

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Ověření vhodnosti metody Mehlich 3 pro stanovení
přístupných makroprvků v půdě pro pšenici ozimou**

Bakalářská práce

**Johanka Hypiusevová
Rostlinná produkce**

doc. Ing. Martin Kulháněk, Ph.D.

© 2021 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci „Ověření vhodnosti metody Mehlich 3 pro stanovení přístupných makroprvků v půdě pro pšenici ozimou“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne _____

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Martinu Kulhánkovi, Ph.D. za lidský přístup, cenné rady a ohromnou pomoc jak při psaní teoretické části, tak při zpracovávání výsledků práce. Další díky patří RNDr. Martinu Orctovi za nesčetné rady a motivaci. Ráda bych též poděkovala mým spolužákům, s nimiž jsem prošla celé bakalářské studium a bez nichž by studium postrádalo hluboké debaty a výstižná glosa.

Ověření vhodnosti metody Mehlich 3 pro stanovení přístupných makroprvků v půdě pro pšenici ozimou

Souhrn

Výživa makroprvky je stěžejním předpokladem pro správný růst, vývoj a výnos rostlin. V době stále vyššího zájmu o integrované zemědělství je znalost přístupných živin v půdě pro plodiny nezbytná. Pšenice ozimá je nejpěstovanější obilninou v České republice i ve světě. Zaujímá téměř 1/3 osevních ploch. Z tohoto důvodu se jeví jako první volba pro ověření, zda lze analýzou půdy metodou Mehlich 3 zjistit množství pro ni přístupných makroprvků.

Metoda Mehlich 3 je univerzálním činidlem pro stanovení makro i mikroprvků. V praxi je například používána v rámci agrochemického zkoušení půd. Je využívána jak v ČR, tak v USA či Austrálii. Mehlich 3 je velmi silné extrakční činidlo, proto existuje podezření, že extrahuje i rostlinám nepřístupné formy živin. Proto byly v rámci této práce provedeny srovnávací studie i s vodným výluhem, tj. metodou ověřenou pro stanovení okamžitě přístupných makroprvků. Cílem práce pak bylo srovnat takto stanovené obsahy v půdě, s celkovým obsahem makroprvků v nadzemní hmotě pšenice.

V této práci byly provedeny analýzy vzorků ornice odebraných nekarbonátových půd ($\text{pH} \leq 6,99$) a karbonátových půd ($\text{pH} \geq 7,00$). Z těchto vzorků bylo stanoveno množství fosforu, draslíku, vápníku, hořčíku a síry metodou Mehlich 3 a vodným výluhem.

V rámci srovnávací analýzy byly vzájemně porovnávány obsahy makroprvků stanovených metodou Mehlich 3 a vodným výluhem s celkovými obsahy makroprvků v sušině nadzemní hmoty rostlin pšenice (BBCH 49-59). To vše prostřednictvím korelační a regresní analýzy.

Korelační analýza vztahů mezi obsahy jednotlivých makroprvků stanovených metodou Mehlich 3 a jejich obsahy v sušině rostlin dosáhla signifikantních výsledků v případě fosforu, hořčíku a síry na nekarbonátových půdách. Korelační koeficienty (r) dosáhly hodnot: 0,328; 0,310; 0,544 při hladině významnosti $p < 0,05$.

Na půdách karbonátových byly zjištěny průkazné vztahy obsahů P a Mg stanovených metodou Mehlich 3 a jejich obsahů v sušině pšenice – $r = 0,465$; $0,456$.

Při stejné analýze s vodným výluhem byly zjištěny průkazné vztahy pouze pro S na nekarbonátových půdách ($r = 0,454$) a pro P na karbonátových půdách ($r = 0,408$).

Druhým cílem této práce bylo srovnání metody Mehlich 3 s vodným výluhem pro extrakci makroprvků z půdy. Nejtěsnější vztah na nekarbonátových půdách byl zjištěn pro obsah síry ($r = 0,880$). Avšak i korelační analýzy vztahu obsahů P, K a Ca byly vyhodnoceny jako silně statisticky průkazné. Na půdách karbonátových byly vztahy v případě všech sledovaných makroprvků vyhodnoceny jako průkazné. Nejtěsnějších korelací bylo dosaženo v případě síry $r = 0,846$ a fosforu $r = 0,811$.

Ukazuje se tak, že pro stanovení přístupných forem makroprvků pro pšenici ozimou je metoda Mehlich 3 přinejmenším stejně vhodná jako vodný výluh.

Klíčová slova: pšenice ozimá; Mehlich 3; vodný výluh; makroprvky v půdě a v rostlině

Testing of Mehlich 3 extraction ability to determine the content of macronutrients in soil available for winter wheat

Summary

Nutrition with macronutrients is the main presupposition for the right growth, emergence, and yield of plants. In the time of bigger interest in integrated farming is knowledge about available nutrients in soil necessary for crops. Winter wheat is the most planted cereal in the Czech Republic (CR) and also in the world. It occupies nearly 1/3 of the sown area. This is the reason why it seems like the first choice for testing if it is possible to determine the amount of macronutrients available for wheat in soil by Mehlich 3 extraction.

Mehlich 3 method is a universal reagent for the determination of macro and micronutrients. It is used in the CR and also in the USA and Australia in a frame of agrochemical soil testing. Mehlich 3 is a very strong extractant, so it is suspected that it extracts forms of nutrients that are not bioavailable. Therefore, in this bachelor's thesis, comparative studies are performed with water extract, e.g. method verified for determination of immediately bioavailable macroelements. This thesis aimed to compare the results of mentioned soil extractions with the total content of macronutrients in the above-ground mass of wheat.

In this thesis, topsoil samples of non-carbonate ($\text{pH} \leq 6,99$) and carbonate soils ($\text{pH} \geq 7,00$) were analysed. The amount of phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and sulphur was determined using Mehlich 3 method and water extract. Furthermore, both, water extract and Mehlich 3 results were compared with the total content of macronutrients in wheat (BBCH 49-59) aboveground dry biomass using correlation and regression analysis.

The correlation analysis of the relationships between the contents of each macroelement determined by the Mehlich 3 method and their contents in plant biomass achieved significant results in the case of phosphorus, magnesium, and sulphur on non-carbonate soils. The correlation coefficients (r) reached the values: 0.328; 0.310; 0.544 at level of significance $p < 0.05$. On carbonate soils, significant relationships were found in contents of P and Mg – $r = 0.465$; 0.456.

In the same analysis with water extract, significant relationships were found only for S on non-carbonate soils ($r = 0.454$) and for P on carbonate soils ($r = 0.408$).

The second aim of this thesis was to compare Mehlich 3 method with water extract for soil macronutrient extraction. The closest relationship on non-carbonate soils was found for sulphur content ($r = 0.880$). However, correlation analyses of the relationship between P, K, and Ca contents were also evaluated as strongly statistically significant. On carbonate soils, the relationships were evaluated as significant in the case of all monitored macroelements. The closest correlations were found for sulphur $r = 0.846$ and phosphorus $r = 0.811$.

It appears that the Mehlich 3 method is at least as suitable as a water extract for determining the bioavailable forms of macroelements for winter wheat.

Keywords: winter wheat; Mehlich 3; water extract; macronutrients in plant and soil

Obsah

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 1 Úvod | 8 |
| 2 Hypotézy | 9 |
| 3 Cíl práce | 9 |
| 4 Literární rešerše | 10 |
| 4.1 Makroprvky | 10 |
| 4.1.1 Fosfor | 11 |
| 4.1.1.1 Fosfor v rostlině | 11 |
| 4.1.1.2 Fosfor v půdě | 12 |
| 4.1.2 Draslík | 12 |
| 4.1.2.1 Draslík v rostlině | 12 |
| 4.1.2.2 Draslík v půdě | 13 |
| 4.1.3 Hořčík | 14 |
| 4.1.3.1 Hořčík v rostlině | 14 |
| 4.1.3.2 Hořčík v půdě | 15 |
| 4.1.4 Síra | 16 |
| 4.1.4.1 Síra v rostlině | 16 |
| 4.1.4.2 Síra v půdě | 17 |
| 4.1.5 Vápník | 17 |
| 4.1.5.1 Vápník v rostlině | 17 |
| 4.1.5.2 Vápník v půdě | 19 |
| 4.2 Pšenice ozimá | 20 |
| 4.2.1 Výživa pšenice | 20 |
| 4.2.1.1 Hnojení dusíkem | 22 |
| 4.2.1.2 Hnojení fosforem | 22 |
| 4.2.1.3 Hnojení draslíkem | 22 |
| 4.2.1.4 Hnojení hořčíkem | 22 |
| 4.2.1.5 Hnojení sírou | 22 |
| 4.3 Možnosti extrakce prvků | 23 |
| 4.3.1 Mehlich 1 | 23 |
| 4.3.2 Mehlich 3 | 23 |
| 4.3.3 Mehlich 2 | 24 |
| 4.3.4 Lancaster | 24 |
| 4.3.5 Vodný výluh | 24 |

| | |
|---|-----------|
| 5 Metodika | 25 |
| 5.1 Odběr vzorků | 25 |
| 5.2 Zpracování vzorků | 25 |
| 5.3 Provedené analýzy | 25 |
| 5.3.1 Hodnota výměnného pH | 25 |
| 5.3.2 Stanovení obsahu okamžitě přístupných makroprvků v půdě vodným výluhem. | 25 |
| 5.3.3 Stanovení potenciálně přístupných makroprvků v půdě metodou Mehlich 3 | 25 |
| 5.3.4 Analýzy rostlin..... | 26 |
| 5.3.5 Měření obsahu makroprvků ve výluzích..... | 26 |
| 5.4 Statistické vyhodnocení | 26 |
| 6 Výsledky | 27 |
| 6.1 Nekarbonátové půdy | 27 |
| 6.1.1 Regresní analýza obsahu živin v nadzemní hmotě a v Mehlich 3 | 28 |
| 6.1.2 Regresní a korelační analýza obsahu živin v nadzemní hmotě a ve vodném výluhu | 31 |
| 6.1.3 Regresní a korelační analýza metody Mehlich 3 a vodného výluhu..... | 31 |
| 6.2 Karbonátové půdy | 32 |
| 6.2.1 Regresní analýza obsahu živin v nadzemní hmotě a v Mehlich 3 | 33 |
| 6.2.2 Regresní a korelační analýza obsahu živin v nadzemní hmotě a ve vodném výluhu | 36 |
| 6.2.3 Regresní a korelační analýza metody Mehlich 3 a vodného výluhu..... | 36 |
| 7 Diskuze | 37 |
| 8 Závěr | 41 |
| 9 Literatura | 42 |

1 Úvod

Správná výživa makroprvky je pro růst, vývoj a výnosnost plodin, potažmo všech rostlin, stěžejním předpokladem. Z tohoto důvodu je pro praxi nutné znát množství jednotlivých makroprvků v půdě. Jejich nedostatek vede ke stresu rostlin a nižšímu výnosu či v krajním případě může být i letální. Na druhé straně i nadbytek některých prvků může vést k poruchám výživy např. nadbytek draslíku k nedostatku vápníku.

V této práci se budu zabývat analýzami fosforu, draslíku, vápníku, hořčíku a síry, jejichž pro rostliny přístupné množství, kromě síry, se sleduje v rámci agrochemického zkoušení zemědělských půd (AZZP). Vzhledem k vysoké dynamice dusíku v půdě, který se mezi makroprvky též řadí, není jeho analýza v rámci AZZP prováděna. Extraktantem v rámci AZZP je Mehlich 3, který je jedním z nejsilnějších extrakčních činidel pro stanovení přístupných živin. Z tohoto důvodu nemusí být metodou Mehlich 3 stanoveno pouze množství pro rostliny přístupných makroprvků. Proto je hlavním cílem této práce porovnat obsahy živin stanovených metodou Mehlich 3 s celkovými obsahy stejných živin v nadzemní hmotě rostlin. Jako kontrolní extrakční činidlo pro stanovení obsahu výše uvedených makroprvků v půdě bude použit i vodný výluh, který je uváděn jako vhodný pro stanovení rostlinám okamžitě dostupných živin.

Metoda Mehlich 3 je využívána nejen v České republice, ale i v USA či Austrálii. Důvodem je její univerzálnost a možnost extrakce nejen výše zmíněných makroelementů, ale i mikroelementů jako např. mědi, zinku či manganu. Mnoho studií se zabývá porovnáváním metody Mehlich 3 s jinými extrakčními činidly pro stanovení množství živin v půdě, avšak jen málo pokusů se věnuje problematice týkající se stanovení skutečně přístupných živin pro konkrétní polní plodiny, vycházejících ze srovnání obsahu živin v rostlině s obsahem živin stanoveným metodou Mehlich 3.

Vzhledem ke kyselé povaze činidla Mehlich 3 lze předpokládat snížení jeho účinnosti na karbonátových půdách, kvůli jejich vyššímu pH, které může působit neutralizačně na toto činidlo. Z tohoto důvodu můžeme předpokládat viditelné rozdíly mezi výsledky analýz nekarbonátových půd ($\text{pH}/\text{CaCl}_2 \leq 6,99$) a karbonátových půd ($\text{pH}/\text{CaCl}_2 \geq 7,00$).

Cílovou plodinou, jejíž nadzemní hmota bude v rámci tohoto srovnání analyzována, je pšenice ozimá (*Triticum aestivum* L.), protože se jedná nejpěstovanější plodinou v České republice. Její výměra dosahuje téměř 1/3 celkové orné půdy v ČR. Obdobné osevnické plochy dosahuje i ve světě. Z toho důvodu je znalost množství skutečně přístupných makroprvků v půdě zejména pro pšenici určujícím faktorem pro stanovení množství aplikovaných hnojiv. Zjištění této práce tak mohou být podkladem pro pěstitele této plodiny, a to z environmentálního i ekonomického hlediska.

2 Hypotézy

Mehlich 3 je jedním z nejsilnějších extrakčních činidel pro stanovení přístupných živin v půdě. Lze tedy očekávat, že bude stanovovat i některé rostlinám nepřístupné formy makroprvků. To se může projevit na horších korelacích s obsahy makroprvků v rostlinách ve srovnání s ostatními slabšími extrakčními činidly.

3 Cíl práce

Cílem práce bylo srovnat obsahy makroprvků v půdě stanovené metodou Mehlich 3 s obsahy stanovenými v nadzemní hmotě pšenice. Dalším cílem bylo srovnat výsledky metody Mehlich 3 s obsahy makroprvků v půdě s jinými typy výluhů určenými pro stanovení přístupných živin.

4 Literární rešerše

4.1 Makroprvky

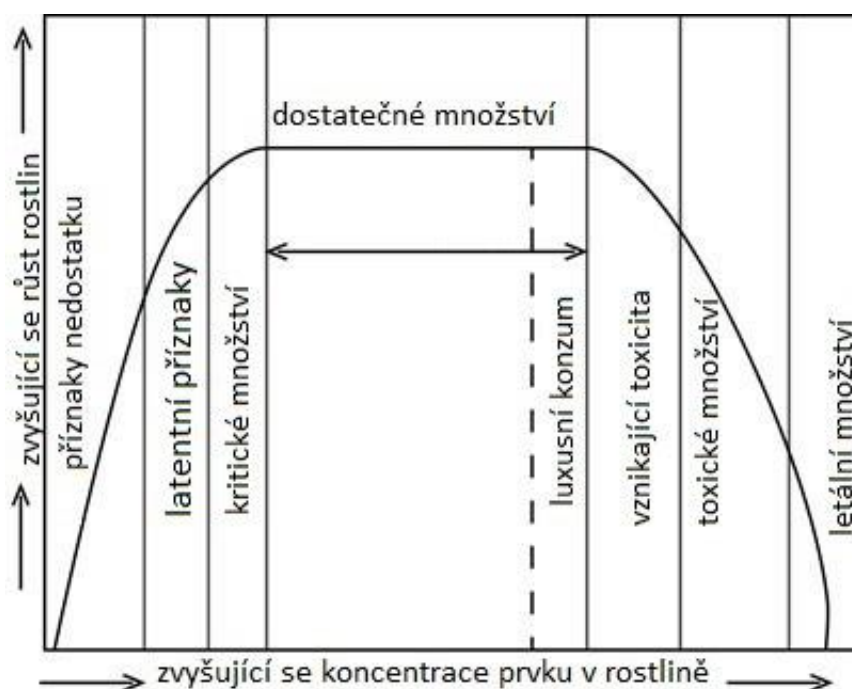
Makroprvky jsou esenciální chemické prvky nutné pro růst a metabolismus rostlin. Dle Arnona a Stouta (1939) se za esenciální považují takové prvky, které splňují následující kritéria:

1. rostlina není schopna bez nich dokončit životní cyklus
2. jejich funkci nemůže nahradit jiný chemický prvek
3. musí se přímo podílet na metabolismu rostlin.

Dle této definice nelze prvky, které zmírňují toxicitu jiných prvků nebo nahrazují prvek, nazvat esenciálními pro růst rostlin (Marschner 2012).

Vaněk et al. (2016) mezi makroprvky řadí uhlík (C), kyslík (O), vodík (H), dusík (N), fosfor (P), draslík (K), vápník (Ca), hořčík (Mg) a síru (S). Maathius (2009) uvádí, že tyto prvky jsou rostlinami vyžadovány v poměrně velkém množství, avšak v půdě se nacházejí v podstatně menší koncentraci, proto je musí rostliny často akumulovat proti koncentračnímu gradientu. Přístupnost makroprvků v půdě (často nízká) se může měnit v důsledku faktorů jako jsou srážky, teplota, půdní typ a pH půdy.

Reakci růstu rostlin na množství živin v pletivech znázorňuje obrázek 1. Z něho vyplývá, že problematický pro správný růst není pouze nedostatek, ale může jím být i nadbytek.



Obr. 1: reakce růstu rostlin na množství živin v pletivech (NRCCA Study Resources 2010)

V následujících podkapitolách jsou stručně zmíněny funkce živin P, K, Mg, S a Ca v rostlinách; formy, ve kterých jsou přijímány z půdy, jejich formy v půdě či příznaky jejich nedostatku.

4.1.1 Fosfor

4.1.1.1 Fosfor v rostlině

Fosfor tvoří přibližně 0,2 % sušiny rostlin. Je součástí klíčových molekul jako jsou nukleové kyseliny, fosfolipidy či ATP (Theodorou & Plaxton 1993). Pro optimální růst rostlin je požadavek fosforu 0,3 – 0,5 % v sušině během vegetativní fáze růstu (Marschner 2012). Po dusíku je druhým nejčastějším limitujícím makroprvkem pro růst (Schachtman et al. 1998).

Fosfor je rostlinami přijímán v aniontové formě převážně jako H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} . Musí být přijímán aktivně, protože jeho koncentrace v rostlinách může být 100 – 1000x větší než v půdě. K příjmu tedy rostliny potřebují energii z makroenergetické vazby v ATP. To způsobuje, že při nízkých teplotách rostliny nemají dostatek energie k jeho příjmu a mohou vykazovat známky nedostatku fosforu. Rostlina sama může přispět ke zlepšení příjmu prokořeněním většího objemu půdy, ze kterého může získávat P. Tento mechanismus je však na úkor růstu nadzemní biomasy (Vaněk et al. 2016). Další rostlinnou strategií pro získání P v případě, že se objevuje jeho nedostatek v pletivech, je zvýšení kořenové sekrece. Tím se zvýší rozpustnost i přijatelnost P v rhizosféře. Tento proces může snížit pH rhizosféry o 2 – 3 stupně (Marschner 2012). Bais et al. (2006) uvádějí, že tuto reakci zkoumali Kania et al. (2003) či Uhde-Ston et al. (2003) u lupiny bílé (*Lupinus alba*), která při nedostatku P vytvořila shluky specializovaných kořenových struktur, které zvyšovaly exudaci organických kyselin, tím napomáhaly příjmu P z půdy. Tyto pokusy byly však prováděny laboratorních podmínkách. Dle Shen et al. (2011) k lepšímu přijímání P slouží rostlinám mykorhizní symbióza. Díky mykorhizním hyfám se zvýší absorpční povrch pro příjem fosforu.

Již přijatý fosfor se rychle zabudovává do organických sloučenin a transportuje do mladých listů, vegetačního vrcholu a dále do květů a semen. V semenech je obsah P z 60 – 80 % tvořen fytinem, ten tvoří u obilovin 1 % obsahu semen a např. u řepky až 4 % (Vaněk et al. 2016). Organický P se esterifikací váže na hydroxylové skupiny alkoholů a cukrů (Marschner 2012). Alternativně se fosfátová skupina (PO_4^{3-}) pomocí pyrofosfátových vazeb váže na jiné fosfátové skupiny. Tvorba a narušení této vazby je hlavním mechanismem homeostáze buněčné energie. Při rozpadu této vazby se uvolní z ATP energie (Maathuis 2009).

Fosfor zaujímá klíčovou roli ve struktuře DNA a RNA, kde jako součást nukleotidů tvoří páteř těchto makromolekul. Nukleotidy se též podílí na dalších funkcích v rostlinách. Kromě zmíněné struktury DNA a RNA aktivují meziprodukty při biosyntézách např. aminokyseliny při syntéze bílkovin nebo glukózu v procesu polyglukóz (Marschner 2012).

Nedostatek P způsobuje velké ztráty v rostlinné produkci, protože ho rostliny potřebují k růstu značné množství (Poirier & Bucher 2002; Karthikeyan et al. 2007; Cho et al. 2020). Kritické období pro příjem P je na samotném počátku vegetace, protože rostlina vyčerpá zásobu P ze semene a nemá dostatečný kořenový systém. Chladné a suché počasí též ztěžuje jeho příjem. Pokud rostliny trpí nedostatkem P, jedná se většinou o latentní nedostatek. Při déletrvajícím deficitu jsou rostliny menší, mají slabší stonky, obiloviny méně odnožují a listy i paty stébel mají špinavě zelenou až fialovou barvu (Vaněk et al. 2016).

Rostliny můžeme rozdělit podle schopnosti osvojit si P z méně rozpustných sloučenin. Hůře na tom jsou obiloviny, které následují brambory, cukrovka, jetel luční a hořčice. Nejlépe

si P osvojuje vojtěška, hrách, bob a pohanka (Vaněk et al. 2016). I proto se pohanka používá jako strnisková mezíplodina či jako součást biopásů (Janovská et al. 2008).

4.1.1.2 Fosfor v půdě

Obsah fosforu v půdě se pohybuje v rozmezí od 0,01 do 0,15 %. Vyšší zastoupení vykazují půdy s vyšším podílem organické hmoty.

Půdní fosfor lze rozdělit na:

- minerální
- organický

Většina forem vyskytujících se v půdě je pro rostliny nepřijatelná a vychází z kyseliny trihydrogenfosforečné (H_3PO_4). Vápenaté sloučeniny se mohou v příznivých podmínkách uvolňovat do půdního roztoku a tím se významně podílet na výživě rostlin (Vaněk et al. 2016). Barrow (2017) ve své studii uvádí, že optimální pH půdy pro příjem fosforu rostlinami je často uváděno v rozmezí 6 – 7. Z jeho výzkumu však vyplývá, že P je značně přístupnější s klesajícím pH půdy přibližně z 6 na 4. V tomto rozmezí zaznamenal zvýšenou rychlost příjmu P kořeny. Jeho závěr, že nižší pH je lepší pro příjem P, podporuje argumentem, že kořenové exudáty rostlin jsou kyselé povahy, tudíž logicky kyselější pH zpřístupňuje fosfor v půdě.

V půdě se vyskytuje 20 – 80 % organického P, z čehož velkou část tvoří fyty (Richardson 1994). Dále je organický fosfor imobilizován v tělech mikroorganismů. Po jejich odumření může být v procesech mineralizace opět zpřístupněn pro rostliny a tím být významný pro jejich výživu (Vaněk et al. 2016).

Pohyblivost P v půdním profilu je značně omezena, proto hnojení minerálními hnojivy na povrch půdy nepomáhá ke zlepšení výživy. Mimo jiné nejsou ani v povrchové vrstvě půdy kořeny, kterými by rostliny takto aplikované živiny mohly přijmout (Vaněk et al. 2016). Pohyb fosforu směrem ke kořenům je z malé části zajišťován hmotovým tokem. Většina pohybu je však představována difúzí, tudíž je celkový pohyb iontů velmi pomalý na vzdálenost delší než 5 mm nebo v případě, že je půda suchá (Troeh & Thompson 2005).

Pro zvýšení množství P v půdě můžeme aplikovat do půdy hnůj. Celkový obsah P v hnoji je velmi variabilní. V hnoji představuje anorganický P 50 až 90 % (Dou et al. 2000). Hnůj také obsahuje velké množství organického P, jako jsou fosfolipidy a nukleové kyseliny (Turner & Leytem 2004), které mohou být uvolňovány prostřednictvím mineralizace (Shen et al. 2011).

Gyaneshwar et al. (2002) uvádí, že dostupnost fosforu v půdě je limitujícím faktorem pro biologickou fixaci dusíku bakteriemi rodu *Rhizobium*.

4.1.2 Draslík

4.1.2.1 Draslík v rostlině

Obsah draslíku v sušině rostlin se pohybuje mezi 1,5 – 3,5 % (Vaněk et al. 2016). Toto množství může dosáhnout až 10 % (Liegh et al. 1984). Vyšší obsah K v pletivech je typický pro mladší rostliny, stárnutím pletiv klesá podíl K.

Rostliny přijímají draslík jako kationt K^+ . Může se jednat o aktivní příjem v případě nižší koncentrace K v půdním roztoku nebo o pasivní příjem za jeho zvýšené koncentrace. Při zvýšeném příjmu K může dojít k hromadění draslíku v pletivech rostlin a tím i k omezení

příjmu dalších kationtů jako jsou Mg^{2+} , Na^+ a Ca^{2+} (Vaněk et al. 2016). Může nastat i opačný problém, kdy při zvýšené hladině Na^+ či NH_4^+ je omezen příjem K^+ (Qi & Spalding 2004; Rus et al. 2004). Příjem je ovlivněn nejen samotnou koncentrací K v půdě, ale i vlhkostí, teplotou a intenzitou slunečního záření. Rostliny pěstované v podmínkách vyšší intenzity slunečního záření potřebují méně K (Vaněk et al. 2016).

Draslík je přijímán nejvíce na začátku vegetace (Vaněk et al. 2016). Experiment týkající se příjmu K kukuřicí ukázal, že 70 – 80 % veškerého K bylo přijato v době do začátku kvetení. Zbylých 20 – 30 % přibližně 3 – 4 týdny po kvetení (Prajapati & Mondí 2012). Obiloviny v druhé polovině vegetace K dokonce postupně vylučují kořeny do půdy (Vaněk et al. 2016).

Mnoho důležitých funkcí v rostlině je ovlivňováno draslíkem. Je velmi pohyblivý, a tím napomáhá transportu asimilátů do míst spotřeby a do zásobních orgánů. Transport sacharózy do zásobních vakuol je poháněn K^+ pumpou (Vaněk et al. 2016). Dále výrazně ovlivňuje osmotický tlak a tím i turgor buněk, což má vliv na celkové hospodaření s vodou. Při nedostatku vody je K přesunut rostlinou do svěřacích buněk průduchů, které se uzavrou, tudíž se sníží transpirace a rostliny lépe zvládají stres (Thomas & Thomas 2009). Při dobrém zásobení rostliny draslíkem se snižuje transpirační koeficient (množství vody potřebné na produkci sušiny). Další vliv má K na tvorbu a aktivaci esenciálních koenzymů jako jsou ATP, $NADP^+$, které ovlivňují syntézu bílkovin či sacharidů. Značně také ovlivňuje transport elektronů v thylakoidních membránách chloroplastů při fotosyntéze. To příznivě ovlivňuje fotoredukci a fosforylaci, což má vliv na vyšší poutání energie do ATP (Vaněk et al. 2016).

Dostatek draslíku má pozitivní vliv na vyžrávání pletiv, zesilování buněčné stěny rostlin a zmnožování sklerenchymatických buněk. Tím se snižuje nebezpečí poléhání obilnin i napadení škůdci je nižší (Vaněk et al. 2016). Dle Bhiha et al. (2010) má výživa K zásadní vliv na poléhání rýže.

Vybarvení květů a plodů je také způsobeno draslíkem. Výhodné pro květiny tedy je mít dostatek až nadbytek K. Výnos a kvalita produkce je též podmíněna dostatkem K. Jedná se jak o kvalitu zrna, tak o kvalitu hlíz bramboru či hlávek zelí (Vaněk et al. 2016).

Nedostatek K se projevuje na spodních listech rostlin žloutnutím a následně nekrotizací okrajů (Frageria 2001). Deficit se také projevuje horším snášením mrazu a častějším napadením houbovými chorobami (Vaněk et al. 2016).

4.1.2.2 Draslík v půdě

Draslík je obvykle nejvíce zastoupeným makroprvkem v půdě. Jeho celkový obsah se pohybuje od <0,01 % až do 4 %. Obvykle se jedná o přibližně 1 % (Wild 1988; Essington 2004).

Půdní draslík dělíme na:

- vodorozpustný
- výměnný
- fixovaný
- minerální

Mezi jednotlivými výše uvedenými formami K je v půdě udržovaná dynamická rovnováha. Až 98 % půdního K je v nedostupné formě (minerální a fixovaný K). Jedná se o primární minerály (živce či slídy) a sekundární jílové minerály (illity). Pro rostliny snadno

dostupný K, vodorozpustný a výměnný – adsorbovaný na půdní koloidy, činí pouze 1 – 2 % celkového množství K v půdě (Lalitha & Dhakshinamoorthy 2014). Fixovaný draslík nacházející se v mezivrstvách jílových minerálů může přejít do výměnné formy a tím se zpřístupnit pro rostliny (Vaněk et al. 2016). Fixace či uvolňování K zaleží na koncentraci K v půdním roztoku (Schneider et al. 2013). Fixace K je poměrně rychlý proces, ale uvolnění K do půdního roztoku je pomalé z důvodu silné vazby mezi K a jílovými minerály (Öborn et al. 2005). Minerální forma se pro rostliny zpřístupňuje velmi pomalu pouze díky procesu zvětrávání (Fotyma et al. 2013).

Dle Zörb et al. (2014) může být nevýměnný draslík mobilizován kořenovými exudáty. Hlavní složkou exudátů kukuřice jsou organické kyseliny jako kyselina citronová či kyselina šťavelová (Krafczyk et al. 1984).

Draslík je v půdě poměrně pohyblivým iontem. Proto může dojít ke jeho značným ztrátám vyplavováním. Nejcitlivějším půdním typem na tyto ztráty K jsou lehké písčité půdy, to z důvodu nižší sorpční kapacity (Alfaro et al. 2006).

Na sorpčním komplexu by měl draslík zaujímat přibližně 3 – 4 %. Pokud je tato hodnota vyšší, dochází k vytěšňování vápníku a hořčíku, což způsobuje jejich vyplavování a zhoršení výživy rostlin těmito prvky (Vaněk et al. 2016).

Pohyb K v půdě směrem ke kořenům probíhá z 96 % difúzí (Oliveira et al. 2004), další pohyb je zprostředkovan hmotovým tokem (Barber 1962).

Export draslíku z půdy je způsoben převážně u plodin, kde je sklizňovým produktem hmota vegetativního charakteru, např. řepa a kapusta (Vaněk et al. 2016).

4.1.3 Hořčík

4.1.3.1 Hořčík v rostlině

Obsah hořčíku v sušině rostlin je velmi variabilní a závisí na druhu rostliny, orgánu i jeho stáří (Vaněk et al. 2016). Richards (2017) uvádí, že obsah Mg v listech řepy se pohybuje mezi 0,25 a 0,60 % v sušině. Podle Vaňka et al. (2016) je obsah Mg v zrnu obilnin stabilně okolo 0,12 % a ve slámě 0,1 %.

Hořčík je přijímán jako kationt Mg^{2+} převážně pasivně díky elektrochemickému gradientu. Příjem samotný je ovlivněn zastoupením jednotlivých iontů v půdním roztoku. Značně nepříznivý vliv na jeho příjem má K^+ a také NH_4^+ . Pozitivní vliv na příjem má ale nitrátový aniont (NO_3^-) (Vaněk et al. 2016).

Nejznámější funkcí Mg je jeho postavení jako centrální atom molekul chlorofylu (Maathuis 2009). V něm je vázáno 15 – 20 % celkového množství Mg (White & Broadley 2009). V případě deficitu Mg může podíl vzrůst až na 30 % (Vaněk et al. 2016). Mg také slouží jako regulátor kation-aniontové rovnováhy v buňkách a jako osmoticky aktivní iont regulující buněčný turgor společně s K (Marschner 2012). Mg také působí na syntézu bílkovin. Ovlivňuje enzymatické oddělení polypeptidických řetězců od ribozomů. U obilovin s dostatečným obsahem Mg v pletivech pozitivně působí na příjem fosforu z půdy (Vaněk et al. 2016).

Marschner (2012) uvádí, že 5 – 10 % celkového množství Mg je pevně vázáno na pektiny buněčné stěny a těžce rozpustné soli ve vakuolách.

Nedostatek Mg se projevuje intervenózní chlorózou (Cakmak & Yazici 2010) nejprve na spodních listech, což je způsobeno dobrou mobilitou hořčíku v rostlině (Bergmann 1992; Gransee & Führst 2013). Tyto rostliny jsou velmi citlivé na sluneční záření (Chen et al. 2018). Deficit Mg projevující se chlorózou je u obilnin označován jako korálkovitá mozaika a u kukuřice jako pruhovitost (Vaněk et al. 2016). Následkem nedostatku Mg je snížený růst kořenů, protože chybí jejich zásobování sacharidů. Tím se zvyšuje riziko deficiencie dalších prvků a stresu ze sucha (Cakmak & Kirkby 2008). Obilniny s nedostatkem Mg mají zpožděný vývin a často opožděně metají nebo nemetají vůbec (Vaněk et al. 2016).

4.1.3.2 Hořčík v půdě

Obsah Mg v půdě se pohybuje mezi 0,05 a 0,5 % (Deng et al. 2006). Vaněk et al. (2016) uvádějí obsah půdního Mg v rozmezí 0,4 – 0,6 % a v půdách s podložím dolomitů může obsah dosáhnout až 10 %.

Půdní hořčík lze rozdělit na:

- nevýměnný – 95 % z celkového
- výměnný – do 5 % celkového
- vodorozpustný 1 – 10 % výměnného

Celkový obsah hořčíku v půdě je určován hlavně chemickým složením matečné horniny a stupněm jejího zvětrávání (Gransee & Führst 2013). Mimo minerální formy se Mg v půdě nachází i ve formě solí – síranů, fosforečnanů a dalších. Tyto soli jsou dobře rozpustné, a tak se při jejich výskytu v půdě nachází dostatek Mg v půdním roztoku pro rostlinnou výživu. Kromě Mg v půdním roztoku má pro výživu rostlin význam hořčík vázaný na půdní koloidy. Tam by měl zaujímat 10 – 15 % kationtové výměnné kapacity (Vaněk et al. 2016).

Kvůli slabé sorpci na sekundární jílové minerály je Mg^{2+} často vyplavován do hlubších vrstev půdního profilu, čímž je způsoben jeho nedostatek pro rostliny zvláště v oblastech s vyšším úhrnem srážek (Deng et al. 2006; Chen et al. 2018). Tento jev nastává, když v zimním a jarním období je větší množství srážek a Mg se vyplaví mimo zónu kořenů rostlin. Kvůli nízké transpiraci v tomto období je nízký i hmotový tok, a tak se Mg nedostává zpět ke kořenům (Vaněk et al. 2016).

Vliv na přijatelnost Mg má řada faktorů. Chemické a fyzikální vlastnosti půd patří mezi nejdůležitější faktory, které ovlivňují dostupnost Mg^{2+} pro rostliny (Guo et al. 2016). Optimální pH pro příjem Mg se pohybuje mezi 5,5 – 6,5. Kyselejší pH má negativní vliv na příjem Mg kvůli vyšším koncentracím H^+ a kationtům Al^{3+} , Fe^{2+} a Mn^{2+} , které se v kyselejších prostředí snadněji vyplavují do půdního roztoku (Vaněk et al. 2016). Mezi další faktory ovlivňující dostupnost hořčíku v půdě patří agronomická činnost. Do této kategorie lze zařadit druhy plodin pěstované na pozemku, systém střídání plodin či používání organických a minerálních hnojiv (Mikkelsen 2010; Gransee & Führst 2013). Pozitivně na příjem působí například hnojení fosforem (Vaněk et al. 2016).

4.1.4 Síra

4.1.4.1 Síra v rostlině

Síra je v poslední době považována za čtvrtou nejdůležitější živinu po dusíku, fosforu a draslíku. Rostliny potřebují k ideálnímu růstu mezi 0,1 a 0,5 % síry v sušině. Nejnížší nároky na množství síry mají plodiny čeledi lipnicovitých, následovány bobovitými a nejvyšší nároky má čeleď brukvovitých (Sutar et al. 2017).

Rostliny S přijímají ve formě síranového iontu SO_4^{2-} . Jeho příjem není výrazně ovlivněn koncentracemi dalších iontů v půdě ani půdními vlastnostmi. Primárně je transportována do mladých listů a meristémů. Rostliny síran dle potřeby redukuje na H_2S (Vaněk et al. 2016).

Aby rostliny mohly síru využít, musí ji nejprve zabudovat do organických sloučenin tím, že aktivují síran ATP. Při této reakci vzniká adenosinfosulfát (APS), a odštěpuje se pyrofosfát. APS je výchozí látka pro zabudování S do organických sloučenin v rostlině kdy se dle Vaněk et al. (2002) přenesou sulfátová skupina z APS na nosič (glutathion) a váže se na SH-skupinu nosiče tak, že je vodík nahrazen sulfurylovou skupinou SO_3H . Za účasti nosiče feredoxinu je tato skupina dále redukována na SH-skupinu, která reaguje s acetylserinem za vzniku cysteinu. Cystein je dle Vaněk et al. (2016) v pletivech první stabilní organickou sloučeninou. Z něj je poté syntetizována mimo jiné aminokyselina methionin, která se s cysteinem podílí na tvorbě peptidů.

Síra je nedílnou složkou různých bílkovin, vitamínů (B1, H), aminokyselin, antioxidantů či kofaktorů a základních živin nezbytných pro udržení růstu a vývoje rostlin v podmínkách vysoké salinity (Prasad & Shivay 2018; Reich et al. 2018; Riffat & Ahmad 2020). Taktéž má klíčovou roli ve tvorbě chlorofylu (Sutar et al. 2017). Kofaktory enzymů obsahující síru mají vliv na snížení toxicity těžkých kovů (Abrol & Ahmad 2003).

Sekundární sloučeniny síry (fytochelaniny, glukosinoláty či alliin) mají pozitivní vliv na rostliny. Jsou díky nim odolnější vůči abiotickým stresům i proti chorobám a škůdcům (De Kok et al. 2002; Kruse et al. 2007).

Kromě půdy mohou rostliny S přijímat z atmosféry, kde se vyskytuje jako SO_2 a H_2S (Maathius 2009). Vaněk et al. (2016) uvádí, že takto lze přijímat do 30 % z celkové potřeby síry.

Nedostatek síry v rostlinné produkci se začal projevovat po restrikcích v průmyslu. Tím se omezily spady síry z atmosféry, které většinou pokryly požadavky rostlin (Hawkesford & De Kok 2006).

Prvním projevem nedostatku síry je omezení syntézy bílkovin a enzymů. To způsobuje problémy při příjmu dusíku v nitrátové formě, protože není v dostatečné míře převáděn na NH_4^+ . To způsobuje omezení tvorby aminokyselin a bílkovin. Snižuje se i fotosyntetická asimilace, čímž se sníží obsah sacharózy a škrobu. To má za následek zhoršení kvality produkce hlavně u rostlin náročných na S (Vaněk et al. 2016).

Síra není tak dobře pohyblivá v rostlinách jako draslík či fosfor. Proto se příznaky nedostatku projevují nejprve na mladších listech. Specifickým symptomem jsou intervenózní chlorózy následované červenáním stonků a listů od okrajů ke středu (Tiwari et al. 2006; Stuar et al. 2017). Při extrémním nedostatku mohou listy až zbledat. Kritická úroveň nedostatku síry je 0,15 % v sušině nadzemní hmoty (Tiwari et al. 2006; Prasad & Shivay 2018).

4.1.4.2 Síra v půdě

Obsah síry v půdě se pohybuje v rozmezí 0,005 – 0,05 %. Až 98 % z celkového množství v půdě může být obsaženo v organických sloučeninách. Malý podíl síry (1 – 3 %) je vázán v biomase mikroorganismů. Ty se mohou značně podílet na výživě rostlin po mineralizaci (Vaněk et al. 2016).

Půdy obsahují anorganické i organické formy síry. S v organické formě dělíme na oxidovanou a redukovanou. Oxidovaná forma zahrnuje síru v esterech s lipidy, polysacharidech či glukosinolátech. Ta je snadněji mineralizovatelná. Redukovaná forma je zastoupena aminokyselinami v bílkovinách. Jejich mineralizace je složitější (Vaněk et al. 2016).

V aerobních podmínkách je anorganická S přítomná hlavně jako síran (SO_4^{2-}) a to je také forma, ve které rostliny přijímají nejvíce S. Redukční prostředí vytvořené větším množstvím vody však může vést ke vzniku sulfidů, jako jsou FeS , FeS_2 a H_2S (Maathius 2009). Síra adsorbovaná na půdní částice je také významným zdrojem této živiny pro rostliny. Mezi sírou v půdním roztoku ve formě SO_4^{2-} a výměnnou sorpcí vázanou S se v půdě udržuje rovnováha (Kulhánek et al. 2018a).

Síra v síranové podobě je většinou v půdním roztoku ve formě síranů Na, K, Ca nebo Mg. Síran je kořeny přijímán díky difúzi nebo hmotovému toku. Na půdách, které obsahují přes 5 mg/kg síranů, jsou požadavky rostlin na tuto živinu pokryty hmotovým tokem. Dostatečným množstvím pro mnoho druhů je i obsah 3 – 5 mg/kg (Sutar et al. 2017). Vaněk et al. (2016) uvádí, že dříve byl obsah síranů v půdním roztoku dostatečný i pro náročné plodiny na S, ale nyní je nutné tuto živinu doplňovat minerálními hnojivy.

Síran se snadno vyplavuje z horní vrstvy půdy. Jeho ztráty jsou největší, když v půdním roztoku dominují jednomocné kationty jako K^+ a Na^+ . Na kyselějších půdách tyto ztráty nejsou tak markantní. Zvláště když je v půdním roztoku přítomný kationt Al^{3+} (Eriksen 1996; Knights et al. 2000). Nízká sorpce i imobilizace síranového iontu přispívá k jeho snadnému vyplavování (Vaněk et al. 2016).

Zdrojem organické síry jsou posklizňové zbytky, kořeny rostlin a statková hnojiva. Dalšími zdroji S v půdě jsou minerální hnojiva (např. síran amonný) a síra z atmosféry, kde se nachází ve formě SO_2 . Zdrojem oxidu siřičitého je průmyslová činnost a v některých oblastech i sopečná činnost (Vaněk et al. 2016).

4.1.5 Vápník

4.1.5.1 Vápník v rostlině

Vápník je rostlinami vyžadován pro strukturní funkce v buněčné stěně a v membránách, jako protikation pro anorganické a organické anionty ve vakuole a jako intracelulární přenašeč v cytosolu (Marschner 2012). Obsah vápníku v sušině se pohybuje od 0,4 do 1,5 %. Z půdy ho rostliny přijímají ve formě kationtu Ca^{2+} . Jeho příjem je ovlivněn hlavně vlhkostí půdy. Při nižší vlhkosti ho je přijímáno více (Vaněk et al. 2016).

Rostliny Ca přijímají převážně kořenovými špičkami a v oblasti, kde jsou iniciovány boční kořeny. Přijatý vápník je transportován xylémem (White & Broadley 2003). Není známo,

že by se vápník mohl reutilizovat ze starších buněk, proto je nutné pravidelné zásobování mladých pletiv z půdy nově přijatým vápníkem (Vaněk et al. 2016).

Hlavními funkcemi vápníku v rostlinách jsou stavební a signální. Stavební funkce se týká především stabilizace buněčných stěn a membrán. Největší množství Ca je na hraniční ploše cytoplazmy a buněčné stěny, kde je vázán na karboxylovou skupinu polygalakturonové kyseliny. Ca tvoří vápňkové můstky, které stabilně propojují makromolekuly, a tím zvyšují pevnost buněčné stěny (Vaněk et al. 2016). Pokud nastane nedostatek Ca, membrány v buňkách se rozpadají a rostliny ztratí buněčnou strukturu (Marschner 2012).

Membránový stabilizační účinek Ca se projevuje nejvýrazněji za stresových podmínek, jako je mrznutí, nízká teplota nebo anaerobní podmínky. Kdy cytosolický Ca^{2+} iniciuje opravu membrán a adaptivní reakce na výše uvedené stresové podmínky (Marschner 2012).

Koncentrace volného Ca^{2+} v cytoplazmě musí být udržována na nízké úrovni, aby nedošlo k vysrážení fosforečnanů. Toho je docíleno ukládáním Ca do vakuol a endoplazmatického retikula či nízkou propustností membrán pro Ca (Vaněk et al. 2016). Pro transdukcii signálu (např. světla) na fyziologickou odpověď je nutná přechodná změna koncentrace volného cytosolického Ca^{2+} (Marschner 2012).

Polní plodiny z hlediska možnosti přímého vápnění dělíme na:

- ty které dobře reagují na vápnění – vojtěška, cukrová řepa, řepka olejka, hořčice, zelí, sója, kukuřice, pšenice, ječmen, jetel, bob, fazol, hrách, krmná kapusta
- ty ke kterým se vápnit nedoporučuje – žito, oves, jetel plazivý, brambory
- ty ke kterým nikdy nevápníme – len, slunečnice, ptačí noha setá, lupina a většina trav

Při vápnění je třeba dávat pozor na výživu mikroprvky (např. bórem), protože se zvýšením pH půdy se snižuje jejich přístupnost pro rostliny. Na bór náročná je řepka olejka a cukrová řepa (Matula 2011). Zvýšení pH ale snižuje pohyblivost a přijatelnost těžkých kovů (Vaněk et al. 2016).

Nedostatek vápníku je většinou zapříčiněn změnou půdních podmínek. Klesne podíl Ca v KVK, sníží se hodnota pH a poklesne obsah Ca v půdním roztoku. Většinou se jedná o latentní nedostatek (Vaněk et al. 2016). Vnější projevy nedostatku jsou známé spíše v zahradnictví. Dochází k nim, když je vápník momentálně nedostupný pro vyvíjející se pletiva. Mezi nejznámější projevy patří hořká pihovitost jablek, nekrózy květního konce plodů paprik, rajčat a vodního melounu či skvrnitost listů u listové zeleniny (White & Broadley 2003). Nedostatek Ca v zemědělství je známý lámáním vegetačního vrcholu řepky a máku (Vaněk et al. 2016).

Nadbytek vápníku většinou rostlinám nezpůsobuje problémy. Pouze u brambor se může projevit obecná strupovitost hlíz, protože nadbytek Ca způsobí zvýšení pH půdy, tím sníží dostupnost manganu, jehož nedostatek se projevuje strupovitostí (Vaněk et al. 2016). Vyšší pH půdy rovněž podporuje rozvoj aktinomycetes způsobujících strupovitost (Troeh & Thompson 2005).

4.1.5.2 Vápník v půdě

Vápník má významný vliv na chemické, fyzikální i biologické procesy (eliminaci negativního účinku iontů H^+ , Al^{3+} , Mn^{2+} , koagulaci koloidů či na aktivitu i výskyt mikroorganismů). Obsah Ca je značně variabilní od 0,15 % na půdách kyselých a v humidních oblastech, kde je z půdního profilu splavován do větších hloubek, až k 10 % na karbonátových půdách (Vaněk et al. 2016).

Silné zvětrávání a vyplavování půdy může vést k nedostatku Ca, což je stav, který je urychlován nízkým pH půdy (Maathius 2009).

Příjem vápníku z půdy je podporován anionty. Největší vliv má NO_3^- , dále Cl^- a nejmenší SO_4^{2-} . Naopak vyšší koncentrace kationtů příjem zhoršují. Největší vliv má H^+ a NH_4^+ a nejmenší K^+ (Richter 2004).

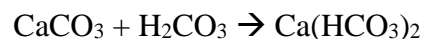
Ca přispívá k půdní úrodnosti svým působením na vyvločkování půdních koloidů. To přispívá k dobré struktuře půdy, díky čemu dosáhne půda optimálního vzdušného a vodního režimu (Richter 2007; Norton 2013). Norton (2013) také uvádí, že k udržení dobrého vodního režimu a struktury půdy přispívá Ca tím, když udržuje sodíkový kationt (Na^+) pod 5 % kationtové výměnné kapacity (KVK).

Půdní vápník dělíme na:

- nevýměnný
- výměnný

Nevýměnný Ca se v půdě vyskytuje v těžko rozpustných sloučeninách, mezi ně řadíme uhličitany (vápence), křemičitany, hlinitokřemičitany (anorthit). Ca vázaný v krystalové mřížce má pro výživu rostlin malý význam, protože průběh zvětrávání je pomalý (Vaněk et al. 2016).

Uhličitán vápenatý je ve vodě prakticky nerozpustný. Jeho rozpustnost se zvyšuje za přítomnosti CO_2 ve vodě, s tou tvoří kyselinu uhličitou. Jejich reakce vypadá takto:



Vzniklý hydrogenuhličitán vápenatý je dobře rozpustný ve vodě. Má zásaditý charakter, tím napomáhá snížení půdní kyselosti a s vápencem plní funkci půdního pufru (Richter 2007; Vaněk et al. 2016).

Mezi nevýměnný vápník též řadíme biologicky fixovaný např. v mikroorganismech (Richter 2007).

Výměnný Ca je nejdůležitější pro výživu rostlin i pro půdní úrodnost. Ionty Ca^{2+} jsou na půdní koloidy vázány výměnnou sorpcí a zaujímají 60 – 80 % KVK. Takto vázaný Ca se uvolňuje do půdního roztoku, výměnou za jiné kationty, a je přijímán rostlinami (Vaněk et al. 2016).

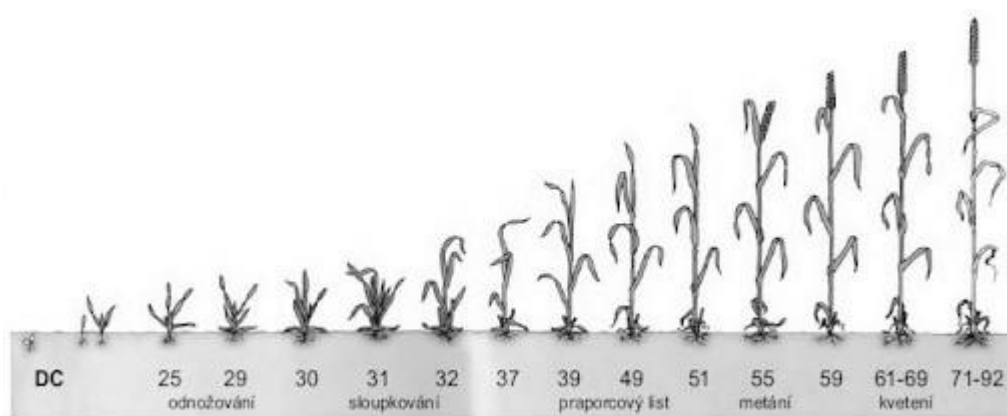
4.2 Pšenice ozimá

Pšenice ozimá (*Triticum aestivum* L.) patří do třídy rostlin jednoděložných (*Liliopsida*), čeledi lipnicovitých (*Poaceae*), rodu pšenice (*Triticum* L.).

Je nejpěstovanější obilovinou v České republice. V údajích Českého statistického úřadu (ČSÚ) o osevní ploše zemědělských plodin je uvedeno, že k 31.5.2020 bylo pěstováno 774 638 ha pšenice, což odpovídá 31,5 % celkového množství zemědělských plodin. Oproti roku 2019 je to pokles o 40 863 ha (ČSÚ 2020).

Díky vysoké přizpůsobivosti a velkému množství odrůd vyšlechtěných pro různé podmínky se pšenice může pěstovat jak v úrodných oblastech, tak v oblastech méně příznivých, kde vyžaduje vyšší dávky hnojiv (Vaněk et al. 2016).

Pro stanovení termínů hnojení, ochrany rostlin či regulace růstu se používá stupnice dle Zadokse, zobecněná stupnicí BBCH. Je založena na vnějších morfologických změnách rostlin (Prášil et al. 2019). Její zjednodušená varianta se nachází na obrázku 2.



Obr. 2: Fenologické fáze pšenice (Škarpa 2010)

4.2.1 Výživa pšenice

Kořenový systém, kterým si obilniny osvojují většinu živin, je bohatý a je soustředěn z větší části přibližně do hloubky 40 cm. Osvojovací schopnost obilnin je z toho důvodu nižší než u okopanin a bobovitých píceň. Dle této schopnosti by se obilniny daly seřadit takto: žito > oves > pšenice > ječmen (Vaněk et al. 2016).

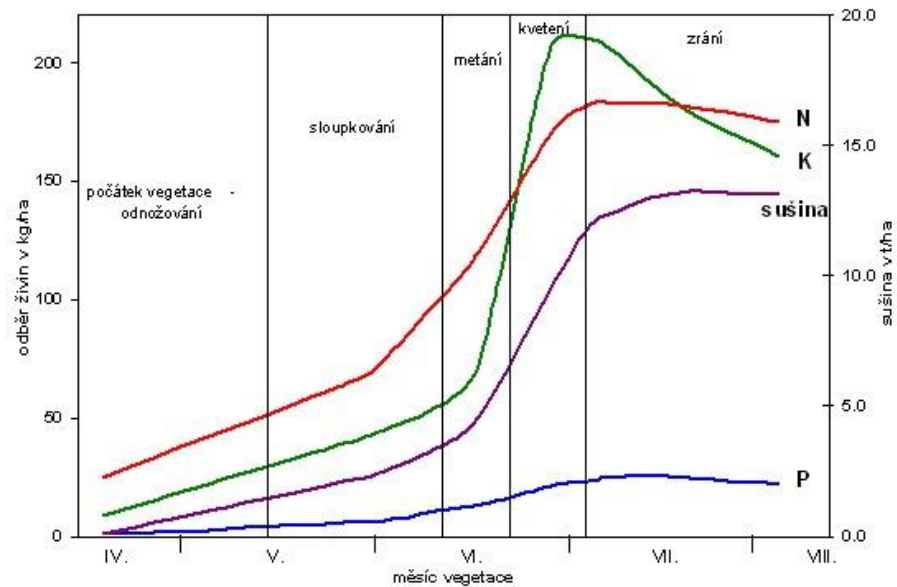
Střední odběr živin pšenice na 1 t zrna je uveden v tabulce 1. Podle těchto údajů a také podle dynamiky odběru hlavních živin (viz obrázek 3 a 4) se pšenice v průběhu vegetace přihnojuje.

Tab. 1: Střední odběr živin v kg č. ž. pšenici ozimou na 1 t zrna (Černý et al. 2014; Vaněk et al. 2016)

| N | P | K | Ca | Mg | S |
|---------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| 22 – 26 | 4,4 – 6,2 | 16,6 – 21,0 | 2,8 – 5,7 | 1,2 – 3,0 | 4,0 – 5,8 |

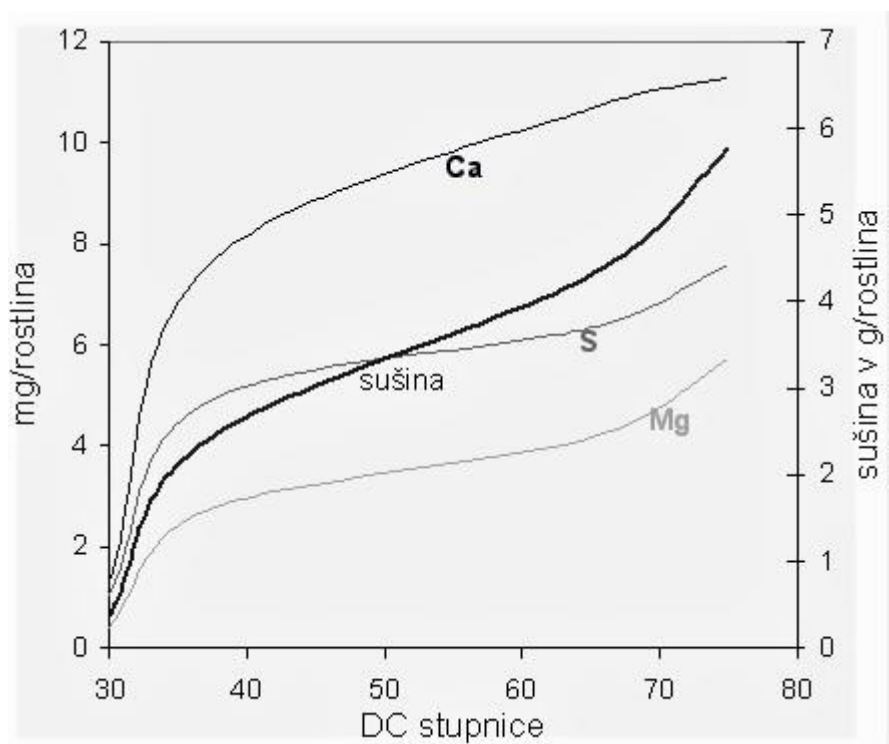
Odběr živin v období podzimu a brzkého jara je nízký kvůli malému množství vytvořené biomasy. Největší odběr živin (N, P, K) je patrný z obrázku 3 v období intenzivního růstu

pšenice – po sloupkování, nárůst vrcholí v období kvetení. Ke konci vegetace se odběr K rostlinami snižuje (Vaněk et al. 2002).



Obr. 3: Dynamika odběru živin (N, P, K) pšenice ozimé a nárůst sušiny (zpracováno dle Aignera et al. 1988, cit. Vaněk et al. 2002)

Z obrázku 4 vyplývá, že odběr Ca, Mg a S je intenzivní do fáze DC 35 (5 kolének zjistitelných), poté klesá a opět narůstá v období tvorby zrna (Richter & Hřivna 2005).



Obr. 4: Dynamika odběru živin Ca, S, Mg pšenice ozimé vzhledem k nárůstu sušiny (zpracováno dle Ryant 2002, cit. Richter & Hřivna 2005)

4.2.1.1 Hnojení dusíkem

Výživa pšenice dusíkem je nejdůležitějším výnosotvorným opatřením. Na počátku vegetace není velká potřeba N a z důvodů možného vyplavení či ztrát N denitrifikací se hnojí minimálně. Část z dávky N se aplikuje na začátku jarní vegetace pro intenzivní růst tzv. regenerační přihnojení. Po odnožování se aplikuje tzv. produkční dávka N-hnojiva. V tomto období se zakládá počet zrn v klasu, proto je nutný dostatek N pro výnos pšenice. Poslední přihnojení probíhá v období před nebo krátce po metání tzv. kvalitativní přihnojení. Nemusí ale vždy přinášet kýžený efekt, jeho efektivnost hlavně ovlivňuje průběh počasí (Vaněk et al. 2016).

4.2.1.2 Hnojení fosforem

Fosfor je pro rostliny důležitý již na začátku vegetace. Jeho odběr je sice malý, ale nezbytný pro další vývoj porostu. Nedostatek může způsobit méně odnoží, opožděný vývoj, snížení počtu fertálních klasů i kvalitu sklizeného produktu. Kvůli nízké pohyblivosti P v půdě se hnojí před založením porostu a hnojivo se zapraví do celého orničního profilu (Černý et al. 2014).

4.2.1.3 Hnojení draslíkem

Hnojení draslíkem stejně jako fosforem by mělo probíhat především před založením porostu, aby byl K zapraven do půdy. Při volbě dávky K musíme zohlednit předchozí hnojení případně zaorávku slámy předplodiny, která je bohatá na K, ale pomalu ho uvolňuje pro následnou plodinu. Je nutné, aby pšenice měla dostatek K v období odnožování a sloupkování (Černý et al. 2014). Bylo zjištěno, že postřik pšenice roztokem KCl inhibuje klíčení spor bráničnatky pšeničné a padlí (Kettlewell et al. 2000, Mann et al. 2004).

4.2.1.4 Hnojení hořčíkem

Množství potřebného hořčíku je asi desetinové oproti potřebě dusíku či draslíku. Mg je však nutný k průběhu fyziologických procesů, zvláště fotosyntézy. Vzhledem k lepší pohyblivosti Mg v půdním profilu se doporučuje rozdělit dávku hnojiva na 2. První probíhá společně s K na podzim a druhá s přihnojením dusíkem na jaře. Mg lze též dodat při vápnění, ale jeho uvolňování je značně ovlivněno pH půdy (Černý et al. 2014).

4.2.1.5 Hnojení sírou

Pšenice potřebuje pro stabilizaci výnosu a kvality zrna 20 – 30 kg S/ha nejlépe ve formě síranu. Nedostatek síry může mít vliv na fertilitu květů a tím na počet zrn v klase, proto je doporučený termín aplikace S-hnojiva v období odnožování až počátku sloupkování. V tomto období ji lze aplikovat společně s produkční dávkou N-hnojiva (Ryant et al. 2017).

4.3 Možnosti extrakce prvků

Pro správnou výživu rostlin je důležité znát obsahy jednotlivých živin v půdě, a to zejména těch přístupných. K tomuto účelu bylo vyvinuto mnoho extrakčních činidel, díky kterým je možné toto množství stanovit. V následujících podkapitolách je přibliženo jejich složení či použití.

4.3.1 Mehlich 1

Metoda Mehlich 1 byla vyvinuta v roce 1953 Adolfem Mehlichem pro stanovení biologicky dostupného fosforu, draslíku, vápníku a hořčíku v půdě, zvláště s důrazem na P. Extrakční činidlo Mehlich 1 se skládá z 0,05 mol/l HCl a 0,0125 mol/l H₂SO₄ (Mylavarapu et al. 2014). Množství stanoveného dostupného P pro rostliny odpovídá pouze na kyselejších půdách s nižší KVK. Pro půdy vápenaté a obsahující fosforit je tato metoda nevhodná (Mylavarapu & Miller 2014), protože na těchto půdách jsou zředěné kyseliny efektivně neutralizovány (Mylavarapu et al. 2014).

4.3.2 Mehlich 3

Složení extrakčního činidla Mehlich 3 bylo publikováno v roce 1984 pro překonání omezení, které měl Mehlich 1. Kyseliny použité v Mehlich 1 byly nahrazeny 0,2 mol/l CH₃COOH (kyselina octová), 0,015 mol/l NH₄F (fluorid amonný), 0,013 mol/l HNO₃ (kyselina dusičná), 0,001 mol/l EDTA a 0,25 mol/l NH₄NO₃ (dusičnan amonný) (Mylavarapu et al. 2014).

Přítomnost EDTA (kyselina ethylendiamintetraoctová) podstatně zvyšuje extrakci mikroprvků hlavně Cu (Mylavarapu et al. 2014). Dusičnan amonný slouží k extrakci výměnných iontů Ca, Mg a K. Během procesu extrakce M3 je požadováno pH roztoku 2,5 (dosažené přidáním 0,2 mol/l CH₃COOH), aby se využila výhoda NH₄F. Hodnota pH 2,5 pomáhá zabránit reakci Ca a F za vzniku sraženiny CaF₂. Fluorid usnadňuje extrakci fosfátů spojených s Fe a Al (Zhang et al. 2014). Kulhánek et al. (2018a) uvádí, že použití metody Mehlich 3 je možné i pro stanovení rostlinám přístupné síry.

Metoda Mehlich 3 je jako jediná celosvětově uznaná extrakce pro stanovení množství fosforu dostupného pro rostliny mezilaboratorními studiemi (Zhang et al. 2014).

V tabulce 2 jsou porovnány vlastnosti a funkce roztoků Mehlich 1 a 3.

Tab. 2: Porovnání činidel Mehlich 1 a Mehlich 3 (Mylavarapu et al. 2014)

| | Mehlich 1 | Mehlich 3 |
|----------------------------|--|--|
| funkční rozmezí pH | pH < 6,5 | běžné rozmezí pH půd |
| extrakce P | limitováno na půdách s vysokou akumulací Fe a Al | fluorid usnadňuje disociaci fosfátů z oxidů Fe a Al |
| extrakce mikroprvků | směs ředěných kyselin extrahuje pouze některé | EDTA extrahuje mikroprvky |
| výměnné kationty | špatná extrakce u půd s vysokou KVK | NH ₄ NO ₃ extrahuje výměnné kationty |

4.3.3 Mehlich 2

Mezi extrakčními činidly Mehlich 1 a Mehlich 3 bylo vyvinuto činidlo Mehlich 2. V současné době není používáno, protože jeho složení mělo nežádoucí korozivní účinky na vybavení laboratoře (Zhang et al. 2014).

4.3.4 Lancaster

Tato metoda extrakce prvků byla vytvořena pro testování půd v Mississippi, kde se nachází půdy s kyselým i zásaditým pH. Proto je známá i jako Mississippi soil test method. Primárním cílem bylo stanovení množství rostlinám dostupného fosforu, ale je efektivní i pro stanovení množství dostupného draslíku, vápníku, hořčíku, manganu a zinku. V první fázi Lancasterovy metody reaguje slabý kyselý roztok s půdou, čímž uvolní pro rostliny dostupný fosfor z vazby s Ca, ale zachovává apatit, kde je P pro rostliny nedostupný, nerozpuštěný. V druhé fázi se přidá roztok fluoridu a organických kyselin (jablečné, octové a malonové). To podporuje rozpuštění komplexů, kde je P vázán s hliníkem. Fluorid přítomný v extraktu je pouze v nízké koncentraci, aby netvořil sloučeniny s Ca a Mg, a tím zabraňoval jejich extrakci z půdy. Hliník přítomný v extraktu zajišťuje tvorbu AlF_3 , což minimalizuje vznik CaF_2 a MgF_2 . Organické kyseliny přítomné v roztoku snižují pH na stupeň 4. Na první fázi Lancasterovy metody je použita destilovaná voda a 0,05 mol/l HCl. V druhé fázi je použit 1,57 mol/l anhydrid kyseliny octové, 0,063 mol/l kyselina malonová, 0,089 mol/l kyselina jablečná, 0,032 mol/l fluorid amonný a 0,012 mol/l hexahydrát chloridu hlinitého (Oldham 2014).

4.3.5 Vodný výluh

Použití vodného výluhu bylo prokázáno jako vhodné pro stanovení přístupných živin (Luscombe et al. 1979). Bylo potvrzeno, že koncentrace vodou extrahovatelného fosforu v půdě dobře koreluje s koncentrací fosforu v sušině žita (Self-Davis et al. 2004).

Dle Self-Davis et al. (2004) je metoda vodného výluhu oproti metodě Mehlich 3 lepší. Důvodem je, že Mehlich 3 obsahuje silné kyseliny, které extrahují i pro rostliny nepřijatelný P např. ve formě fosforečnanu vápenatého. Lepší korelaci extrahovaného P vodným výluhem než metodou Mehlich 3 potvrdil i Matula (2009).

Matula (2009) také uvádí, že při extrakci draslíku (z půdy a nadzemní části rostliny) hodnoty korelačních koeficientů u extrakce vodou, Mehlichem 3 a octanem amonným byly velmi podobné.

Při extrakční proceduře se vzorky po třepání a rotaci na centrifuze zfiltrují a okyselí koncentrovanou kyselinou chlorovodíkovou (HCl) na pH 2. Tím se předejde vysrážení fosfátových sloučenin (Self-Davis 2004).

5 Metodika

5.1 Odběr vzorků

Vzorky rostlin a půdy byly odebírány z ploch s pěstovanou pšenicí ozimou, a to v letech 2015 – 2020. Jedním z cílů práce bylo zahrnutí co nejširší škály půd, zejména s ohledem na různé hodnoty pH, které představují jeden z nejdůležitějších prvků z hlediska přístupnosti sledovaných živin. Hodnoty pH tak v celém souboru vzorků činily 4,70 – 8,02. Vzorky byly v uvedených letech odebrány celkem ze 110 stanovišť. Pozemky pro odběr byly zvoleny na základě dat poskytnutých ústředním kontrolním a zkušebním ústavem zemědělským v Brně (ÚKZÚZ) anebo po dohodě s majiteli pozemků. Na vytipované ploše byly odebírány půdní vzorky (0-30 cm). Ve stejných odběrových bodech byly odebírány i vzorky nadzemní hmoty rostlin, a to ve vegetační fázi počátek kvetení až kvetení (BBCH 49 – 59).

5.2 Zpracování vzorků

Vzorky půdy byly usušeny při pokojové teplotě a následně přesety přes síto s velikostí ok 2 mm. Vzniklá jemnozeme byla následně analyzována. Rostlinné vzorky byly rovněž usušeny a následně jemně namlety mlýnem Retsch (SM 100, Retsch GmbH, Haan, Německo) přes 1 mm síto. Namleté vzorky byly následně analyzovány.

5.3 Provedené analýzy

5.3.1 Hodnota výměnného pH

Pro stanovení hodnoty výměnného pH bylo naváženo 5 g jemnozeme, která reagovala po dobu 2 hodin (horizontální třepání) s 25 ml 0,01 mol/l CaCl_2 v 50 ml plastových kyvetách. Po ustálení proběhlo měření výměnného pH. Metoda byla adaptována dle Minasny et al. (2011). Obdobný postup je používán i v laboratořích ÚKZÚZ.

5.3.2 Stanovení obsahu okamžitě přístupných makroprvků v půdě vodným výluhem

Extrakty byly zhotoveny dle Luscombe et al. (1979). Ke 3 g usušeného vzorku bylo doplněno 30 ml demineralizované vody. Vzorky byly třepány 1 hodinu a následně filtrovány. Vzniklé extrakty byly analyzovány na obsah přístupných makroprvků.

5.3.3 Stanovení potenciálně přístupných makroprvků v půdě metodou Mehlich 3

Pro analýzy usušených vzorků půdy byl použit extrakční roztok Mehlich 3 (Mehlich 1984) složený z CH_3COOH ($c=0,2$ mol/l), NH_4F ($c=0,015$ mol/l), HNO_3 ($c=0,013$ mol/l), NH_4NO_3 ($c=0,25$ mol/l) a EDTA ($c=0,001$ mol/l). Poměr substrátu a vyluhovadla činil 1:10 (3 g zeminy, 30 ml vyluhovadla). Třepání probíhalo po dobu 5 min. Suspenze byla následně zfiltrována.

5.3.4 Analýzy rostlin

Bylo naváženo 0,5 g ($\pm 0,005$ g) namletého rostlinného materiálu. Ten byl převeden do roztoku rozkladem na mokré cestě s pomocí mikrovlnné digesce (Ethos 1; MLS GmbH, Heerbrugg, Švýcarsko) v prostředí kyseliny dusičné a peroxidu vodíku. Získaný vzorek byl poté kvantitativně převeden do roztoku (finální objem 50 ml).

5.3.5 Měření obsahu makroprvků ve výluzích

Obsah makroprvků ve výluzích půd i rostlin (kromě draslíku v rostlinách) byl měřen pomocí optického emisního spektrometru s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES, Varian VistaPro, Mulgrave, Austrálie), obsah K ve výluzích z nadzemní hmoty rostlin pak plamenovým atomovým absorpčním spektrometrem (F-AAS 280 FS, Mulgrave, Austrálie).

5.4 Statistické vyhodnocení

Pro statistické vyhodnocení byly využity základní popisné charakteristiky vypočtené v programu Microsoft Excel (Excel 2019) a pokročilé statistické vyhodnocení (korelační a regresní analýza) bylo realizováno prostřednictvím programu Statistica 12 (StatSoft Inc. 2021).

6 Výsledky

6.1 Nekarbonátové půdy

V tabulce 3 jsou uvedeny popisné charakteristiky hodnot pH a obsahu potenciálně přístupných živin stanovených metodou Mehlich 3. Hranice mezi karbonátovými a nekarbonátovými půdami byla stanovena na hodnotu pH 7,00. Nejnižší hodnota pH nekarbonátových půd činila 4,7. Průměrné hodnoty pH se pohybovaly okolo 5,96. Z tabulky je dále patrné, že se jedná o širokou škálu půd z hlediska obsahu potenciálně přístupných živin. To je možné vyvodit z vysokých rozdílů mezi maximální a minimální hodnotou. Soubor je tak vhodný pro posouzení metody na široké škále stanovišť.

Tab. 3: *Popisné charakteristiky hodnoty pH a výsledků analýz metodou Mehlich 3 (n=47)*

| | pH/ CaCl ₂ | P | K | Ca | Mg | S |
|----------------|--------------------------|-------|------|------|------|------|
| | | mg/kg | | | | |
| Průměr | 5,96 | 99,0 | 283 | 2541 | 180 | 14,5 |
| Medián | 5,95 | 90,9 | 227 | 2361 | 163 | 11,0 |
| Minimum | 4,70 | 27,9 | 89,1 | 752 | 78,4 | 6,77 |
| Maximum | 6,99 | 262 | 692 | 6629 | 559 | 56,5 |

Tabulka 4 zahrnuje popisné charakteristiky obsahu přístupných makroprvků stanoveným vodným výluhem. Ve srovnání s extrakcí Mehlich 3 si lze povšimnout výrazně nižších hodnot naměřených u P, K, Ca a Mg, což potvrzuje hypotézu, na které je založená tato práce. Pouze analýza síry nevykazuje tak markantní rozdíly v naměřeném obsahu.

Tab. 4: *Popisné charakteristiky výsledků analýz vodným výluhem (n=47)*

| | P | K | Ca | Mg | S |
|----------------|-------|------|------|------|------|
| | mg/kg | | | | |
| Průměr | 9,26 | 64,9 | 108 | 28,7 | 12,5 |
| Medián | 8,77 | 53,3 | 90,4 | 26,5 | 9,55 |
| Minimum | 1,93 | 13,7 | 37,1 | 6,49 | 4,11 |
| Maximum | 28,1 | 223 | 229 | 85,1 | 39,1 |

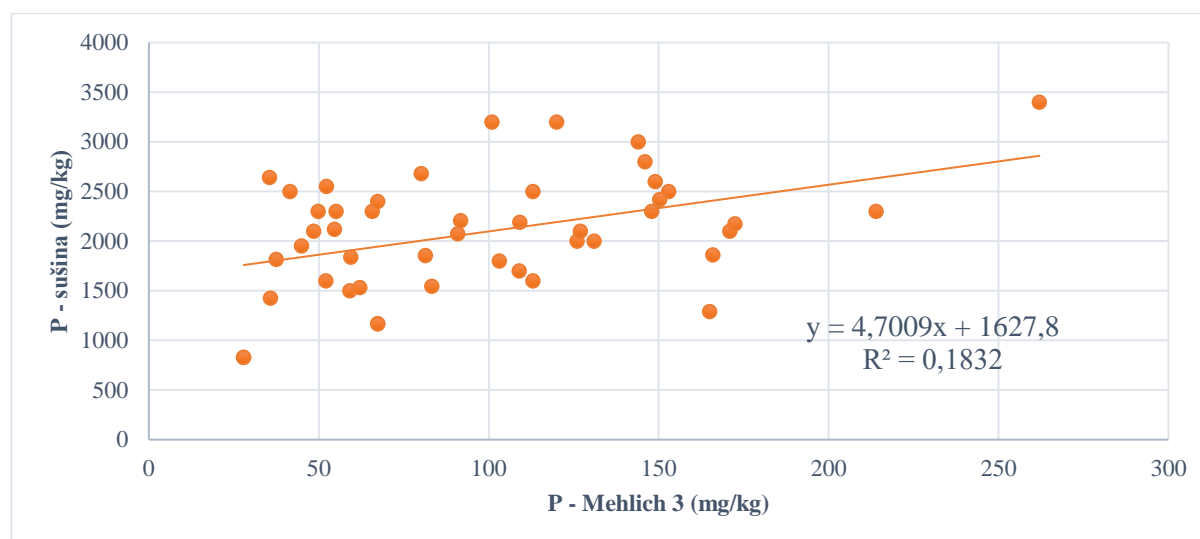
V tabulce 5 nalezneme popisné charakteristiky změřeného obsahu makroprvků v nadzemní hmotě pšenice ozimé. Průměrné hodnoty obsahu procentuálně odpovídají průměrnému procentuálnímu množství jednotlivých prvků v rostlinách uváděnému v literatuře. Minima, kterých vzorky dosáhly, nabývají hodnot, které lze považovat za nedostatečné pro správný vývoj rostlin.

Tab. 5: Popisné charakteristiky celkového obsahu makroprvků v nadzemní hmotě (n=47)

| | P | K | Ca | Mg | S |
|----------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|
| | mg/kg | | | | |
| Průměr | 2091 | 17712 | 2796 | 1050 | 1516 |
| Medián | 2100 | 16705 | 2786 | 1000 | 1417 |
| Minimum | 829 | 8500 | 1500 | 680 | 872 |
| Maximum | 3400 | 33902 | 4716 | 1700 | 3000 |

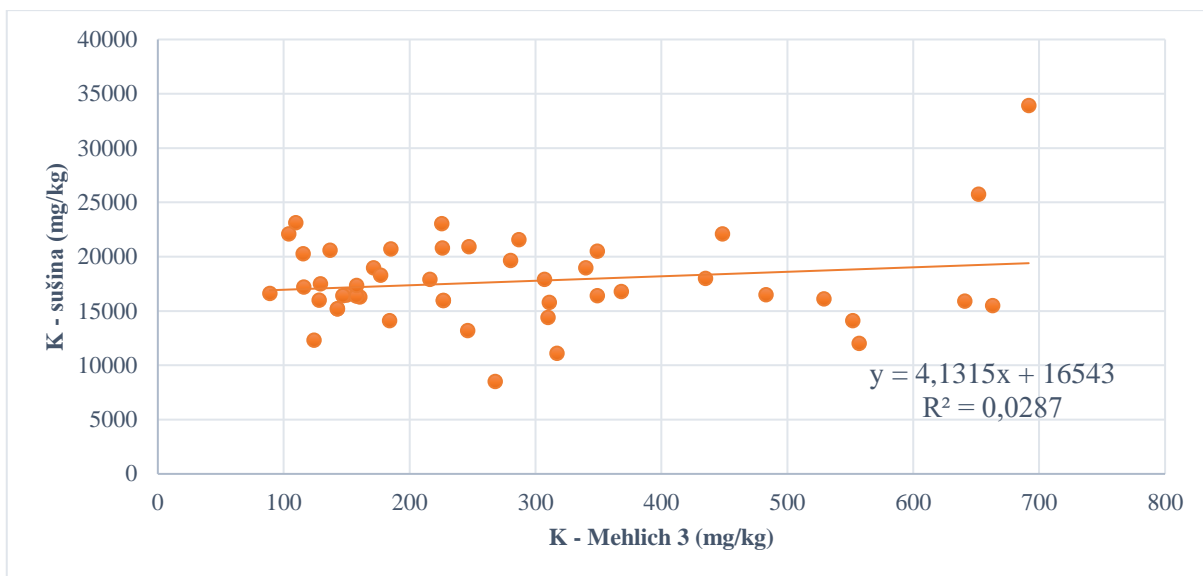
6.1.1 Regresní analýza obsahu živin v nadzemní hmotě a v Mehlich 3

Naměřený obsah fosforu v půdě metodou Mehlich 3 se pohyboval v rozmezí 27,9 – 262 mg/kg (Graf 1). Obsah této živiny v nadzemní hmotě rostlin byl naměřen od 829 do 3400 mg/kg. Regresní koeficient (R^2) v tomto případě byl vypočten na 0,183. Hodnota korelačního koeficientu (r) činila pro tento vztah 0,465. Tento vztah byl vyhodnocen jako průkazný při hladině významnosti 0,05.



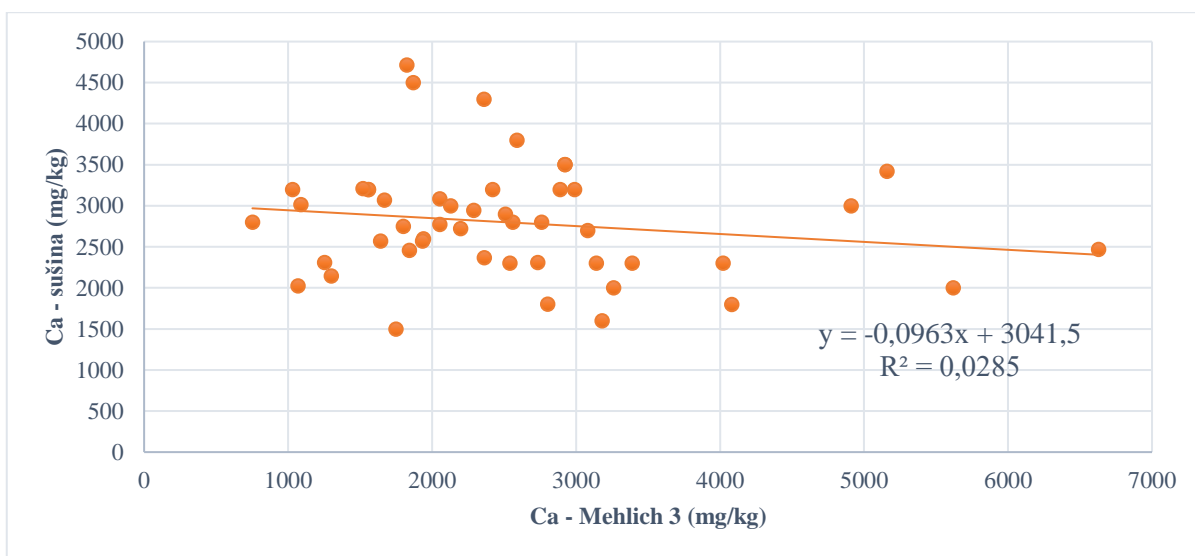
Graf 1: Regresní vztah obsahu fosforu v sušině rostlin s fosforem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 (n=47)

V grafu 2 si můžeme povšimnout, že naměřený obsah draslíku v půdě metodou Mehlich 3 se pohyboval v rozmezí 89,1 – 692 mg/kg. Obsah K v nadzemní hmotě se pohyboval od 8500 do 33902 mg/kg. Hodnota regresního koeficientu (R^2) byla v tomto případě vypočtena na 0,0287. Korelační koeficient dosáhl hodnoty 0,169 a vztah obsahu živin v rostlině a změřený obsah K v půdě metodou Mehlich 3 nebyl vyhodnocen jako průkazný.



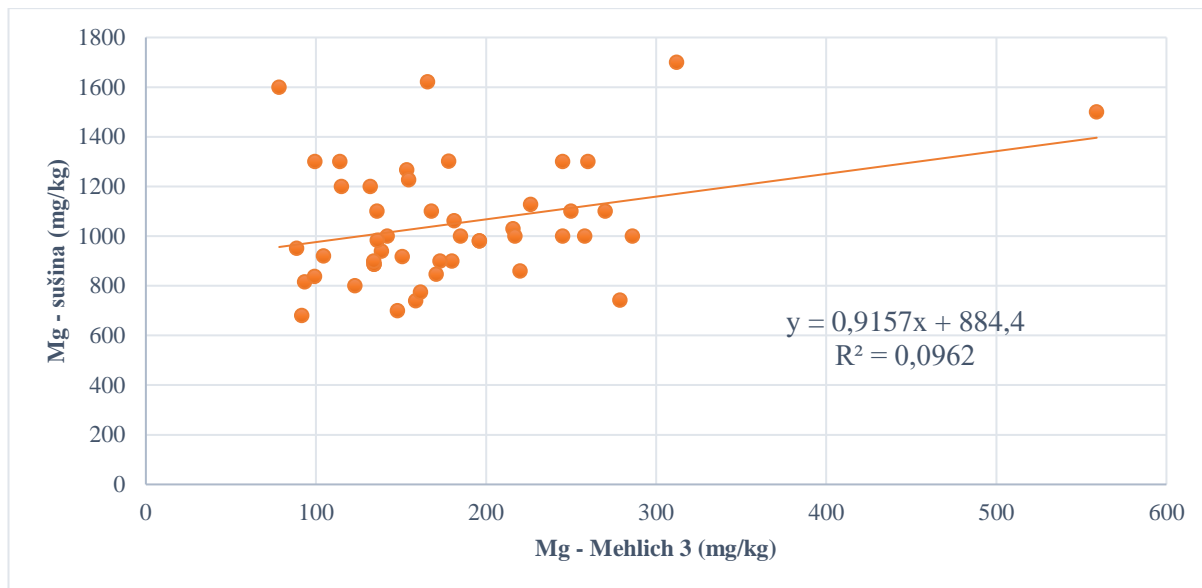
Graf 2: Regresní vztah obsahu draslíku v sušině rostlin s draslíkem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 (n=47)

Množství potenciálně přístupného vápníku změřené metodou Mehlich 3 se pohybovalo v rozmezí 752 – 6629 mg/kg. Dále v grafu 3 vidíme, že obsah této živiny v nadzemní hmotě rostlin činil od 1500 do 4717 mg/kg. Hodnota regresního koeficientu (R^2) byla v tomto případě 0,0285. Korelační koeficient dosáhl hodnoty -0,169. Tento vztah byl vyhodnocen jako statisticky neprůkazný.



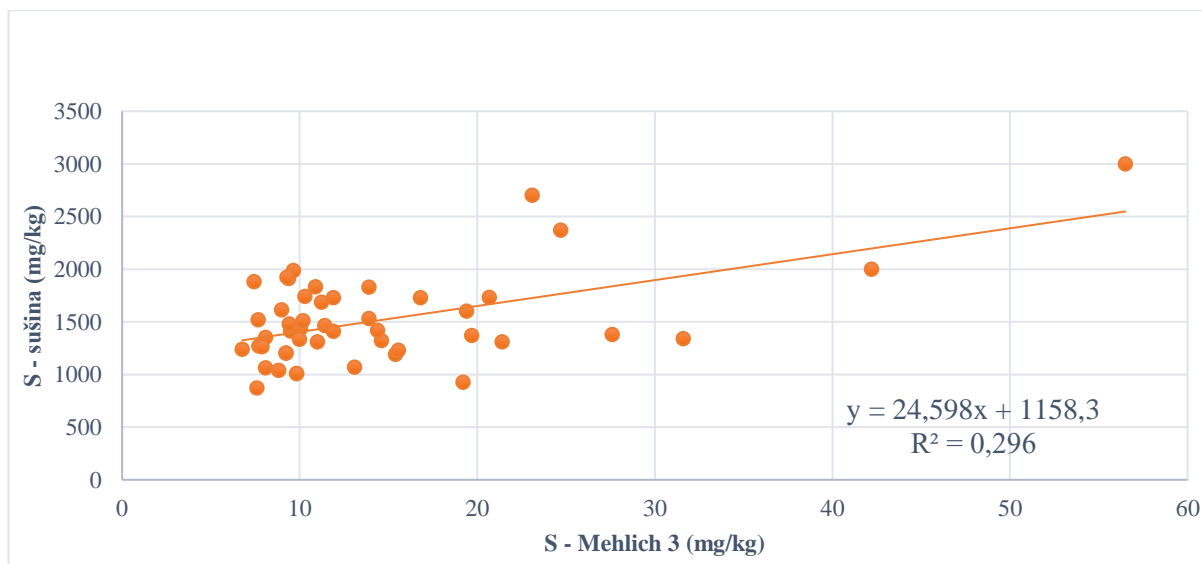
Graf 3: Regresní vztah obsahu vápníku v sušině rostlin s vápníkem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 (n=47)

Obsah pro rostliny potenciálně přístupného hořčíku v půdě stanovený metodou Mehlich 3 činil 78,4 – 559 mg/kg (graf 4). V nadzemní hmotě rostlin se pohybovalo množství Mg od 680 do 1700 mg/kg. Regresní koeficient (R^2) vykazoval v tomto případě hodnotu 0,0962. Vztah obsahu Mg v sušině a v půdě po analýze metodou Mehlich 3 byl stanoven jako průkazný při hladině významnosti 0,05, a to při hodnotě $r = 0,310$.



Graf 4: Regresní vztah obsahu hořčíku v sušině rostlin s hořčíkem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 (n=47)

Obsah síry v nekarbonátových půdách naměřený metodou Mehlich 3 se pohyboval v rozmezí 6,77 – 56,5 mg/kg (graf 5). Obsah této živiny v nadzemní hmotě rostlin byl 872 - 3000 mg/kg. Hodnota regresního koeficientu (R^2) byla v tomto případě 0,296, což byla nejvyšší hodnota v souboru nekarbonátových půd. Korelační koeficient měl hodnotu 0,544, která značí vysokou průkaznost tohoto vztahu.



Graf 5: Regresní vztah obsahu síry v sušině rostlin se sírou v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 (n=47)

6.1.2 Regresní a korelační analýza obsahu živin v nadzemní hmotě a ve vodném výluhu

V tabulce 6 jsou uvedeny parametry lineární regresní analýzy obsahu živin v nadzemní hmotě pšenice a ve vodném výluhu půdy a stejný vztah vyjádřený korelační analýzou. Je zřejmé, že stejně jako při srovnání výsledků Mehlich 3 a nadzemní hmoty bylo dosaženo nejlepších výsledků u stanovení síry. Korelační vztahy byly v případě P, K, Ca a Mg vyhodnoceny jako neprůkazné. Hodnoty jednotlivých korelačních koeficientů (r) jsou uvedeny níže. Vztah obsahu síry v nadzemní hmotě a ve vodném výluhu byl naopak vyhodnocen korelační analýzou jako průkazný při hladině významnosti 0,05.

Tab. 6: Lineární regresní analýza a korelační analýza obsahu živin v nadzemní hmotě a vodnému výluhu (n=47)

| | a | b | R ² | r |
|-----------|---------|--------|----------------|--------------|
| P | 26,72 | 1843,7 | 0,068 | 0,241 |
| K | 17,761 | 16560 | 0,038 | 0,195 |
| Ca | -1,036 | 2909 | 0,006 | -0,075 |
| Mg | -3,2638 | 1143,1 | 0,047 | -0,217 |
| S | 26,16 | 1189 | 0,206 | 0,454 |

*byla použita lineární funkce vodný výluh (y)=a*rostliny (x) + b

6.1.3 Regresní a korelační analýza metody Mehlich 3 a vodného výluhu

V tabulce 7 jsou uvedeny parametry rovnice získané lineární regresní analýzou metody Mehlich 3 a vodného výluhu. Dále jsou zde uvedeny regresní (R²) a korelační (r) koeficienty. Je patrné, že nejlepších výsledků regresní a korelační analýzy dosahuje síra, která vykazovala též nejlepší výsledky v analýzách s nadzemní hmotou pšenice s oběma typy extraktantů. I analýzy fosforu, draslíku a vápníku dosahují vysokých průkazných korelačních koeficientů. Pouze korelační analýza hořčíku byla neprůkazná při hladině významnosti 0,05.

Tab. 7: Lineární regresní analýza a korelační analýza obsahu makroprvků stanovených metodou Mehlich 3 a vodným výluhem (n=47)

| | a | b | R ² | r |
|-----------|--------|--------|----------------|--------------|
| P | 0,0644 | 2,9174 | 0,361 | 0,715 |
| K | 0,188 | 11,679 | 0,491 | 0,701 |
| Ca | 0,024 | 48,04 | 0,328 | 0,573 |
| Mg | 0,0262 | 23,9 | 0,018 | 0,134 |
| S | 0,6902 | 2,4615 | 0,774 | 0,880 |

byla použita lineární funkce Mehlich 3 (y)=a vodný výluh (x) + b

6.2 Karbonátové půdy

V tabulce 8 jsou uvedeny popisné charakteristiky hodnot pH a obsahu potenciálně přístupných živin stanovených metodou Mehlich 3. Jak již bylo zmíněno, hranice mezi karbonátovými a nekarbonátovými půdami byla stanovena na hodnotu pH 7,00. Maximální hodnota pH činila 8,02. Průměrné hodnoty pH se pohybovaly okolo 7,48. Z tabulky je dále patrné, že podobně jako u vzorků nekarbonátových půd (tab. 4), se jedná o širokou škálu půd z hlediska obsahu potenciálně přístupných makroelementů. Neboť rozdíly mezi minimální a maximální hodnotou jsou značné.

Tab. 8: *Popisné charakteristiky hodnoty pH a výsledků analýz metodou Mehlich 3 (n=61)*

| | pH/ CaCl ₂ | P | K | Ca | Mg | S |
|----------------|--------------------------|-------|------|-------|------|------|
| | | mg/kg | | | | |
| Průměr | 7,48 | 90,7 | 384 | 9405 | 248 | 26,5 |
| Medián | 7,40 | 64,7 | 333 | 8638 | 221 | 21,9 |
| Minimum | 7,00 | 1,00 | 99,8 | 2090 | 44,9 | 8,38 |
| Maximum | 8,02 | 345 | 1523 | 38600 | 680 | 90,8 |

Tabulka 9 zahrnuje popisné charakteristiky obsahů přístupných makroprvků stanoveným vodným výluhem na karbonátových půdách. Stejně jako v případě nekarbonátových půd jsou zde značné rozdíly mezi hodnotami naměřenými metodou Mehlich 3 a vodným výluhem. Obsahy jsou téměř 10 až 100násobně nižší. Výjimkou je analýza síry, jejíž maximální hodnota je vyšší než maximum změřené metodou Mehlich 3.

Tab 9: *Popisné charakteristiky výsledků analýz vodným výluhem (n=61)*

| | P | K | Ca | Mg | S |
|----------------|-------|------|------|------|------|
| | mg/kg | | | | |
| Průměr | 5,63 | 60,3 | 245 | 22,8 | 18,6 |
| Medián | 4,06 | 50,6 | 247 | 20,2 | 11,3 |
| Minimum | 0,35 | 9,77 | 88,9 | 2,90 | 4,23 |
| Maximum | 38,5 | 180 | 365 | 61,8 | 122 |

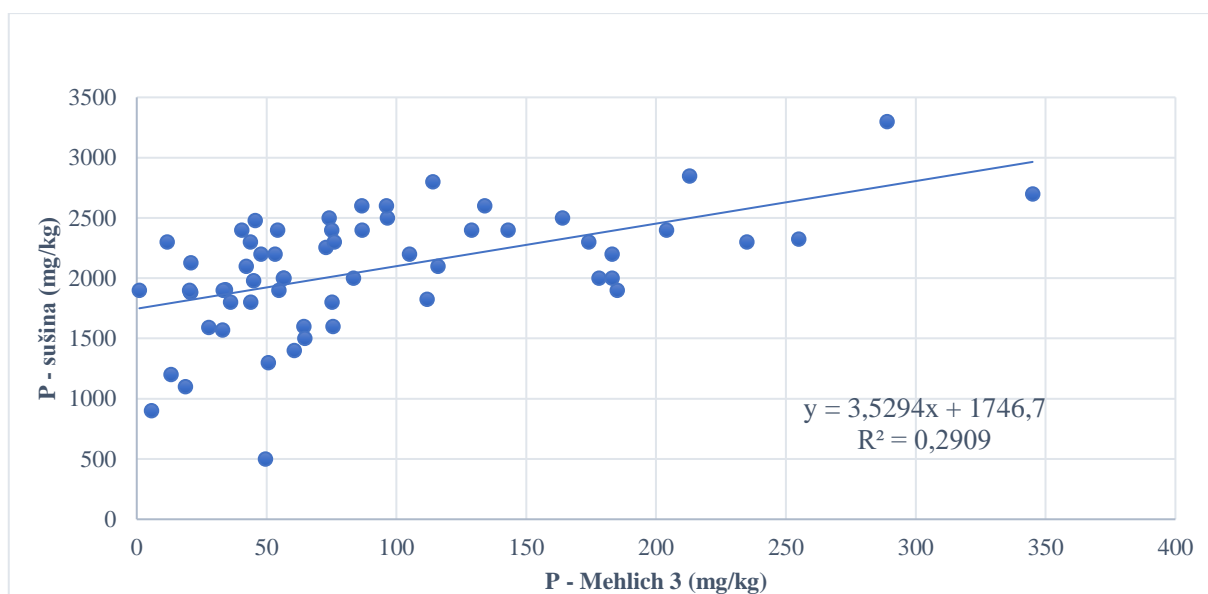
V tabulce 10 vidíme popisné charakteristiky výsledků analýzy sušiny nadzemní části pšenice. Je patrné, že se jednalo o rostliny s různým výživovým stavem. Minima naznačují, že některé vzorky trpěly stresem z nedostatku některého z makroelementů. V průměru se však jednalo o rostliny s dostatkem P, K, Ca, Mg i S. Maxima nepřesahují běžně uváděná normální rozmezí obsahů prvků v pletivech.

Tab. 10: Popisné charakteristiky celkového obsahu makroprvků v nadzemní hmotě (n=61)

| | P | K | Ca | Mg | S |
|----------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|
| | mg/kg | | | | |
| Průměr | 2067 | 19030 | 3108 | 1123 | 1593 |
| Medián | 2100 | 18600 | 3020 | 1067 | 1640 |
| Minimum | 500 | 12000 | 1608 | 647 | 655 |
| Maximum | 3300 | 30900 | 5100 | 1900 | 3090 |

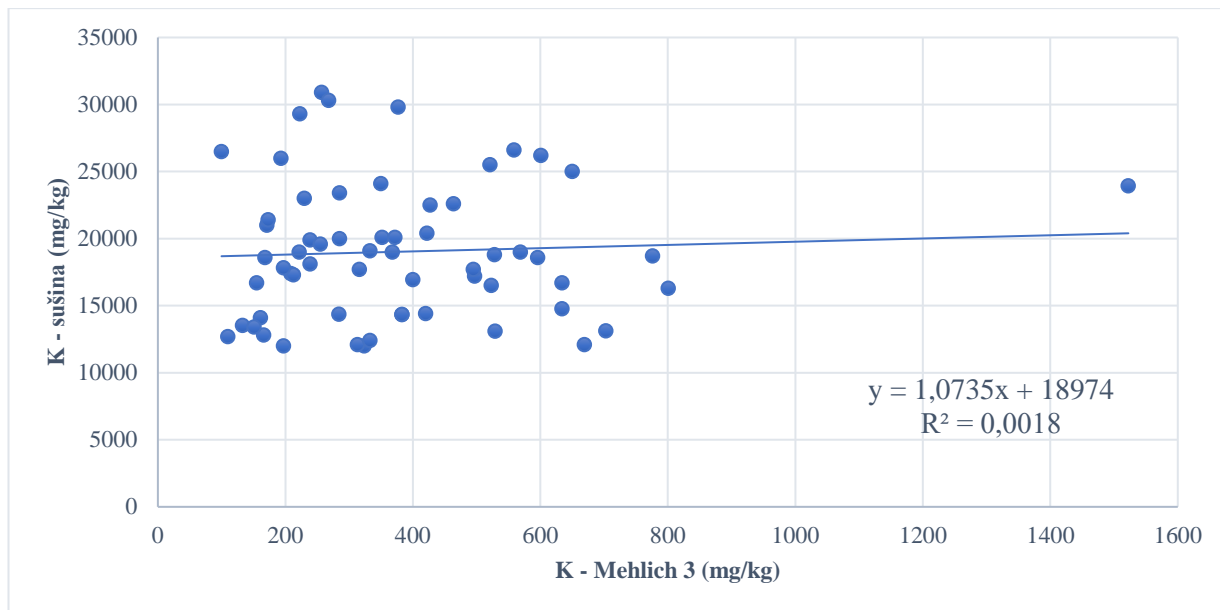
6.2.1 Regresní analýza obsahu živin v nadzemní hmotě a v Mehlich 3

Množství potenciálně přístupného fosforu v půdě se pohybovalo od 1 do 345 mg/kg (graf 6). Obsah P z analýz nadzemní hmoty rostlin dosahoval hodnot 500 – 3300 mg/kg. Hodnota regresního koeficientu (R^2) činila 0,291. Korelační koeficient byl pro tento vztah vyhodnocen jako průkazný. Nabyl hodnoty 0,465 při hladině významnosti 0,05.



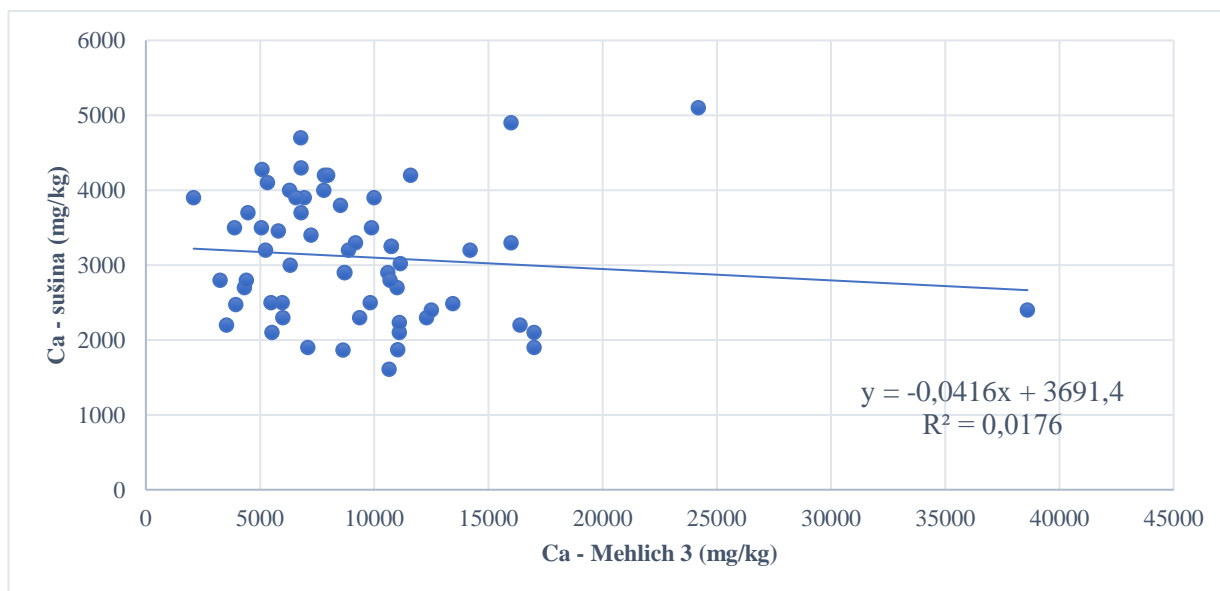
Graf 6: Regresní vztah obsahu fosforu v sušině rostlin s fosforem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 (n=61)

V grafu 7 vidíme, že obsah draslíku v půdě stanovený metodou Mehlich 3 byl v rozmezí 99,8 – 1523 mg/kg. Obsah této živiny v nadzemní hmotě rostlin se pohyboval v širokém rozmezí od 12000 do 30900 mg/kg. Hodnota regresního koeficientu byla vypočítána na 0,0018. Korelační analýzou byl tento vztah vyhodnocen jako neprůkazný. Korelační koeficient dosáhl hodnoty pouze 0,043.



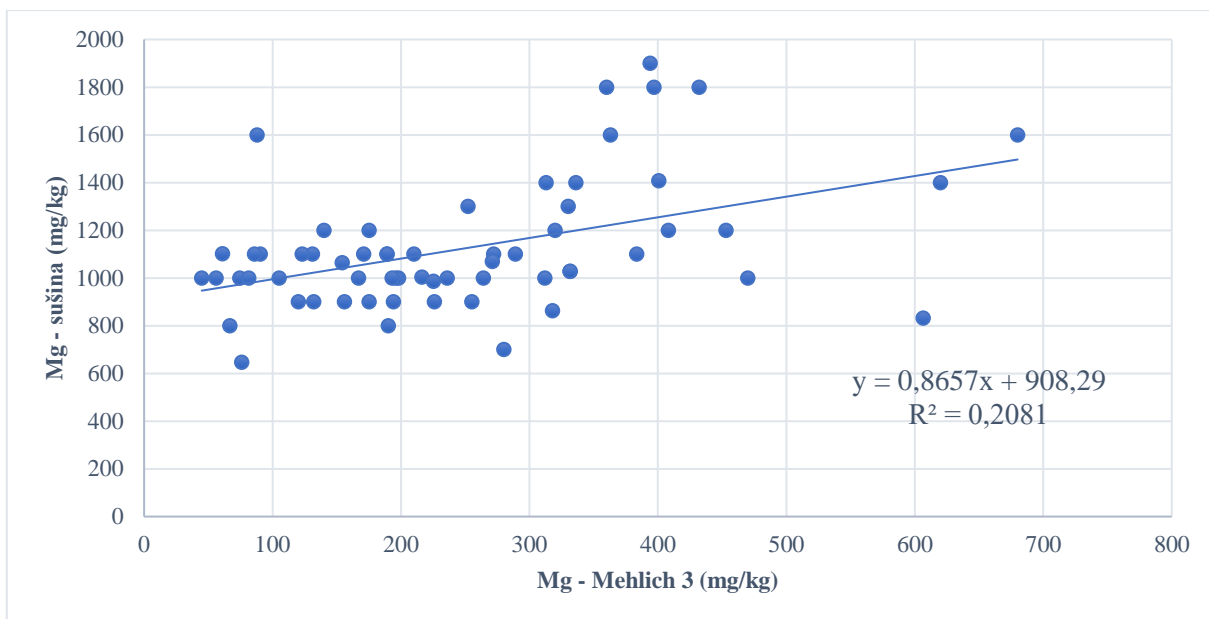
Graf 7: Regresní vztah obsahu draslíku v sušině rostlin s draslíkem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 (n=61)

Z grafu 8 je patrné, že obsah Ca v půdě se pohyboval v širokém rozpětí od 2090 do 38600 mg/kg. V nadzemní hmotě rostlin byl naměřeno 1608 – 5100 mg Ca/kg, s nízkou hodnotou regresního koeficientu 0,018. Neprůkaznost vztahu mezi obsahem Ca stanoveným metodou Mehlich 3 a obsahem v nadzemní hmotě dokládá i korelační koeficient 0,133.



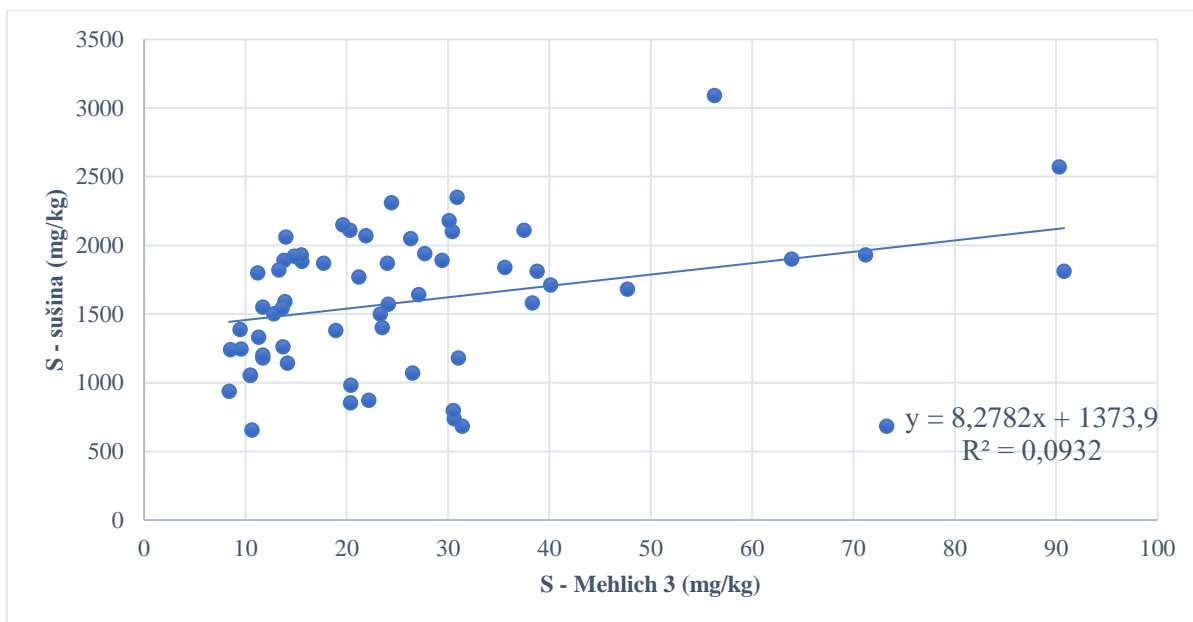
Graf 8: Regresní vztah obsahu vápníku v sušině rostlin s vápníkem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 (n=61)

Obsah hořčíku v nadzemní hmotě pšenice se nacházel v rozmezí od 647 do 1900 mg/kg (graf 9). Jeho potenciálně přístupné množství v půdě získané metodou Mehlich 3 se pohybovalo od 40,9 do 680 mg/kg. Hodnota regresního koeficientu byla vypočtena na 0,208. Korelační koeficient 0,456 potvrzuje průkaznost tohoto vztahu.



Graf 9: Regresní vztah obsahu hořčíku v sušině rostlin s hořčíkem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=61$)

Obsah síry v půdě stanovený metodou Mehlich 3 nabyl minima 8,38 a maxima 90,8 mg/kg. Dále v grafu 10 vidíme, že obsah S v nadzemní hmotě pšenice se pohyboval v rozmezí 655 – 3090 mg/kg. Hodnota regresního koeficientu byla vypočtena na 0,093. Vztah byl hodnocen jako neprůkazný, protože korelační koeficient dosáhl pouze hodnoty 0,200.



Graf 10: Regresní vztah obsahu síry v sušině rostlin se sírou v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=61$)

6.2.2 Regresní a korelační analýza obsahu živin v nadzemní hmotě a ve vodném výluhu

Při srovnání výsledků vodných výluhů s obsahy makroprvků v nadzemní hmotě rostlin (tabulka 11) byl nejtěsnější regresní vztah zjištěn v případě fosforu, stejně jako tomu bylo v případě analýzy Mehlich 3. U ostatních živin byly hodnoty regresních koeficientů výrazně nižší. Je zde patrný i rozdíl oproti analýze Mehlich 3, kde byl těsný vztah s obsahem živin v nadzemní hmotě rostlin zaznamenán u hořčičku. Korelační vztahy byly vyhodnoceny jako neprůkazné v případě K, Ca, Mg a S. Korelační analýza vztahu obsahu fosforu v nadzemní hmotě a ve vodném výluhu byla vyhodnocena naopak jako průkazná při hladině významnosti 0,05.

Tab. 11: *Lineární regresní analýza a korelační analýza obsahu živin v nadzemní hmotě a vodnému výluhu (n=61)*

| | A | b | R² | r |
|-----------|----------|----------|----------------------|--------------|
| P | 41,685 | 1832 | 0,247 | 0,408 |
| K | 12,2130 | 18293 | 0,011 | 0,142 |
| Ca | -0,1820 | 3152,7 | 0,0002 | -0,093 |
| Mg | 4,10550 | 1029,4 | 0,033 | 0,182 |
| S | 4,9665 | 1501 | 0,036 | 0,110 |

*byla použita lineární funkce vodný výluh (y)=a*rostliny (x) + b

6.2.3 Regresní a korelační analýza metody Mehlich 3 a vodného výluhu

Tabulka 12 obsahuje parametry rovnice lineární regresní analýzy obsahu P, K, Ca, Mg a S v půdě stanovených metodou Mehlich 3 a vodným výluhem. Korelační analýza prokázala, že vztah těchto dvou extraktantů je průkazný u všech analyzovaných prvků. Nejnižších hodnot dosahoval regresní i korelační koeficient u vápníku. Nejtěsnějších korelací dosahovala analýza fosforu a síry.

Tab. 12: *Lineární regresní analýza a korelační analýza obsahu makroprvků stanovených metodou Mehlich 3 a vodným výluhem (n=61)*

| | a | b | R² | r |
|-----------|----------|----------|----------------------|--------------|
| P | 0,0633 | -0,1106 | 0,659 | 0,811 |
| K | 0,1218 | 13,541 | 0,416 | 0,640 |
| Ca | 0,004 | 209,15 | 0,129 | 0,365 |
| Mg | 0,0584 | 8,3 | 0,477 | 0,693 |
| S | 0,8786 | -4,6837 | 0,716 | 0,846 |

byla použita lineární funkce Mehlich 3 (y)=a vodný výluh (x) + b

7 Diskuze

Cílem této práce je ověření, zda metodou Mehlich 3 je možné stanovit množství přístupných makroprvků (P, K, Ca, Mg a S) pro pšenici ozimou, a to zejména pomocí srovnání obsahu makroelementů v nadzemní hmotě pšenice s jejich naměřeným množstvím v půdě pomocí metody Mehlich 3. Dalším cílem je srovnat obsahy makroprvků v půdě získané metodou Mehlich 3 a vodným výluhem jakožto slabším extrakčním činidlem vhodným pro stanovení okamžitě přístupných živin pro rostliny.

V rámci srovnávací analýzy jsou vzájemně porovnávány obsahy makroprvků stanovených metodou Mehlich 3, vodným výluhem s celkovými obsahy makroprvků v sušině nadzemní hmoty rostlin, to vše prostřednictvím korelační a regresní analýzy.

Výsledky korelační analýzy ukazují ve většině případů na těsný vztah metody Mehlich 3 s vodným výluhem při hladině významnosti 0,05. V případě nekarbonátových půd byly zaznamenány průkazné korelace v případě $S > P > K > Ca$ (řazeno sestupně dle hodnoty r – tabulka 7), jako neprůkazný se projevil vztah Mg, jehož korelační koeficient dosáhl hodnoty 0,134. Výsledky korelační analýzy vzorků karbonátových půd prokázaly, že všech 5 analyzovaných prvků vykazuje průkazný korelační vztah obou činidel. Jejich pořadí dle r lze sestavit takto: $S > P > Mg > K > Ca$.

Nejtěsnějšího vztahu dosahuje v obou případech analýza síry (nekarbonátové $r = 0,880$, karbonátové $r = 0,846$). Toto potvrzují i Kulhánek et al. (2018b), jejichž korelační analýza S v M3 a vodném výluhu vykazovala hodnotu $r = 0,886$ při $p < 0,001$.

Matula (2010) ve své práci analyzoval 63 půdních vzorků z různých lokalit v ČR o hodnotě pH 3,55 – 6,97. U nichž měřil množství P v půdě metodou Mehlich 3, vodným výluhem a octanem amonným. Získané hodnoty P vykazovaly podobné mediány obsahů jako hodnoty naměřené v této bakalářské práci (BP) (tabulka 13), ovšem maxima i průměrné hodnoty byly výrazně vyšší než hodnoty v této BP.

Tab. 13: Porovnání množství P ve vzorcích půd odebraných Matulou (2010) a vzorcích pro tuto práci

| | Mehlich 3 | | Vodný výluh | |
|----------------|-----------|--------|-------------|--------|
| | BP* | Matula | BP | Matula |
| Průměr | 99,0 | 361 | 9,26 | 14,2 |
| Medián | 90,9 | 90,7 | 8,77 | 6,34 |
| Minimum | 27,9 | 19,6 | 1,93 | 1,12 |
| Maximum | 262 | 3110 | 28,11 | 98,6 |

*BP – tato bakalářská práce

Vona et al. (2020) prováděli srovnání metod Mehlich 3, CoHex a KCl pro stanovení množství vápníku a hořčíku na půdách v Maďarsku. Vzorky půd měly pH od 3,4 do 8,1; rozmezí obsahu Ca bylo 50 – 38441 mg/kg s průměrem 6208 mg/kg.

Rozmezí v této BP činilo 752 – 38600 mg/kg s průměrem 6382 mg/kg. Minimální hodnoty obsahu Ca stanovené metodou Mehlich 3 byly výrazně nižší než v této BP. To může být způsobeno nižším pH některých jejich vzorků spojený s nízkým obsahem Ca. Průměrný a maximální obsah je však srovnatelný s výsledky této BP.

Obsah hořčíku stanovený Vona et al. (2020) se pohyboval v rozmezí 11 – 1295 mg/kg. Průměr a medián činily hodnoty: 395, respektive 355 mg/kg.

V rámci této práce byly hodnoty výrazně odlišné a rozmezí činilo 44,9 – 680 mg/kg; průměr a medián: 219, respektive 181 mg/kg. Vysoké hodnoty Mg u Vona et al. (2020) byly pravděpodobně způsobeny odběrem některých vzorků z půd přirozeně bohatých na Mg (rendziny, černozemě), naopak nedostatek Mg se vyskytoval na lehkých písčitých půdách.

Rodriguez-Suarez et al. (2007) porovnávali účinnost univerzálních a specializovaných extrakčních činidel na stanovení makro i mikroprvků na kyselých půdách ve Španělsku. Vzorky ve většině nepřesáhly pH (KCl) 5, což může být důvodem nesouladu daty získanými v rámci této BP i na nekarbonátových půdách. Jejich obsahy stanovené metodou Mehlich 3 se pohybovaly v následujících rozmezích – P: 0,1 – 99,1 mg/kg; K: 32,4 – 565 mg/kg; Ca: 33 – 2366 mg/kg; Mg: 0,5 – 852 mg/kg, oproti tomu obsahy makroelementů v půdě získané pro tuto BP nabývaly výrazně vyšších hodnot v mg/kg P: 27,9 – 262; K: 89,1 – 695; Ca: 752 – 6629; Mg: 78,4 – 559. Vyšší obsah Ca může být spojen s vyšším pH vzorků získaných pro tuto BP, jak bylo již zmíněno výše. U ostatních prvků může hrát roli míra hnojení i přirozené podmínky stanoviště.

Při porovnání výsledků BP s Matula (2009) v tabulce 14 lze vidět mírné odlišnosti v minimálních hodnotách P, Ca a S, kdy ve všech případech vykazovala citovaná práce vyšší obsah prvků. Naopak v maximech naměřených metodou Mehlich 3 pro tuto práci jsou vyšší hodnoty u Ca a Mg a nižší u P a K, množství S je srovnatelné. Obsahy prvků získané vodným výluhem byly v minimech srovnatelné u všech analyzovaných prvků. V maximech dosahovaly vyšších hodnot vzorky pro tuto práci u draslíku a fosforu, ostatní množství je srovnatelné. Vzorky půd analyzované Matulou (2009) vykazovaly hodnotu pH 4,08 – 6,94 a byly odebrány z různých stanovišť v České republice, proto si hodnoty odpovídají. Porovnání v tab. 14 je se vzorky nekarbonátových půd.

Tab. 14: Porovnání obsahů makroprvků na nekarbonátových půdách v práci Matuly (2009) a této BP stanovených metodou Mehlich 3 a vodným výluhem

| | Mehlich 3 | | | | Vodný výluh | | | |
|-----------|-----------|--------|--------|-------|-------------|-------|--------|-------|
| | BP-min | M*-min | BP-max | M-max | BP-min | M-min | BP-max | M-max |
| P | 27,9 | 41 | 262 | 368 | 1,93 | 1,19 | 28,1 | 15,98 |
| K | 89,1 | 89 | 692 | 1032 | 13,7 | 8,2 | 223 | 183 |
| Ca | 752 | 942 | 6629 | 5463 | 37,1 | 39,6 | 229 | 201 |
| Mg | 78,4 | 73 | 559 | 475 | 6,49 | 4,00 | 85,1 | 64,2 |
| S | 6,77 | 16 | 56,6 | 61 | 4,11 | 8,17 | 39,1 | 36,9 |

* M - Matula (2009)

Sedlář et al. (2020) při svém výzkumu vztahu obsahu síry v rostlinách a v půdě uvádějí, že z jejich měření množství S stanovené metodou Mehlich 3 bylo v rozmezí 4,5 – 36 mg/kg, množství S získané analýzou vodným výluhem 4 – 23 mg/kg.

Tyto výsledky jsou v maximech výrazně nižší než v této BP: v Mehlich 3 6,77 – 90,8 mg/kg; ve vodném výluhu 4,11 – 122 mg/kg. Odlišná maxima mohou být způsobena systémem hnojení na jednotlivých pozemcích, neboť se v obou případech jedná o odběry

z provozně využívaných pozemků. Dále byly takto vysoké hodnoty zaznamenány pouze u jednoho vzorku. Jinak by rozmezí odpovídalo citovanému zdroji.

Analýzou nadzemní hmoty pšenice ozimé v růstové fázi BBCH 49 – 59 bylo zjištěno, že množství makroprvků v sušině rostlin pěstovaných na nekarbonátových půdách se nacházelo v rozmezí P: 829 – 3400; K: 8500 – 33902; Ca: 1500 – 4716; Mg: 680 – 1700; S: 872 – 3000 mg/kg (též tabulka 5). Na karbonátových půdách P: 500 – 3300; K: 12000 – 30900; Ca: 1608 – 5100; Mg: 647 – 1900; S: 655 – 3090 mg/kg (tabulka 10).

García-Marco et al. (2020) v analýzách nadzemní pšenice při nádobovém pokusu uvádějí tyto hodnoty makroprvků: Ca: 2600 – 5300; K: 7000 – 16000; Mg: 1100 – 2600 mg/kg. Rozdíly v naměřených obsazích makroprvků mohou být zapříčiněny odběrem rostlin pro analýzu v jiné vývojové fázi.

Obsah P dle Marschner (2012) pro optimální růst se má pohybovat mezi 0,3 – 0,5 % v sušině, dle Vaněk et al. (2016) mezi 0,3 – 0,4 %. Takže v maximech dosahovaly rostliny optimálního výživového stavu. V minimech ale byl výrazný nedostatek P. I zjištěná průměrná hodnota pro nekarbonátové: 2091 mg/kg i karbonátové: 2067 mg/kg půdy je již hraniční pro správný vývoj rostlin.

Draslík v sušině dle Vaňka et al. (2016) by měl zaujímat 1,5 – 3,5 %, Marschner (2012) uvádí rozpětí 2 – 5 % ve vegetativních orgánech. Z toho vyplývá, že v maximálních hodnotách byl dostatek K v rostlinách. I v průměrných hodnotách (nekarbonátové: 17712; karbonátové: 19030 mg/kg) byl K v dostatečném množství. V minimech se jedná o rostliny s nedostatkem K, který je výraznější na vzorcích z nekarbonátových půd.

Vaněk et al. (2016) uvádějí rozpětí 0,4 – 1,5 % vápníku v sušině, Marschner (2012) uvádí široké rozpětí 0,1 – 5 %, kdy jednoděložné rostliny vyžadují menší množství Ca. V tomto případě lze považovat veškeré vzorky dostatečně zásobené vápníkem. Rostliny pěstované na nekarbonátových půdách vykazují nižší hodnoty obsahu Ca, což může zapříčinit horší dostupnost Ca na půdách s nižším pH.

Obsah hořčíku ve vegetativních orgánech rostlin dle Marschner (2012) má odpovídat 0,15 – 0,35 %, Vaněk et al. (2016) uvádí, že ve slámě obilovin se obsah Mg pohybuje kolem 0,1 %. V případě vzorků v této BP minimální hodnoty byly pod hranicí optima. Průměrný obsah Mg v sušině nadzemní hmoty pšenice pěstované na nekarbonátových půdách měl hodnotu 1050, na karbonátových 1123 mg/kg. Toto množství je na hranici optimálního.

Obsah síry v rostlinách uvádí Marschner (2012) mezi 0,1 – 0,5 % sušiny. Obiloviny patří k méně náročným na tuto živinu. V minimech byly rostliny analyzované pro tuto BP pod ideálním množstvím, ale v průměru (na nekarbonátových půdách: 1516, na karbonátových: 1593 mg/kg) byly rostliny dostatečně vyživené.

Množství živin v nadzemní hmotě převážně ovlivňuje systém hnojení, půdní typ, zásoba živin v půdě a jejich forma.

Korelační analýzy obsahu makroelementů v půdě (stanovených metodou Mehlich 3 a vodným výluhem) s obsahem těchto živin v sušině rostlin ječmene prováděl Matula (2009). Jeho výsledky korelační koeficienty z analýzy nadzemní části s vodným výluhem se neshodují s touto BP. Jsou následující: P: 0,817; K: 0,715; Mg: 0,463. V této BP: P: 0,241; K: 0,195; Mg: -0,217. Kulhánek et al. (2009) uvádějí pro analýzu vztahu obsahu P v nadzemní hmotě ječmene a v půdě stanoveného vodným výluhem $R^2 = 0,66$ a korelační koef. = 0,82, v této práci bylo dosaženo R^2 pouze 0,068.

Korelační analýza vztahu obsahu P, K a Mg stanovených metodou Mehlich 3 a obsahu v sušině provedená ve studii Matula (2009) vykazovala následující korelační koeficienty: P: 0,450; K: 0,754; Mg: 0,486. Tyto výsledky byly opět vyšší než hodnoty v této BP: P: 0,328; K: 0,169; Mg: 0,310. Kulhánek et al. (2009) uvádějí pro fosfor $r = 0,37$, což je srovnatelné s výsledky této BP.

Matula (2009) prováděl nádobový experiment, proto jeho korelační koeficienty jsou těsnější než v této BP. Těsná korelace u fosforu může být způsobena tím, že ječmen dle Vaněk et al. (2016) má nejhorší osvojovací schopnost pro P, čerpá tedy nejpohotověji dostupný P, jehož množství stanovuje i vodný výluh. Pšenice má osvojovací schopnost lepší.

Sedlář et al. (2020) při korelačních analýzách síry v půdě stanovené metodou Mehlich 3 a síry v nadzemní hmotě pšenice ozimé ve fázi kvetení uvádí $r = 0,408$ průkazný při $p < 0,05$. V analýze půdy vodným výluhem uvádí $r = 0,213$. V případě výsledků této BP dosáhl korelační koeficient hodnoty 0,544 při analýze metody Mehlich 3 a obsah v sušině nadzemní hmoty pšenice a $r = 0,454$ při analýze vztahu s vodným výluhem. V obou případech byly vztahy vyhodnoceny jako průkazné při $p < 0,05$.

Při korelační analýze na karbonátových půdách uvádějí Sedlář et al. (2020) tyto hodnoty r : nadzemní hmota a Mehlich 3 = 0,420; nadzemní hmota a vodný výluh = 0,278. V tomto případě hodnoty r v této BP nabyly hodnot: nadzemní hmota a Mehlich 3 = 0,200; nadzemní hmota a vodný výluh = 0,110.

Kulhánek et al. (2018a) uvádějí pro analýzu vztahu síry v nadzemní hmotě pšenice (BBCH 49 – 59) a obsahu S v půdě (pH 5,5 – 7,4) stanoveném metodou Mehlich 3 $r = 0,29$ a pro vztah s vodným výluhem $r = 0,17$.

Sedlář et al. (2020) uvádějí několik korelačních koeficientů pro vztah množství síry stanovené metodou Mehlich 3 a vodným výluhem na karbonátových půdách: $r_1 = 0,637$; $r_2 = 0,550$; $r_3 = 0,660$. V této práci byla hodnota $r = 0,846$

Analýza stejného vztahu na nekarbonátových půdách dle Sedlář et al. (2020) měla hodnoty $r_1 = 0,757$; $r_2 = 0,746$; $r_3 = 0,667$. Korelační koeficient získaný pro tuto práci vykazoval hodnou $r = 0,880$.

8 Závěr

Primárním cílem této práce bylo ověřit, zda lze metodou Mehlich 3 stanovit množství přístupných živin P, K, Ca, Mg a S v půdě pro pšenici ozimou a porovnat tuto metodu se slabším extrakčním činidlem, kterým je vodný výluh.

Proto byla provedena analýza obsahu těchto makroelementů metodou Mehlich 3 na 47 vzorcích nekarbonátových půd ($\text{pH} \leq 6,99$, $n = 47$) a nadzemní hmoty na nich pěstované pšenice (celkový obsah makroprvků). Signifikantních výsledků bylo dosaženo v případě korelační analýzy vztahu mezi obsahem P, Mg a S stanovených metodou Mehlich 3 a obsahem v sušině rostlin při $p < 0,05$.

Pro porovnání: korelační analýza obsahu makroprvků v půdě prováděná vodným výluhem s obsahem sledovaných živin v nadzemní hmotě vykazala průkazný vztah pouze v případě síry.

Na karbonátových půdách ($\text{pH} \geq 7,00$, $n = 61$) byla provedena stejná analýza. Průkazných korelačních koeficientů při srovnání výsledků Mehlich 3 s celkovými obsahy makroprvků v nadzemní hmotě bylo dosaženo u fosforu a hořčíku.

Průkazný vztah mezi obsahem živin v sušině rostlin a v půdě (vodný výluh) byl zaznamenán pouze u fosforu.

Z tohoto statistického vyhodnocení lze usoudit, že Mehlich 3 je vhodnější pro stanovení přístupných makroprvků pro pšenici ozimou, než je vodný výluh, avšak nelze ho paušálně použít na všechny makroprvky. Nutno dodat, že byly porovnávány pouze vzorky pšenice v jedné růstové fázi (BBCH 49 – 59), v jiných růstových fázích mohou být výsledky odlišné, neboť dynamika odběru živin rostlinami pšenice se během vývoje mění.

Sekundárním cílem práce bylo srovnání výsledků metody Mehlich 3 s obsahy makroprvků v půdě s jiným typem extrakčního činidla, již zmíněným vodným výluhem. V tomto případě byla zjištěna těsná korelace v případě fosforu, draslíku, vápníku a síry na nekarbonátových půdách při $p < 0,05$. Na půdách karbonátových byly všechny vztahy korelační analýzou vyhodnoceny jako průkazné. Nejtěsnějších korelací dosáhla analýza vztahu fosforu a síry.

Z výsledků této bakalářské práce lze usoudit, že metoda Mehlich 3 je vhodná pro analýzu přístupných živin pro pšenici v případě fosforu a hořčíku na všech půdách a v případě síry na půdách nekarbonátových. Jak se v mnohých případech ukázalo, vykazovala metoda Mehlich 3 lepší výsledky než vodný výluh.

9 Literatura

Abrol YP, Ahmad A, editors. 2003. Sulphur in Plants. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Alfaro MA, Jarvis SC, Gregory PJ. 2006. Factors affecting potassium leaching in different soils. *Soil Use and Management* **20**:182–189.

Arnon DI, Stout PR. 1939. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiology* **14**:371-375.

Bais HP, Weir TL, Perry LG, Gilroy S, Vivanco JM. 2006. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annual Review of Plant Biology* **57**:233-266.

Barber SA. 1962. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. *Soil Science* **93**:39-49.

Barrow NJ. 2017. The effects of pH on phosphate uptake from the soil. *Plant and Soil* **410**:401-410.

Bergmann W, editor. 1992. Nutritional disorders of plants development, visual and analytical diagnosis. Gustav Fischer, Verlag.

Bhiah KM, Guppy C, Lockwood P, Jessop R. 2010. Effect of potassium on rice lodging under high nitrogen nutrition. Pages 136 – 139 in Gilkes RJ, Prakougep N, editors. 19th World Congress of Soil Science: soil solution for a changing world. International Union of Soil Sciences, Brisbane.

Cakmak I, Kirkby EA. 2008. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiologia Plantarum* **133**:692-704.

Cakmak I, Yazici AM. 2010. Magnesium: a forgotten element in crop production. *Better Crops* **94**:23-25.

Cornell University. 2010. Competency Area 3: Soil Testing and Plant Tissue Analysis. Cornell University, New York. Available from: <https://nrcca.cals.cornell.edu/nutrient/CA3/CA0323.php> (accessed November 2020).

Černý J, Schejbalová Š, Kovařík J, Kulhánek M. 2014. Předset'ové a podzimní hnojení pšenice ozimé. Kurent s.r.o, České Budějovice. Available from: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/predsetove-a-podzimni-hnojeni-psenice-ozime> (accessed November 2020).

Český statistický úřad. 2020. Osevní plochy zemědělských plodin k 31.5.. Český statistický úřad, Praha. Available from: <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=vystup->

[objekt&pvo=ZEM02A&z=T&f=TABULKA&skupId=346&katalog=30840&pvo=ZEM02A&evo=v539 ! ZEM02A-2020_1](#) (accessed November 2020).

De Kok LJ, Castro A, Durenkamp M, Stuiver CC, Westernmans S, Young L, Stulen I. 2002. Sulphur in plant physiology. Pages 1 – 26 in Sulfur Fertilizers: Demand Production and Use. The International Sulfur Society, York.

Deng W, Luo KM, Li DM, Zheng XL, Wei XY, Smith W, Thammina C, Lu LT, Li Y, Pei Y. 2006. Over expression of an Arabidopsis magnesium transport gene, AtMGT1, in *Nicotiana benthamiana* confers Al tolerance. *Journal of Experimental Botany* **57**:4235-4243.

Dou Z, Toth JD, Galligan DT, Ramberg CF, Ferguson JD. 2000. Laboratory procedures for characterizing manure phosphorus. *Journal of Environmental Quality* **29**:508-514.

Eriksen J. 1996. Incorporation of S into soil organic matter in the field as determined by the natural abundance of stable S isotopes. *Biology and Fertility of Soils* **22**:149-155.

Essington ME. 2004. Soil and water chemistry, an integrated approach. CRC Press, London.

EXCEL. Microsoft Office Excel 2019. Microsoft office Enterprise 2019. USA.

Fageria NK, Barbosa Filho MP, da Costa JGC. 2001. Potassium-use efficiency in common bean genotypes. *Journal of Plant Nutrition* **24**:1937-1945.

Fotyma M, Ochal P, Abetowicz J. 2013. Potassium in Soils of Glacial Origin. Hernandez Soriano MC, editor. *Soil Processes and Current Trends in Quality Assessment*. BoD – Books on Demand, Norderstedt.

García-Marco S, Abadín J, Couto-Vázquez A, Martín À, González-Prieto SJ. 2020. Bioavailability of macro- and micro-nutrients chemically extracted in acidic soils for wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **183**:705-717.

Gransee A, Führs H. 2013. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant and Soil* **368**:5-21.

Guo W, Nazim H, Liang Z, Yang D. 2016. Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. *The Crop Journal* **4**:83-91.

Gyaneshwar P, Naresh Kumar G, Parekh LJ, Poole PS. 2002. None. *Plant and Soil* **245**:83-93.

Hawkesford MJ, De Kok LJ. 2006. Managing sulphur metabolism in plants. *Plant, Cell & Environment* **29**:382-395.

Chen ZC, Peng WT, Li J, Liao H. 2018. Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants. *Seminars in Cell and Developmental Biology* **74**:142-152.

Cho H, Bouain N, Zheng L, Rouached H. 2020. Plant resilience to phosphate limitation: current knowledge and future challenges. *Critical Reviews in Biotechnology*: 1-9.

Janovská D, Kalinová J, Michalová A. 2008. Metodika pěstování pohanky obecné v ekologickém a konvenčním zemědělství. Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha.

Kania A, Langlade N, Martinoia E, Neumann G. 2003. Phosphorus deficiency-induced modifications in citrate catabolism and in cytosolic pH as related to citrate exudation in cluster roots of white lupin. *Plant and Soil* **248**:117-127.

Karthikeyan AS, Varadarajan DK, Jain A, Held MA, Carpita NC, Raghothama KG. 2007. Phosphate starvation responses are mediated by sugar signaling in Arabidopsis. *Planta* **225**:907-918.

Kettlewell PS, Cook JW, Parry DW. 2000. Evidence for an osmotic mechanism in the control of powdery mildew disease of wheat by foliar-applied potassium chloride. *European Journal of Plant Pathology* **106**:297-300.

Knights JS, Zhao FJ, Spiro BM, McGrath SP. 2000. Long-term effects of land use and fertilizer treatments on sulfur cycling. *Journal of Environmental Quality* **29**:1867-1874.

Krafczyk I, Trolldenier G, Beringer H. 1984. Soluble root exudates of maize: Influence of potassium supply and rhizosphere microorganisms. *Soil Biology and Biochemistry* **16**:315-322.

Kruse C, Jost R, Lipschis M, Kopp B, Hartmann M, Hell R. 2007. Sulfur-Enhanced Defence: Effects of Sulfur Metabolism, Nitrogen Supply, and Pathogen Lifestyle. *Plant Biology* **9**:608-619.

Kulhánek M, Balík J, Černý J, Kozlovský O, Nedvěd V. 2009. The content of available phosphorus in soils and P uptake by plants. *Scientia Agriculturae Bohemica* **40**:105-109.

Kulhánek M, Balík J, Sedlář O, Zbiral J, Smatanová M, Suran P. 2018. Stanovení přístupné síry v půdě metodou Mehlich 3. Česká zemědělská univerzita, Praha.

Kulhánek M, Černý J, Balík J, Sedlář O, Suran P. 2018b. Potential of Mehlich 3 method for extracting plant available sulfur in the Czech agricultural soils. *Plant, Soil and Environment* **64**:455-462.

Lalitha M, Dhakshinamoorthy M. 2014. Forms of soil potassium-A review. *Agricultural Reviews* **35**:64-68.

Leigh RA, Wyn Jones RG. 1984. A hypothesis relating critical potassium concentrations for growth to the distribution and functions of this ion in the plant cell. *New Phytologist* **97**:1-13.

- Luscombe PC, Syers JK, Gregg PEH. 1979. Water extraction as a soil testing procedure for phosphate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **10**:1361-1369.
- Maathuis FJ. 2009. Physiological functions of mineral macronutrients. *Current Opinion in Plant Biology* **12**:250–258.
- Mann RL, Kettlewell PS, Jenkinson P. 2004. Effect of foliar-applied potassium chloride on septoria leaf blotch of winter wheat. *Plant Pathology* **53**:653–659. *Plant Pathology*.
- Marschner P. 2012. *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Academic Press, London.
- Matula J. 2009. A relationship between multi-nutrient soil tests (Mehlich 3, ammonium acetate, and water extraction) and bioavailability of nutrients from soils for barely. *Plant, Soil and Environment* **55**: 173-180.
- Matula J. 2010. Differences in available phosphorus evaluated by soil tests in relation to detection by colorimetric and ICP-AES techniques. *Plant, Soil and Environment* **56**:297-304.
- Matula J. 2011. Předpoklady harmonické výživy plodin. Společnost mladých agrárníků České republiky, z.s., Praha. Available from: <http://www.smacr.cz/zpravy/predpoklady-harmonicke-vyzivy-plodin/> (accessed December 2020).
- Mehlich A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **15**:1409-1416.
- Mikkelsen R. 2010. Soil and fertilizer magnesium. *Better Crops* **94**:26–28.
- Minasny B, McBratney AB, Brough DM, Jacquier D. 2011. Models relating soil pH measurements in water and calcium chloride that incorporate electrolyte concentration, University of Sydney, Australia.
- Mylavarapu R, Miller R. 2014. Mehlich-1. Pages 95-100 in Sikora FJ, Moore KP, editors. *Soil Test Methods From the Southeastern United States*. Southern Cooperative Series Bulletin no. 401.
- Mylavarapu R, Obreza T, Morgan K, Hochmuth G, Nair V, Wright A. 2014. Extraction of Soil Nutrients Using Mehlich-3 Reagent for Acid-Mineral Soils of Florida. University of Florida, Gainesville. Available from: <https://edis.ifas.ufl.edu/ss620> (accessed November 2020).
- Norton R. 2013. Focus on calcium: Its role in crop production. Grains Research and Development Corporation, Kingston. Available form: <https://grdc.com.au/resources-and-publications/grdc-update-papers/tab-content/grdc-update-papers/2013/02/focus-on-calcium-its-role-in-crop-production> (accessed November 2020).

- Öborn I, Andrist-Rangel Y, Askegaard M, Grant CA, Watson CA, Edwards AC. 2008. Critical aspects of potassium management in agricultural systems. *Soil Use and Management* **21**:102–112.
- Oldham JL. 2014. Lancaster. Pages 111-117 in Sikora FJ, Moore KP, editors. *Soil Test Methods From the Southeastern United States*. Southern Cooperative Series Bulletin no. 401.
- Oliveira RH, Rosolem CA, Trigueiro RM. 2004. Importance of mass flow and diffusion on the potassium supply to cotton plants as affected by soil water and potassium. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **28**:439-445.
- Poirier Y, Bucher M. 2002. Phosphate Transport and Homeostasis in Arabidopsis. *The Arabidopsis Book* **1**:e0024.
- Prajapati K, Modi HA. 2012. The importance of potassium in plant growth—a review. *Indian Journal of Plant Sciences* **1**:177–186.
- Prasad R, Shivay YS. 2018. Sulphur in Soil, Plant and Human Nutrition. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences* **88**: 429-434
- Prášil IT, Musilová J, Hermuth J, Kosová K, Klíma M, Vítámvás P. 2019. Fenologie pšenice. Pages 1-7 in Rožnovský J, Litschmann T, editors. *Fenologie, její význam a užití*. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i, Praha.
- Qi Z, Spalding EP. 2004. Protection of Plasma Membrane K⁺ Transport by the Salt Overly Sensitive I Na⁺-H⁺ Antiporter during Salinity Stress. *Plant Physiology* **136**:2548–2555.
- Reich M, Shahbaz M, Prajapati DH, Parmar S, Hawkesford MJ, De Kok LJ. 2016. Interactions of Sulfate with Other Nutrients As Revealed by H₂S Fumigation of Chinese Cabbage. *Frontiers in Plant Science* **7**:541.
- Riffat A, Ahmad MSA. 2020. Sulfur: a multifunctional element that improves nutritional value of maize grains. *Pakistan Journal of Botany* **52**:2031-2041
- Richards I. 2017. Magnesium as a nutrient for crops and grass. Potash Development Association. Available from: <https://www.pda.org.uk/magnesium-nutrient-crops-grass/> (accessed November 2020).
- Richardson AE. 1994. Soil microorganisms and phosphorus availability. Pages 50-62 in Pankhurst CE, Doube BM, Gupta VSSR, Grace PR, editors. *Soil Biota*. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Canberra.
- Richter R, Hřivna L. 2005. Pšenice ozimá. Mendelova univerzita v Brně, Brno. Available from: http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/hnojeni_plodin/html/obilniny/psenice_ozima.htm (accessed November 2020).

Richter R. 2004. Vápník. Mendelova univerzita v Brně, Brno. Available from: http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/biogenni_prvky/ca.htm (accessed November 2020).

Richter R. 2007. Vápník v půdě. Mendelova univerzita v Brně, Brno. Available from: http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/agrochemie_pudy/puda_ca.htm (accessed November 2020).

Rus A, Lee B-H, Muñoz-Mayor A, Sharkhuu A, Miura K, Zhu J-K, Bressan RA, Hasegawa PM. 2004. AtHKT1 Facilitates Na⁺ Homeostasis and K⁺ Nutrition in Planta. *Plant Physiology* **136**:2500–2511.

Ryant P, Antošovský J, Škarpa P. 2017. Hnojení pšenice ozimé na jaře. Kurent s.r.o, České Budějovice. Available from: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/hnojeni-psenice-ozime-na-jare> (accessed November 2020).

Sedlář O, Balík J, Kulhánek M, Černý J, Matěchová M, Suran P. 2020. Crop sulfur status in relation to soil sulfur determined using anion exchange membranes and Mehlich 3. *Journal of Plant Nutrition*.

Self-Davis ML, Moore PA, Joern BC. 2004. Determination of Water – and/or Dilute Salt-Extractable Phosphorus. Pages 24-26 in Pierzynski GM, editor. *Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters*. Southern Cooperative Series Bulletin no. 396.

Shen J, Yuan L, Zhang J, Li H, Bai Z, Chen X, Zhang W, Zhang F. 2011. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. *Plant Physiology* **156**:997–1005.

Schachtman DP, Reid RJ, Ayling SM. 1998. Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. *Plant Physiology* **116**:447–453. *Plant Physiology*.

Schneider A, Tesileanu R, Charles R, Sinaj S. 2013. Kinetics of Soil Potassium Sorption–Desorption and Fixation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **44**:837–849.

StatSoft Inc. 1984 – 2013 (2021): Statistica, version 12

Sutar RK, Pujar AM, Aravinda Kumar BN, Hebsur NS. 2017. Sulphur Nutrition in Maize – A Critical Review, *International Journal of Pure & Applied Bioscience* **5**:1582-1596.

Škarpa P. 2010. Odběr vzorků rostlinných produktů a rostlinné hmoty k chemické analýze. Mendelova univerzita v Brně, Brno. Available from: https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/laborator/index.php?N=5&I=1&J=0&K=0 (accessed November 2020).

- Theodorou ME, Plaxton WC. 1993. Metabolic Adaptations of Plant Respiration to Nutritional Phosphate Deprivation. *Plant Physiology* **101**:339–344.
- Thomas TC, Thomas AC. 2009. Vital role of potassium in the osmotic mechanism of stomata aperture modulation and its link with potassium deficiency. *Plant Signal Behaviour* **4**:240–243.
- Tiwari KN, Gupta BR. 2006. Sulphur for sustainable high yield agriculture in Uttar Pradesh. *Indian Journal of Fertilisers* **1**: 37-52.
- Troeh FR, Thompson LM. 2005. *Soils and Soil Fertility*. Blackwell, Ames.
- Turner BL, Leytem AB. 2004. Phosphorus Compounds in Sequential Extracts of Animal Manures: Chemical Speciation and a Novel Fractionation Procedure. *Environmental Science & Technology* **38**:6101–6108.
- Uhde-Stone C, Temple SJ, Vance CP, Allan DL, Zinn KE, Temple SJ, Vance CP, Allan DL. 2003. Acclimation of white lupin to phosphorus deficiency involves enhanced expression of genes related to organic acid metabolism. *Plant and Soil* **248**:99–116.
- Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2016. *Výživa a hnojení polních plodin*. Profi Press, Praha.
- Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P. 2002. *Výživa a hnojení polních a zahradních plodin*. Redakce odborných časopisů, Praha.
- White PJ, Broadley MP. 2003. Calcium in Plants. *Annals of Botany* **92**:487–511.
- White PJ, Broadley MR. 2009. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist* **182**:49–84.
- Zhang H, Hardy DH, Mylavarapu R, Wang JJ. 2014. Mehlich-3. Pages 101-110 in Sikora FJ, Moore KP, editors. *Soil Test Methods From the Southeastern United States*. Southern Cooperative Series Bulletin no. 401.
- Zörb C, Senbayram M, Peiter E. 2014. Potassium in agriculture – Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology* **171**:656–669