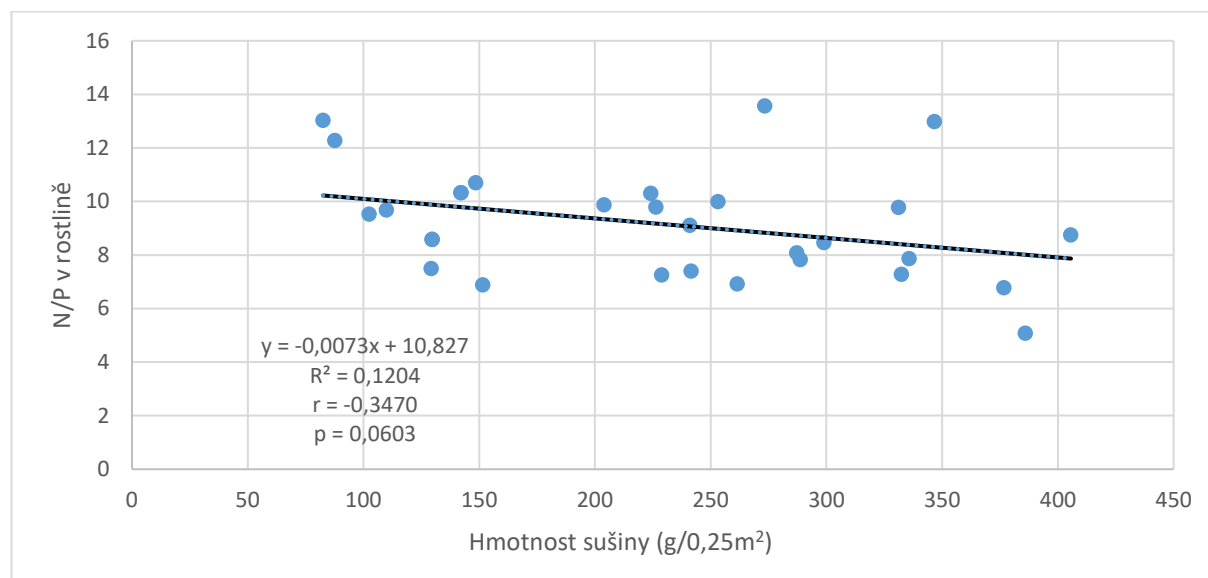
Proměnné	Korelace: označ. korelace jsou významné na hlad. < 0,05000			
	Fosfor v rostlině (%)	N/P v rostlině	PNI s Pc dle Bélanger et al. (2015)	PNI s Pc dle Pinkerton (1991)
Mehlich 3 (mg/kg)	0,386999	-0,541018	0,554706	0,386999
Olsen (mg/kg)	0,243672	-0,724425	0,545536	0,243672

Graf 22 ukazuje závislost hmotnosti sušiny ozimé řepky během fáze počátku kvetení na obsah fosforu v rostlině. Z grafu je patrná negativní slabá korelace. Dle statistiky je $p = 0,9496$, takže je vyšší než 0,05, a neexistuje statisticky významný vztah



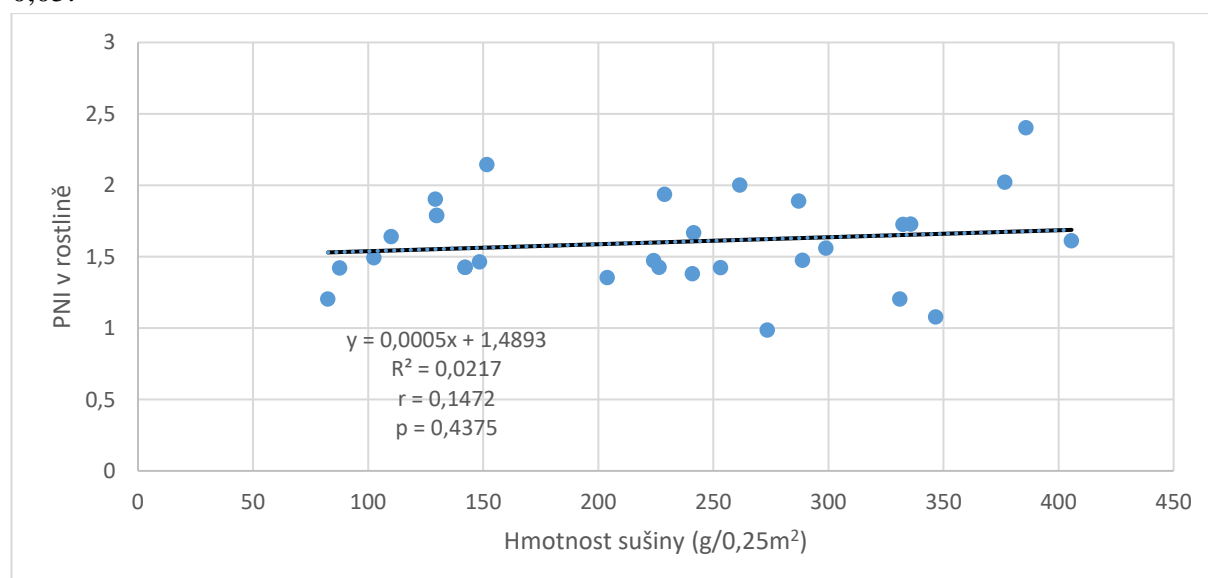
Graf 22. Závislost fosforu v rostlině na hmotnost sušiny biomasy ve fázi počátku kvetení ozimé řepky

Bodový graf 23 znázorňuje závislost hmotnosti sušiny ozimé řepky během fáze počátku kvetení na poměr N/P v rostlině. Z grafu je patrná slabá negativní korelace. Ze statistiky vyplývá, že je hodnota $p = 0,0603$, což je vyšší než $0,05$, a neexistuje statisticky významný vztah.



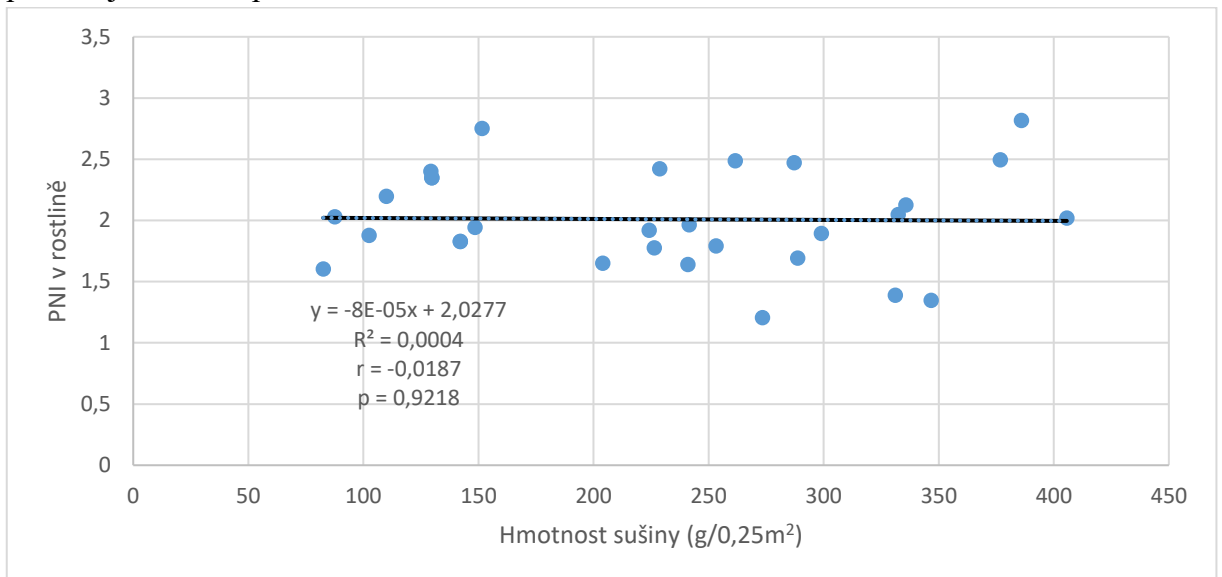
Graf 23. Závislost poměru N/P v rostlině na hmotnost sušiny biomasy ve fázi počátku kvetení ozimé řepky

Bodový graf 24 popisuje regresní vztah hmotnosti sušiny nadzemní biomasy ozimé řepky během začátku kvetení na PNI s P_c dle Bélanger et al. (2015). Korelační analýzou je zjištěn pozitivní velmi slabý vztah. Zde neexistuje statisticky významný vztah, protože r je větší než $0,05$.



Graf 24. Závislost PNI s P_c dle Bélanger et al. (2015) v rostlině na hmotnost sušiny biomasy ve fázi počátku kvetení ozimé řepky

Bodový graf 25 popisuje regresní vztah hmotnosti sušiny nadzemní biomasy ozimé řepky během začátku kvetení na PNI s P_c dle Pinkerton (1991). Korelační analýzou byl tento vztah vyhodnocen jako pozitivní a velmi slabý. Dle statistiky neexistuje statisticky významný vztah, protože je hodnota p větší než 0,05.



Graf 25. Závislost PNI s P_c dle Pinkerton (1991) v rostlině na hmotnost sušiny biomasy ve fázi počátku kvetení ozimé řepky.

6 Diskuze

V této práci byly porovnávány vztahy rostlinných indikátorů fosforu v řepce ve fázi prodlužovacího růstu a začátku kvetení s přijatelným obsahem fosforu v půdě.

6.1 Rostlinné indikátory fosforu

Mezi indikátory stavu fosforu v rostlině byly vybrány obsah fosforu v rostlině, který ale nepočítá se zřed'ovacím efektem v rostlině, poměr N/P v rostlině a index výživy rostlin fosforem (PNI).

Dle Bečky et al. (2007) obsah fosforu v nadzemních částech klesá od fáze kvetení, jelikož na podzim ve fázi šesti listů je obsah fosforu 0,39 %, ve fázi jarní regenerace 0,48 %, ve fázi butonizace 0,50 %, ve fázi kvetení 0,46 % a ve fázi nasazení šešulí 0,34 %. Z dat využitých ke zpracování této diplomové práce vyplývá, že je průměrná hodnota fosforu v nadzemní biomase v počátku prodlužovacího růstu řepky 0,62 % a ve fázi kvetení 0,44 %.

Dalším indikátorem stavu fosforu v rostlině byl zvolen poměr N/P. Ten dle Güsewell (2004) odráží postupný a dynamický charakter snížení obsahu živin lépe než konstantní indikátory. Dále byl zvolen indikátor PNI, který je dle Cadot et al. (2018) rostlinný diagnostický nástroj nezávislý na typech půdy a klimatických podmínkách. Dle Gagnon et al. (2020) se dá vypočítat porovnáním koncentrace fosforu v rostlinné biomase s kritickou koncentrací fosforu. V práci jsou sledovány dva typy PNI. PNI s kritickou hodnotou fosforu od Bélanger et al. (2015) a PNI s kritickou hodnotou fosforu od Pinkerton (1991). Indikátor PNI je obdoba indikátoru NNI, který například Saki et al. (2019) využívá k určení stavu výživy dusíkem. Dle Sharma et al. (2020) se obecně NNI používá jako indikátor stresu především u kukuřice a pšenice. Li et al. (2012) uvádí NNI jako spolehlivý indikátor nedostatku dusíku během vegetačního období kukuřice.

6.2 Metody pro hodnocení obsahu půdního fosforu

Z metod, které dokáží extrahovat fosfor z půdy, byla zvolena činidla Mehlich 3 a Olsen. Extrakční činidlo Mehlich 3 je dle Cade-Menun et al. (2018) jedním z nejpoužívanějších víceprvkových půdních testů pro fosfor, který lze použít v širším rozsahu pH půdy. Oproti tomu metoda Olsen je dle Iatrou et al. (2014) vhodnější do alkalických půd. Zajímavostí, která byla vyhodnocena ze vzorků, je korelace metody Olsen k fosforu v rostlině. Extrakční metoda Olsen prokazovala vždy silnější korelaci ke všem indikátorům rostlinného fosforu oproti metodě Mehlich 3. Jedním z důvodů může být vliv půdní reakce, proto byly postupy rozděleny do korelačních matic dle pH. Vzniklé korelace mezi rostlinnými indikátory s fosforem v půdě byly silnější u metody Olsen v kyselé půdě, ale v zásadité půdě byly silnější vztahy u metody Mehlich 3. Ve fázi začátku kvetení statisticky významné vztahy vznikly u většiny proměnných. V kyselém prostředí byly u Mehlich 3 u N/P a PNI s kritickým obsahem fosforu v nadzemní biomase (Pc) vyjádřeným dle Bélanger et al. (2015). Půdní fosfor ve výluhu Olsen koreloval statisticky významně s indikátory výživného stavu rostlin. V alkalické půdě došlo k statisticky významným vztahům přijatelného fosforu (Olsen i Mehlich 3) s indikátory N/P a PNI s Pc dle

Bélanger et al. (2015). Korelace byla u indikátoru N/P silnější s metodou Olsen v porovnání s metodou Mehlich 3. V případě PNI (Bélanger) byla korelace s půdním fosforem velmi podobná u obou činidel. Vzniklé výsledky jsou v rozporu s tvrzením Ippolito & Barbarick (2006), že metodu Olsen lze využít pouze na půdy s vysokým obsahem uhličitanů a s pH vyšším než 7. Výsledky se spíše shodují s tvrzením Iatrou et al. (2014), který popisuje metodu Olsen jako účinnou pro extrakci fosforu pro kyselé i vápenaté půdy, pokud mají kyselá půdy pH vyšší než 5, protože při extrakci se v roztoku uvolňuje hydroxid (OH^-) a uhličitan (CO_3^{2-}), které snižují aktivitu vápníku ve vápenatých půdách, aktivitu železa (Fe^{3+}) a hliníku (Al^{3+}) v kyselých půdách a tím zvyšují množství fosforečnanu v roztoku.

6.3 Porovnávání vztahů mezi fosforem v půdě a fosforem v rostlině

Při porovnávání vztahů mezi fosforem v půdě a fosforem v rostlině řepky během fáze prodlužovacího růstu byla zjištěna nejsilnější korelace mezi obsahem fosforu v rostlině a obsahem fosforu v půdě stanoveným ve výluhu Olsen. Korelace byla v tomto případě středně silná a existuje zde dokonce statisticky významný vztah. Podobně jako v případě fosforu v rostlině s Mehlichem 3, kde byl nalezen také statisticky významný vztah. Mezi PNI s Olsenem se statisticky významný vztah neprojevil. K takovému výsledku, kde nebyl statisticky významný vztah došlo i u PNI s Mehlichem 3. V případě N/P s metodami Olsen a Mehlich 3 nebyl zaznamenán statisticky významný vztah. Tento výsledek může být připisován nedostatečnému vytvoření nadzemní biomasy a s tím souvisejícímu neprojevení zředovacího efektu. To potvrzuje i Bélanger et al. (2015), který tvrdí, že v raných fázích růstu řepky není tak výrazný zředovací efekt.

Všechny postupy, které porovnávají vztahy mezi rostlinnými indikátory řepky ve fázi začátku kvetení s fosforem v půdě, vykazovaly statisticky významné vztahy mezi sebou. Nejsilněji koreloval indikátor N/P s Olsenem a PNI (Bélanger) s Olsenem. Vztah mezi obsahem fosforu v rostlině s Olsenem oproti fázi prodlužovacího růstu řepky zesílil. To neplatí u vztahu fosforu v rostlině s Mehlichem 3. Koncentrace fosforu v rostlině se snižovala se zvětšující se biomasou, což odpovídá tvrzení, které uvedl Cadot et al. (2018). To může být důvod, proč se zesílila korelace přijatelného fosforu v půdě s indikátory PNI, N/P ve fázi kvetení v porovnání s fází začátku prodlužovacího růstu, zatímco v případě fosforu v rostlině tato změna nebyla tolik výrazná.

Metodu PNI lze využít u mnoha plodin. Fontana et al. (2021) popsal uplatnění metody PNI na ozimé pšenici, Nyiraneza et al. (2021) na bramborech a Gagnon et al. (2020) na kukuřici. PNI byla vypočítána z kritické koncentrace fosforu. Bélanger et al. (2015) uvádí rovnici kritické koncentrace pro ozimou řepku a Pinkerton (1991) popisuje kritickou koncentraci ve fázi počátku kvetení řepky ozimé. Obě kritické koncentrace byly zapojeny do výpočtu PNI. Z našich dat silněji koreluje PNI (Bélanger) a to jak u fosforu v půdě zjištěného metodou Mehlich 3, tak u extrakční metody Olsen. Obě metody PNI dosahovaly vztahů s přístupným obsahem fosforu v půdě, které byly statisticky významné. Odlišnosti v kritických koncentracích fosforu může způsobovat rozdíl v podmínkách pěstování nebo také odrůda plodiny, jak uvádí Bélanger et al. (2015).

6.4 Vzájemné porovnání rostlinných indikátorů

Ve výsledcích byly vzájemně porovnávány jednotlivé indikátory rostlinného fosforu řepky ozimé. Ve fázi prodlužovacího růstu postupy vykazovaly statisticky významné vztahy. Fosfor v rostlině s N/P korelovaly středně silně, fosfor v rostlině s PNI korelovaly dokonce velmi silně a poměr N/P v rostlině s PNI (Bélanger) silně koreloval. Ve fázi začátku kvetení všechny postupy vykazovaly statisticky významné vztahy. Korelace mezi fosforem v rostlině a poměrem N/P byla silná, korelace mezi indikátory PNI s fosforem v rostlině dokonce velmi silná. Korelace mezi N/P v rostlině s PNI (Bélanger) vykazovaly negativní velmi silný vztah a s PNI (Pinkerton) středně silný negativní vztah.

6.4.1 Hledání optimálních hodnot indikátorů příjmu fosforu ve fázi počátku prodlužovacího růstu řepky

Po dosažení optimální hodnoty N/P = 10 od Bečky et al. (2007) do rovnice, která byla vypočítána ze vztahu fosforu v rostlině s N/P v rostlině v prodlužovacím růstu řepky, byl zjištěn optimální obsah fosforu 0,34 %, což je méně, než uvádí Bečka et al. (2007). Po dosažení optimální hodnoty fosforu v prodlužovacím růstu 0,48 %, který uvádí právě Bečka et al. (2007) do stejné rovnice byl vypočten optimální poměr N/P 8,92. Tento poměr N/P je v porovnání s Bečkou et al. (2007) menší.

Při porovnání vztahu PNI (Bélanger) s fosforem v rostlině vznikla rovnice, do které byl dosažen optimální PNI = 1, jež uvádí například Gagnon et al. (2020). Z výsledků byl zjištěn optimální obsah fosforu v rostlině ve fázi prodlužovacího růstu řepky 0,22 %. Tento obsah je menší, než uvádí Bečka et al. (2007), i než byl zjištěn ze vztahu N/P s fosforem v rostlině ve fázi prodlužovacího růstu řepky. Po dosažení optimálního N/P = 10 od Bečky et al. (2007) do stejné rovnice, byl zjištěn optimální PNI 1,76, což je více, než uvádí například Gagnon et al. (2020). Ten uvádí optimální hladinu PNI = 1.

Optimální poměr N/P je dle Bečky et al. (2007) v prodlužovacím růstu řepky 10. Po dosažení tohoto poměru do rovnice, která byla vypočtena ze vztahu PNI (Bélanger) s poměrem N/P v rostlině, byl zjištěn optimální PNI 1,8, což je více, než bylo zjištěno ze vztahu PNI (Bélanger) s poměrem N/P v rostlině. Také je to více než PNI = 1, které je uváděno jako optimum dle Gagnon et al. (2007). Po dosažení optimálního PNI = 1 do stejné rovnice byl zjištěn optimální poměr N/P v rostlině řepky 14,46, což je více, než uvádí Bečka et al. (2007), i než bylo vypočteno ze vztahu N/P s fosforem v rostlině ve fázi prodlužovacího růstu řepky.

6.4.2 Hledání optimálních hodnot fosforu ve fázi začátku kvetení řepky

Po dosažení optimální hodnoty N/P = 7 od Sedláře et al. (2020b) do rovnice, která byla vypočítána ze vztahu fosforu v rostlině s fosforem v době začátku kvetení řepky, byl zjištěn optimální obsah fosforu 0,51 %. Tento výsledek je větší, než uvádí Bečka et al. (2007) ve své publikaci. Po dosažení optimálního obsahu fosforu v počátku květu 0,46 % od Bečky et al. (2007) do stejné rovnice, byl vypočten optimální poměr N/P v době květu 7,74, což se velmi podobá optimálnímu poměru uvedeným Sedlářem et al. (2020b).

Ze vztahu, kde byla porovnávána korelace mezi PNI (Bélanger) s fosforem v rostlině řepky ve fázi počátku kvetení, byla vypočítána rovnice. Do rovnice byl dosažen optimální PNI

= 1. Díky tomu byl zjištěn optimální obsah fosforu 0,24 %, což je méně než uvádí ve své publikaci Bečka et al. (2007), i než je optimální obsah fosforu v ozimé řepce vypočítaný ze vztahu mezi N/P s fosforem v rostlině ve fázi kvetení. Do stejné rovnice byl dosazen i optimální obsah fosforu v řepce v době kvetení, který je dle Bečky et al. (2007) 0,46 %. Díky tomu byl vypočteno optimální PNI = 1,8. Tato hodnota PNI je menší než optimální PNI = 1, které například uvádí ve své publikaci Gagnon et al. (2007).

V případě vztahu indikátoru PNI (Pinkerton) s obsahem fosforu v rostlině nebyl počítán optimální obsah fosforu v rostlině ve fázi kvetení, protože Pinkerton uvádí ve své publikaci pouhou konstantu kritického obsahu fosforu v rostlině řepky, tudíž je výsledek po dosazení optimálního PNI = 1 do rovnice shodný jako kritický obsah fosforu 0,21 %. Po dosazení optimálního obsahu fosforu v době kvetení dle Bečky et al. (2007) 0,46 % do rovnice vznikne optimální PNI = 2,19, což je vyšší než obecné optimum 1 i než optimum 1,8, které vzniklo ze vztahu mezi PNI (Bélanger) s fosforem v rostlině ve fázi kvetení, také je vyšší než PNI = 1,94 vzniklé ze vztahu N/P s PNI (Bélanger), ale je menší než PNI = 2,33, které vyplynulo ze vztahu mezi N/P s PNI (Pinkerton) ve fázi kvetení řepky.

Po dosazení optimální hodnoty PNI = 1 do rovnice, která byla zjištěna ze vztahu PNI (Bélanger) s poměrem N/P v rostlině ve fázi začátku kvetení, byl zjištěn optimální poměr N/P = 13,39, což je větší než N/P = 7, který uvádí Sedlář et al. (2020b) ve své publikaci a je i vyšší než optimální N/P = 7,74 zjištěný ze vztahu N/P s fosforem v rostlině v době kvetení, ale menší než N/P = 16,69, který byl zjištěn ze vztahu mezi PNI (Pinkerton) s N/P ve fázi kvetení. Do stejné rovnice byl dosažen také optimální poměr N/P = 7 dle Sedláře et al. (2020b). Z výpočtu bylo zjištěno optimální PNI = 1,93, což je větší než obecné optimum PNI = 1. Je to také větší než PNI = 1,8 zjištěné ze vztahu mezi PNI (Bélanger) s fosforem v rostlině ve fázi květu, ale menší než obě optimální PNI (Pinkerton) se vztahem s N/P a fosforem v rostlině ve fázi kvetení.

Optimální PNI ve fázi kvetení řepky je 1. Po dosazení do rovnice, která vznikla ze vztahu mezi PNI (Pinkerton) s poměrem N/P v nadzemní biomase ozimé řepky ve fázi kvetení, byl zjištěn optimální poměr N/P 16,69. Tento optimální poměr N/P je větší, než uvádí Sedlář et al. (2020b), dále je větší než poměr N/P = 7,74 ze vztahu mezi N/P a fosforem v nadzemní biomase řepky začátkem kvetení i větší než poměr N/P = 13,39, který byl zjištěn ze vztahu mezi PNI (Bélanger) s N/P ve fázi počátku kvetení. Do stejné rovnice byl dosazen i optimální poměr N/P = 7 dle Sedláře et al. (2020b). Z výpočtu byl zjištěn optimální PNI=2,39, což je nejvyšší optimální PNI s porovnáním jak s obecným PNI = 1, tak optimální PNI, které bylo vypočítáno ze všech vztahů ve fázi kvetení řepky.

6.5 Vyjádření optimálních hodnot obsahu přijatelného fosforu v půdě

V následující části zkusíme najít optimální obsah přístupného fosforu v půdě na základě námi zjištěných vztahů s indikátory výživného stavu rostlin fosforem. Bečka et al. (2007) uvádí optimální obsah fosforu ve fázi prodlužování ozimé řepky 0,48 %. Po dosazení optimální hodnoty do výsledků zjištěných porovnáním fosforu v rostlině a fosforem v půdě ve fázi prodlužovacího růstu vyplývá, že přístupný obsah fosforu v půdě stanovený činidlem Mehlich 3 i Olsen je záporný, což není reálně možné. Pravděpodobnou příčinou tohoto výsledku je vysoká koncentrace fosforu v rostlině. Dle Bečka et al. (2007) je ve fázi prodlužovacího růstu řepky optimální poměr N/P roven 10, což i odpovídá rozsahu, který uvádí ve své publikaci

Grzebisz et al. (2019). Po dosazení do vzniklé rovnice u vztahu N/P a fosforu v půdě bylo opět dosaženo záporné hodnoty fosforu v půdě u obou metod. U PNI, kde je ideální parametr 1, se opět u obou postupů po dosazení do rovnice vzniklé ze vztahu mezi PNI a fosforem v půdě nejednalo o reálný výsledek.

V publikaci od Bečky et al. (2007) se uvádí optimální obsah fosforu ve fázi kvetení řepky 0,46 %. Po dosazení do rovnice, která byla zjištěna jak při porovnání vztahu mezi fosforem v rostlině s extrakčním činidlem, tak u metody s Mehlichem 3 se hodnota fosforu v půdě rovná 83,4 mg/kg, což je s porovnáním hodnot fosforu v půdě extrahovaný Mehlichem 3 dle Baranyka et al. (2007) dobrý obsah. U činidla Olsen je obsah fosforu v půdě 31 mg/kg. Tato hodnota je dle Kunzové (2009) vyhovující obsah. Optimální poměr N/P během kvetení ozimé řepky od Sedláře et al. (2020b) je 7. Po dosazení do vzniklých rovnic z výsledků ze vztahu mezi N/P a fosforem v půdě byl zjištěn obsah fosforu v půdě u Mehliha 3 dle Baranyka et al. (2007) vysoký, a to přesně 146,42 mg/kg. U Olsena byl opět využit optimální poměr N/P = 7 od Sedláře et al. (2020b). Po dosazení do výsledné rovnice byl vypočten obsah fosforu v půdě 38,47 mg/kg. Dle Kunzové (2009) se jedná o dobrý obsah půdního fosforu. U metody PNI se optimální hodnota rovná 1. U všech postupů s PNI se dopočítáme nereálného výsledku fosforu v půdě. To je nejspíše způsobeno vysokou koncentrací fosforu v rostlinném materiálu, jelikož hodnota PNI se pohybovala vysoko nad 1.

6.6 Vztah rostlinných indikátorů fosforu s tvorbou výnosu nadzemní biomasy řepky

Dále byl porovnáván vztah mezi rostlinnými indikátory a výnosem sušiny biomasy nadzemní části řepky ve fázi začátku kvetení. U všech indikátorů nebyl nalezen statisticky významný vztah s výnosem nadzemní části. Hodnota p byla v případě fosforu v rostlině 0,95, PNI asi 0,43, ale u poměru N/P už 0,06, což je kousek od statistické významnosti. Liebisch et al. (2013) uvádí, že ukazatele PNI a N/P lépe korelují s výnosem biomasy než samotný fosfor. Tento fakt nelze vyvrátit ani potvrdit, jelikož se všechny korelace byly slabé a bez statisticky významných vztahů.

7 Závěr

- **Hypotéza 1:** Poměr obsahu dusíku k obsahu fosforu v nadzemní biomase ozimé řepky a index výživy rostlin fosforem koreluje těsněji než fosfor v rostlině s obsahem přijatelného fosforu v půdě.

Na základě výsledků ve fázi počátku prodlužovacího růstu řepky nelze hypotézu potvrdit. V této fázi růstu silněji koreluje pouhý fosfor v rostlině než poměr obsahu dusíku k obsahu fosforu a index výživy rostlin fosforem. Ve fázi počátku kvetení už hypotézu lze potvrdit. Oba indikátory vykazují silnější korelace než samotný fosfor v rostlině.

- **Hypotéza 2:** Index výživy rostlin fosforem je v těsnějším vztahu s výnosem nadzemní biomasy rostlin v porovnání s poměrem obsahu dusíku k obsahu fosforu v nadzemní biomase ozimé řepky

Tuto hypotézu nelze vyvrátit ani potvrdit, protože u všech indikátorů nebyl nalezen statisticky významný vztah s výnosem nadzemní části. Ve fázi začátku prodlužovacího růstu řepky nebyly vzorky vyhonocovány z důvodu malého množství materiálu.

Do zjištěných vztahů byly dosazeny optimální hodnoty vyhledané na základě literární rešerše. V následujících bodech byly uvedeny vypočítané optimální hodnoty:

- Optimální obsah fosforu v nadzemní biomase řepky během fáze počátku prodlužovacího růstu je od 0,22 % do 0,34 % fosforu.
- Optimální poměr N/P v nadzemní biomase řepky během fáze počátku prodlužovacího růstu je od 9 do 14.
- Optimální hodnota PNI v nadzemní biomase řepky během fáze počátku prodlužovacího růstu je 1,8.
- Optimální obsah fosforu v nadzemní biomase řepky během fáze počátku kvetení je od 0,24 % do 0,51 %.
- Optimální poměr N/P v nadzemní biomase řepky během fáze počátku kvetení je od 8 do 17.
- Optimální hodnota PNI v nadzemní biomase řepky během fáze počátku kvetení je od 1,8 do 2,4.
- Optimální obsah fosforu v půdě zjištěný metodou Mehlich 3 je od 83-146 mg/kg.
- Optimální obsah fosforu v půdě zjištěný metodou Olsen je od 31-38 mg/kg.
- Také bylo zjištěno, že stanovení přijatelného obsahu fosforu v půdě metodou Olsen dosahuje silnější korelace s indikátory výživného stavu fosforu v nadzemní biomase ve fázi počátku kvetení řepky než metoda Mehlich 3.

8 Literatura

- Adhami E, Owliaie HR, Molavi R, Karimain N. 2014. Distribution of inorganic phosphorus fractions in some soil profiles of Zagros forest of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science* **60**:251-263.
- Anonym 1. Etiketa Dolophos 15. Eagri. Available from http://eagri.cz/public/app/rhpub/etikety/etiketa_13403.pdf?id=13403 (accessed March 2021).
- Anonym 2. Mathematics Education Centre, Loughborough University. Available from <http://www.statstutor.ac.uk> (accessed March 2023).
- Azeez JO, Inyang UU, Olubuse OC. 2013. Determination of appropriate soil test extractant for available phosphorus in southwestern nigerian soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **44**:1540-1556.
- Balík J, Černý J, Kulhánek M. 2012. Bilance dusíku v zemědělství. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Balík J, Kulhánek M, Pavlíková D, Tlustoš P, Wisniowska-Kielian B. 2008. Fosfor v půdě. Pages 23-30 in Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem. Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha.
- Balík J, Pavlíková D, Vaněk V. 2021. Příjem fosforu rostlinami – schopnosti rostlin k mobilizaci fosforu z půdy. Pages 15-22 in Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem. Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha.
- Baranyk P, et al. 2005. Řepka olejka v českém zemědělství. Svaz pěstitelů a zpracovatelů olejnin.
- Baranyk P, et al. 2007. Řepka pěstování využití ekonomika. Profi Press, s. r. o., Praha.
- Bastani S, Hajiboland R. 2017. Uptake and utilization of applied phosphorus in oilseed rape (*Brassica napus* L. cv. Hayola) plants at vegetative and reproductive stages: Comparison of root with foliar phosphorus application. *Soil Science and Plant Nutrition* **63**:254-263.
- Bečka D, Šimka J, Cihlár P, Prokinová E, Mikšík V, Vašák J, Zupalová H. 2013. Řepka ozimá inovace pěstitelské technologie. Katedra rostlinné výroby, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Bečka D, Vašák J, Zupalová H, Mikšík V. 2007. Řepka ozimá – Pěstitelský rádce. Kurent, s.r.o., České Budějovice.
- Bélanger G, Ziadiová N, Pageau D, Grantová C, Lafond J, Nyiraneza J. 2015. Shoot growth, phosphorus–nitrogen relationships, and yield of canola in response to mineral phosphorus fertilization. *Agronomy Journal* **107**:1458-1464.

- Bentley D, Grierson PF, Bennett LT, Adams MA. 1999. Evaluation of anion exchange membranes to estimate bioavailable phosphorus in native grasslands of semi-arid Northwestern Australia. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **30**:2231-2244.
- Cade-Menun BJ, Elkin KR, Liu CW, Bryant RB, Kleinman PJA, Moore Jr PA. 2018. Characterizing the phosphorus forms extracted from soil by the Mehlich III soil test. *Geochemical Transactions* **19**:1-17.
- Cadot S, Bélanger G, Ziadi N, Morel Ch, Sinaj S. 2018. Critical plant and soil phosphorus for wheat, maize, and rapeseed after 44 years of P fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **112**:417-433.
- Croffie MET, Williams PN, Fenton O, Fenelon A, Daly K. 2022. Effect of anaerobic-digested and lime-stabilized dairy processing sludge on phosphorus dynamics in grassland soils with varying textures. *Journal of Cleaner Production* (e132915) DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132915.
- Čermák P, Mühlbachová G, Lošák T, Hlušek J. 2019. Aktualizovaná kritéria hodnocení obsahu přístupného fosforu na karbonátových půdách pro harmonickou výživu rostlin. Pages 229 – 235 in Salaš P editor. *Rostliny v suchých oblastech a klimatická změna*. Lednice.
- de Bang TCh, Husted S, Laursen KH, Persson DP, Schjoerring JK. 2020. The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. *New Phytologist Foundation* **229**:2446-2469.
- Drake J, Macdonald B, Fitzsimons L. 2014. Precision of the anion exchange membrane phosphorus technique when using a range of low-ionic solutions in analysis of heterogeneous mine soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **45**:829-843.
- Feng J, Long Y, Shi L, Shi J, Barker G, Meng J. 2011. Characterization of metabolite quantitative trait loci and metabolic networks that control glucosinolate concentration in the seeds and leaves of *Brassica napus*. *New Phytologist Foundation* **193**:96-108.
- Fontana M, Bélanger G, Hirte J, Ziadi N, Elfouki S, Bragazza L, Liebisch F, Sinaj S. 2021. Critical plant phosphorus for winter wheat assessed from long-term field experiments. *European Journal of Agronomy* (e126263) DOI: 10.1016/j.eja.2021.126263.
- Fukuda M, Nakamura S, Fonseca ACL, Nasukawa H, Ibraimo MM, Naruo K, Kobayashi K, Oya T. 2017. Evaluation of the Mehlich 3 reagent as an extractant for cations and available phosphorus for soils in Mozambique. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **48**:1462-1472.
- Gagnon B, Ziadi N, Bélanger G, Parent G. 2020. Validation and use of critical phosphorus concentration in maize. *European Journal of Agronomy* (e126147) DOI: 10.1016/j.eja.2020.126147.
- Garside M. 2021. Global phosphate rock reserves by country 2021. Statista. Available from <https://www.statista.com/statistics/681747/phosphate-rock-reserves-by-country/#statisticContainer> (accessed February 2023).

- Gosling P, Mead A, Proctor M, Hammond JP, Bending GD. 2013. Contrasting arbuscular mycorrhizal communities colonizing different host plants show a similar response to a soil phosphorus concentration gradient. *New Phytologist Foundation* **198**:546-556.
- Grzebisz W, Przygocka-Cyna K, Szczepaniak W, Zawieja A. 2019. Impact of winter oilseed rape nutritional status during vegetative growth on yield. *Plant, Soil and Environment* **65**:490-496.
- Grzebisz W, Szczepaniak W, Barłóg P, Przygocka-Cyna P, Potarzycki J. 2018. Phosphorus sources for winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) during reproductive growth – magnesium sulfate management impact on P use efficiency. *Archives of Agronomy and Soil Science* **64**:1646-1662.
- Güsewell S. 2004. N : P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist Foundation* **164**:243-266.
- Ha S, Tran LS. 2014. Understanding plant responses to phosphorus starvation for improvement of plant tolerance to phosphorus deficiency by biotechnological approaches. *Critical Reviews in Biotechnology* **34**:16-30.
- Haider T, Farid MS, Mahmood R, Ilyas A, Khan MH, Haider ST, Chaudhry MH, Gul M. 2021. A computer-vision-based approach for nitrogen content estimation in plant leaves. *Agriculture* **11**:1-19.
- Hassan F, Manaf A, Qadir G, Basra SMA. 2007. Effects of sulphur on seed yield, oil, protein and glucosinolates of canola cultivars. *International Journal of Agriculture and Biology* **9**:504-508.
- Hurisso TT, Davis JG, Chala A, Getachew A, Wolde-Meskel E. 2021. Impacts of grinding and acidification of animal bones with coffee wastewater on plant dry matter yield and recovery of phosphorus. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **52**:1076-1088.
- Chen W, et al. 2022. Purple stem *Brassica napus* exhibits higher photosynthetic efficiency, antioxidant potential and anthocyanin biosynthesis related genes expression against drought stress. *Frontiers in Plant Science* (e936696) DOI: 10.3389/fpls.2022.936696.
- Chmielewska A, Kozłowska M, Rachwał D, Wnukowski P, Amarowicz R, Nebesny E, Rosicka-Kaczmarek J. 2021. Canola/rapeseed protein – nutritional value, functionality and food application: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **61**:3836-3856.
- Iatrou M, Papadopoulos A, Papadopoulos F, Dichala O, Psoma P, Bountla A. 2014. Determination of soil available phosphorus using the Olsen and Mehlich 3 methods for greek soils having variable amounts of calcium carbonate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **45**:2207-2214.
- Ikhajagbe B, Anoliefo GO, Olise OF, Rackelmann F, Sommer M, Adekunle IJ. 2020. Major phosphorus in soils is unavailable, yet critical for plant development. *Notulae Scientia Biologicae* **12**:500-535.

- Ippolito JA, Barbarick KA. 2006. Phosphorus extraction methods for water treatment residual-amended soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **37**:859-870.
- Iyamuremye F, Dick RP. 1996. Organic amendments and phosphorus sorption by soils. *Advances in Agronomy* **56**:139-185.
- Katagi KS, Kadam NS, Mane SG, Akki M. 2020. Unique oleochemical data source: Deployed for the optimization of fatty acids of seed oils for production of liquid fuel. *Chemical Data Collections* **25**:1-14.
- Kejř L. 2007. Ověření účinnosti stupňovaných dávek dusíku při konstantních hladinách fosforu a draslíku. Ústřední kontrolní ústav zemědělský v Brně, Planá nad Lužnicí.
- Kleinman PJA, Sharpley AN. 2002. Estimating soil phosphorus sorption saturation from Mehlich-3 data. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **33**:1825-1839.
- Kong S, Ma Z, Qin Y, Fan M. 2022. Evaluating phosphorus nutritional status of potato by instant testing of petiole phosphate concentration. *Soil Science and Plant Nutrition* **68**:393-399.
- Koprna R, Havel J. 2002. Využití olejnin pro potravinářské účely. Profi Press. Available from <https://uroda.cz/vyuziti-olejnin-pro-potravinarske-ucely/> (accessed January 2023).
- Krouk G, Kiba T. 2020. Nitrogen and phosphorus interactions in plants: from agronomic to physiological and molecular insights. *Current Opinion in Plant Biology* **2** **57**:104-109.
- Kulhánek M, Černý J, Sedlář O, Balík J. 2021. Extrakční metody pro stanovení mobilních forem fosforu v půdě. Pages 23-30 in Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem. Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha.
- Kunzová E, Veverka K, Škarpa P, Zupalová H. 2012. Výživa, hnojení a ochrana slunečnice. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.
- Kunzová E. 2009. Výživa rostlin a hnojení fosforem. Výzkumný ústav rostlinné výroby.
- Lamont BB, Pérez-Fernández M, Rodríguez-Sánchez J. 2014. Soil bacteria hold the key to root cluster formation. *New Phytologist Foundation* **206**:1156-1162.
- Li W, He P, Jin J. 2012. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for spring maize in north-east China. *Journal of Plant Nutrition* **35**:1747-1761.
- Liebish F, Bünemann EK, Huguenin-Elie O, Jeangros B, Frossard E, Oberson A. 2013. Plant phosphorus nutrition indicators evaluated in agricultural grasslands managed at different intensities. *European Journal of Agronomy* **44**:67-77.
- Lou P, Zhao J, He H, Hanhart C, Del Carpio DP, Verkerk R, Custers J, Koornneef M, Bonnema G. 2008. Quantitative trait loci for glucosinolate accumulation in *Brassica rapa* leaves. *New Phytologist Foundation* **179**:1017-1032.
- Mader P, Čurdová E. 1997. Metody rozkladu biologických materiálů pro stanovení stopových prvků. *Chemické Listy* **91**: 227 – 236.

- 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. 2013. Alternativní výživa rostlin dusíkem. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i, Praha 6 – Ruzyně.
- Mitran T, Mani PK, Basak N, Mazumder D, Roy M. 2016. Long-term manuring and fertilization influence soil inorganic phosphorus transformation vis-a-vis rice yield in a rice–wheat cropping system. *Archives of Agronomy and Soil Science* **62**:1-18.
- Nasukawa H, Tajima R, Muacha BIJ, Pereira MCF, Naruo K, Nakamura S, Fukuda M, Ito T, Homma K. 2019. Analyzing soil-available phosphorus by the Mehlich-3 extraction method to recommend a phosphorus fertilizer application rate for maize production in northern Mozambique. *Plant Production Science* **22**:211-214.
- Nyiraneza J, Bélanger G, Benjannet R, Ziadi N, Cambouris A, Fuller K, Hann S. 2021. Critical phosphorus dilution curve and the phosphorus-nitrogen relationship in potato. *European Journal of Agronomy* **123**.
- Oatway L, Vasanthan T, Helm JH. 2001. Phytic acid. *Food Reviews International* **17**:419-431.
- Oliveira M, Machado AV. 2013. The role of phosphorus on eutrophication: a historical review and future perspectives. *Environmental Technology Reviews* **2**:117-127.
- Olsen S, Cole C, Watanabe F, Dean L. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *Circular*:1-18.
- Ortas I, Islam KR. 2018. Phosphorus fertilization impacts on corn yield and soil fertility. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **49**:1684-1694.
- Pavlíková D, Pavlík M, Balík J. 2008. Úloha fosforu v rostlinách. Pages 31-35 in Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem. Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha.
- Pearse SJ, Veneklaas EJ, Cawtray G, Bolland MDA, Lambers H. 2006. Carboxylate composition of root exudates does not relate consistently to a crop species' ability to use phosphorus from aluminium, iron or calcium phosphate sources. *New Phytologist Foundation* **173**:181-190.
- Penn JC, Camberato JJ. 2019. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture* **9**.
- Pinkerton A. 1991. Critical phosphorus concentrations in oilseed rape (*Brassica napus*) and Indian mustard (*Brassica juncea*) as affected by nitrogen and plant age. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **31**:107-115.
- Prasad RBN. 2017. Intensive technological analysis for biodiesel production from a variety of feedstocks: state-of-the-art. Pages 337-355 in Chandel A, Sukumaran R, editors. *Sustainable Biofuels Development in India*. Springer, Cham.

- Prince RC. 2010. Biodiesel. Pages 2271-2275 in Timmis KN editor. Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology. Springer, Berlin.
- Qiu D, et al. 2006. A comparative linkage map of oilseed rape and its use for QTL analysis of seed oil and erucic acid content. Theoretical and Applied Genetics **114**:67–80.
- Rengel Z, Marschner P. 2005. Nutrient availability and management in the rhizosphere: exploiting genotypic differences. New Phytologist Foundation **168**:305-312.
- Requejo MI, Eichler-Löbermann B. 2014. Organic and inorganic phosphorus forms in soil as affected by long-term application of organic amendments. Nutrient Cycling in Agroecosystems **100**:245-255.
- Roy AH. 2017. Fertilizers and Food Production. Pages 757-804 in Kent J, Bommaraju T, Barnicki S editors. Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology. Springer, Cham.
- Saki T, Yomi M, Rao BKR. 2019. Critical nitrogen content and nitrogen nutrition index for sweetpotato crop. Journal of Plant Nutrition **42**:1750-1759.
- Sambo P, Nicoletto C. 2017. Fertilizers: criteria of choice for vegetable crops. Pages 85-113 in Tei F, Nicola S, Benincasa P editors. Advances in Research on Fertilization Management of Vegetable Crops. Advances in Olericulture. Springer, Cham.
- Sawers RJH, et al. 2017. Phosphorus acquisition efficiency in arbuscular mycorrhizal maize is correlated with the abundance of root-external hyphae and the accumulation of transcripts encoding PHT1 phosphate transporters. New Phytologist Foundation **214**:632-643.
- Sedlář O, Balík J, Černý J, Kulhánek M, Matěchová M. 2020a. Diagnostické metody pro stanovení fosforu v půdě a jejich praktické využití. Agromanuál.cz. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/diagnosticke-metody-pro-stanoveni-fosforu-v-pude-a-jejich-prakticke-vyuziti> (accessed February 2023).
- Sedlář O, Balík J, Kulhánek M, Suran P, Matěchová M. 2020b. Inovace diagnostiky výživného stavu plodin fosforem a sírou. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Sharma N, Schneider-Canny R, Chekhovskiy K, Kwon S, Saha MC. 2020. Opportunities for increased nitrogen use efficiency in wheat for forage use. Plants (e121738) DOI: 10.3390/plants9121738
- Shuai X, Li X, Yost RS, Wendroth O. 2016. State-space estimation of the intrinsic soil phosphorus pools from the Mehlich-3 test, Communications in Soil Science and Plant Analysis **47**:1058-1068.
- Schleuss PM, Widdig M, Heintz-Buschart A, Kirkman K, Spohn M. 2020. Interactions of nitrogen and phosphorus cycling promote P acquisition and explain synergistic plant-growth responses. Ecological Society of America (e03003) DOI: 10.1002/ecy.3003.
- Six L, Smolders E, Merckx R. 2013. The performance of DGT versus conventional soil phosphorus tests in tropical soils—maize and rice responses to P application. Plant and Soil **366**:49-66.

- Smatanová M. 2022. Výsledky agrochemického zkoušení zemědělských půd za období 2016 – 2021. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brno.
- Stevens G, Dunn D, Rhine M. 2018. Soil testing Bray-1 phosphorus with non-reagent grade hydrochloric and sulfuric acids. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **49**:958-966.
- Sun Y, Zhang M, Song T, Xu S, Luo L, Wong J, Zhu X, Liu H. 2022. Moderate potassium ferrate dosage enhances methane production from the anaerobic digestion of waste activated sludge. *Environmental Technology* (e2023222) DOI: 10.1080/09593330.2021.2023222.
- Šmidrkal J, Filip V, Bělohav Z, Zámotný P, Hönl V. 2008. Současný stav a perspektivy využití rostlinných olejů. *Chemické listy* **102**:984-991.
- Tagoe SO, Horiuchi T, Matsui T. 2010. Effects of carbonized chicken manure on the growth, nodulation, yield, nitrogen and phosphorus contents of four grain legumes. *Journal of Plant Nutrition* **33**:684-700.
- Tesser R, Vitiello R, Russo V, Turco R, Serio MD, Lin L, Li Ch. 2020. Oleochemistry Products. Pages 201-268 in Li C, Xiao Z, He L, Serio M, Xie X, editors. *Industrial Oil Plant*. Springer, Singapore.
- Truhlář T, Novák V, Hradil T, Logrová M. 2006. Řepka olejná z pohledu zpracovatele. Pages 20-24 in SETUZA a.s. editor. *Sborník z konference „Prosperující olejniný“*. SETUZA a.s.
- Vance CP, Uhde-Stone C, Allan DL. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist Foundation* **157**:423-447.
- Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2016. *Výživa a hnojení polních plodin*. Profi Press s.r.o., Praha.
- Varényiová M, Ducsay L. 2015. Vplyv rôznych dávok bóru na výšku úrody a obsah oleja v semene kapusty repkovej pravej (*Brassica napus, L.*). Pages 64-68 in Švachula V, Vach M, Bečka D, editors. *Prosperující olejniný 2015*. Katedra rostlinné výroby, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Venclová B. 2017. Vývoj pěstování řepky v České republice. Profi Press. Available from <https://uroda.cz/vyvoj-pestovani-repky-v-ceske-republice/> (accessed January 2023).
- Veneklaas EJ, et al. 2012. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. *New Phytologist Foundation* **195**: 306-320.
- Vistoso E, Iraira S, Sandaña P. 2021. Phosphorus use efficiency in permanent pastures in andisols. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* **21**:2587-2599.
- Vozár Ľ, Kovár P, Hric P, Verešová P. 2018. Uplatnenie polysulfidov vo výžive trávnikov. *Agrochemia* **22**:31-37.

- Wanasundara JPD. 2011. Proteins of brassicaceae oilseeds and their potential as a plant protein source. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **51**:635-677.
- Wanek W, Zotz G. 2011. Are vascular epiphytes nitrogen or phosphorus limited? A study of plant ^{15}N fractionation and foliar $\text{N} : \text{P}$ stoichiometry with the tank bromeliad *Vriesea sanguinolenta*. *New Phytologist Foundation* **192**:462-470.
- Wang BL, et. al. 2010. Nitric oxide is involved in phosphorus deficiency-induced cluster-root development and citrate exudation in white lupin. *New Phytologist Foundation* **187**:1112-1123.
- Wang BL, Shen JB, Zhang WH, Zhang FS, Neumann G. 2007. Citrate exudation from white lupin induced by phosphorus deficiency differs from that induced by aluminum. *New Phytologist Foundation* **176**:581-589.
- Wang G, Chen B, Khan KS, Zheng W, Liang H, Han Z, Chen J. 2019. Novel value-added phosphorus-potassium-activator fertilizers improve phosphorus use efficiency and crop yields. *Environmental Pollutants and Bioavailability* **31**:323-330.
- Wen Z, Li H, Shen Q, Tang X, Xiong Ch, Li H, Pang J, Ryan MH, Lambers H, Shen J. 2019. Tradeoffs among root morphology, exudation and mycorrhizal symbioses for phosphorus-acquisition strategies of 16 crop species. *New Phytologist Foundation* **223**:882-895.
- Xie et al. 2022. Determination of critical phosphorus dilution curve based on capsule dry matter for flax in northwest China. *Agronomy* **12**.
- Xu G, Xiaorong F, Miller AJ. 2012. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *The Annual Review of Plant Biology* **63**:153-182.
- Yang G, Zuo Q, Liu R, Yin C, Shi J, Hui F, Leng S. 2016. Characteristics of P accumulation and distribution at the maturity stage of *Brassica Napus* varieties with different phosphorus use efficiency for grain production. *Journal of Plant Nutrition* **39**:1958-1970.
- Young EO, Ross DS, Hoskins BR. 2017. Phosphorus in Morgan soil test extracts measured by molybdate colorimetric and inductively coupled plasma spectroscopy methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **48**:2434-2446.
- Young HS, McCauley DJ, Dirzo R. 2011. Differential responses to guano fertilization among tropical tree species with varying functional traits. *American Journal of Botany* **98**:207-214.
- Zbiral J, Čižmarová E, Obdržálková E, Rychlý M, Vilamová V, Srnková J, Žalmanová A. 2016. Analýza půd I. Jednotné pracovní postupy. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Národní referenční laboratoř, Brno.
- Zbiral J, Němec P. 2002. Comparison of Mehlich 2, Mehlich 3, CAL, Egner, Olsen, and 0.01 M CaCl_2 extractants for determination of phosphorus in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **33**:3405-3417.
- Zhong H, Kim YN, Smith C, Robinson B, Dickinson N. 2017. Seabird guano and phosphorus fractionation in a rhizosphere with earthworms. *Applied Soil Ecology* **120**:197-205.

- Zhu M, et al. 2016. Molecular and systems approaches towards drought-tolerant canola crops. *New Phytologist Foundation* **210**:1169-1189.
- Ziadi N, Bélanger G, Gagnon B, Mongrain D. 2009. Mehlich 3 soil phosphorus as determined by colorimetry and inductively coupled plasma. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **40**:132-140.

