

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Hodnocení metody Mehlich 3 pro stanovení makro-
a mikroprvků v půdě přístupných pro pšenici ozimou**

Diplomová práce

**Bc. Johanka Hypiusová
Výživa a ochrana rostlin**

doc. Ing. Martin Kulhánek, Ph.D.

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

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

V Praze dne 14.4.2023

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala doc. Ing. Martinu Kulhánkovi, Ph.D. za jeho neskonalou podporu a vedení, za jeho humor a erudovanost, za nadhled a klid a za ochotu kdykoliv pomoci a poradit. Dále bych ráda poděkovala všem spolužákům, se kterými jsme sdíleli starosti a radosti celého studia, díky nim bylo vše lepší a nebyli jsme v tom sami. V neposlední řadě bych ráda poděkovala mé rodině a mým přátelům, kteří byli vždy obrovskou podporou.

Hodnocení metody Mehlich 3 pro stanovení makro- a mikroprvků v půdě přístupných pro pšenici ozimou

Souhrn

Výživa makroprvky i mikroprvky je jedním z významných výnosotvorných prvků. V době vysokého zájmu o snížení použití minerálních hnojiv, jak z ekonomických, tak z environmentálních důvodů, je vhodné se zabývat možnostmi, jak zjistit přístupné množství živin v půdě. Nejpěstovanější plodinou ve světě i v České republice je pšenice ozimá, proto je vhodné věnovat pozornost právě pro ni přístupným živinám.

Univerzální extrakční činidlo Mehlich 3 je používáno napříč světovými laboratořemi a v ČR se používá pro analýzy při agrochemickém zkoušení zemědělských půd. Běžně se s ním stanovují makro- i mikroprvky. Jedná se však o velmi silný extraktant, z toho důvodu se předpokládá, že stanovuje i formy živin rostlinám nepřístupné. Naproti tomu vodný výluh, použitý k porovnání s metodou Mehlich 3, je používán ke stanovení okamžitě přístupných živin v půdním roztoku. Cílem práce bylo zhodnotit vztahy mezi stanoveným množstvím živin v půdě oběma způsoby s obsahem živin v nadzemní hmotě pšenice ozimé.

Odebrané vzorky půd byly rozděleny dle pH na nekarbonátové ($\text{pH} \leq 6,99$; $n=60$) a karbonátové ($\text{pH} \geq 7,00$; $n=73$), v nich byly stanoveny obsahy P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe a Mn oběma uvedenými extrakčními metodami.

Regresní a korelační analýzou byla provedena srovnání mezi vztahy obsahu živin v Mehlich 3 a v nadzemní hmotě rostlin a stejného vztahu u obsahu prvků ve vodném výluhu. Rostliny pšenice byly odebírány v růstové fázi BBCH 49–59.

Korelační analýzou byly zjištěny dva signifikantní vztahy na nekarbonátových půdách mezi množstvím živin stanoveným metodou Mehlich 3 a obsahem v sušině rostlin. Jednalo se o fosfor a zinek, kde korelační koeficient měl hodnoty $r_P = 0,412$ $r_{Zn} = 0,617$ při hladině významnosti $p < 0,05$. Na karbonátových půdách bylo více vztahů statisticky průkazných, a to v případech P, Mg, S, Cu, Fe, Mn: $r = 0,551$; $0,479$; $0,290$; $0,251$; $0,329$; $0,755$.

Korelační analýza s vodným výluhem vykazala signifikantní vztahy na nekarbonátových půdách u fosforu a manganu $r = 0,262$; $0,505$. Na karbonátových půdách byly průkazné vztahy u P, Mg a S: $r = 0,463$; $0,336$; $0,273$.

Druhý cíl práce, tedy vzájemné porovnání metod Mehlich 3 a vodného výluhu, byl korelační analýzou na nekarbonátových půdách vyhodnocen následovně: signifikantní vztahy byly dosaženy u živin P, K, Ca, Mg a S, kdy nejtěsnější vztah byl u P a S ($r = 0,700$; $0,699$). Na karbonátových půdách byly průkazné vztahy u P, K, Ca, Mg, S a Zn, kde nejtěsnější korelační koeficienty vykázal P a K ($r = 0,829$; $0,796$).

Je tedy patrné, že metoda Mehlich 3 se nehodí paušálně pro všechny přístupné živiny, ale jeví se jako vhodnější než vodný výluh, obzvláště na karbonátových půdách.

Klíčová slova: Živiny, Půda, Rostlina, Vodný výluh, Mehlich 3

Evaluation of the Mehlich 3 method for determination of wheat-bioavailable macro- and micronutrients

Summary

Nutrition, both macro- and micronutrients, is one of the significant yield-contributing factors. During times of high interest in reducing the use of fertilizers due to economic and environmental reasons, it is suitable to focus on possibilities to determine available nutrients in the soil. Winter wheat is the most cultivated crop worldwide as well as in the Czech Republic, making it appropriate to pay attention to its bioavailable nutrients.

The universal extraction agent Mehlich 3 is used across the world's laboratories and is used in the Czech Republic for analyses during agrochemical soil testing. Macro- and micronutrients are commonly determined using this method. However, it is a very strong extractant, and it is assumed that it also determines nutrient forms that are nonbioavailable. In contrast, the water extract, used for comparison with the Mehlich 3 method, is used to determine readily available nutrients in the soil solution. The work aimed to evaluate the relationships between the determined nutrients content in the soil using both mentioned methods and the nutrient content in the aboveground biomass of winter wheat.

Soil samples were taken and divided according to pH into non-carbonate ($\text{pH} \leq 6.99$; $n=60$) and carbonate ($\text{pH} \geq 7.00$; $n=73$) soils, and the contents of P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe, and Mn were determined using both extraction methods. Wheat aboveground biomass was sampled during the growth stage BBCH 49–59. Regression and correlation analysis was performed to show the relationships among results of Mehlich 3 method, water extraction and wheat aboveground biomass analysis, with the main aim to investigate the relationships between soil analysis and nutrients content in plants.

Correlation analysis identified two significant relationships in non-carbonate soils between the amount of nutrients determined by the Mehlich 3 method and the dry matter content of the plants. These were for phosphorus and zinc, with correlation coefficients of $r_P = 0.412$ and $r_{Zn} = 0.617$ at a significance level of $p < 0.05$. In carbonate soils, more statistically significant relationships were found in cases of P, Mg, S, Cu, Fe, Mn: $r = 0.551$; 0.479 ; 0.290 ; 0.251 ; 0.329 ; 0.755 . Correlation analysis with the water extract showed significant relationships in non-carbonate soils for phosphorus and manganese, $r = 0.262$; 0.505 . In carbonate soils, significant relationships were found for P, Mg, and S: $r = 0.463$; 0.336 ; 0.273 .

The second objective of the work, the comparison between the Mehlich 3 and water extract methods, was evaluated by correlation analysis in non-carbonate soils as follows: significant relationships were found for nutrients P, K, Ca, Mg, and S, with the closest relationships found for P and S ($r = 0.700$; 0.699). In carbonate soils, significant relationships were found for P, K, Ca, Mg, S, and Zn, with the closest correlation coefficients shown for P and K ($r = 0.829$; 0.796).

Therefore, it is apparent that the Mehlich 3 method is not suitable universally for all accessible nutrients. However, it appears more suitable than the water extract method, especially on carbonate soils.

Keywords: Nutrients, Soil, Plant, Water extract, Mehlich 3

Obsah

1 Úvod	10
2 Vědecká hypotéza a cíle práce	11
3 Literární rešerše.....	12
3.1 Makroprvky v půdě a rostlině	12
3.1.1 Fosfor	13
3.1.1.1 Fosfor v rostlině	13
3.1.1.2 Fosfor v půdě.....	14
3.1.2 Draslík.....	14
3.1.2.1 Draslík v rostlině	14
3.1.2.2 Draslík v půdě	15
3.1.3 Vápník.....	16
3.1.3.1 Vápník v rostlině	16
3.1.3.2 Vápník v půdě	17
3.1.4 Hořčík	18
3.1.4.1 Hořčík v rostlině.....	18
3.1.4.2 Hořčík v půdě	18
3.1.5 Síra	19
3.1.5.1 Síra v rostlině	19
3.1.5.2 Síra v půdě.....	20
3.2 Mikroprvky v půdě a rostlině	21
3.2.1 Železo.....	21
3.2.1.1 Železo v rostlině.....	21
3.2.1.2 Železo v půdě	21
3.2.1.3 Nedostatek Fe.....	22
3.2.2 Mangan	22
3.2.2.1 Mangan v rostlině.....	22
3.2.2.2 Mangan v půdě.....	23
3.2.2.3 Nedostatek Mn	23
3.2.3 Zinek	23
3.2.3.1 Zinek v rostlině	24
3.2.3.2 Zinek v půdě.....	24
3.2.3.3 Nedostatek Zn	25
3.2.4 Měď.....	25
3.2.4.1 Měď v rostlině.....	25
3.2.4.2 Měď půdě	25

3.2.4.3	Nedostatek Cu.....	26
3.2.5	Bór.....	26
3.2.5.1	Bór v rostlině.....	26
3.2.5.2	Bór v půdě.....	26
3.2.5.3	Nedostatek B.....	27
3.2.6	Molybden.....	27
3.2.6.1	Molybden v rostlině.....	27
3.2.6.2	Molybden v půdě.....	28
3.2.6.3	Nedostatek Mo.....	28
3.3	Extraktanty.....	28
3.3.1	Mehlich 3.....	28
3.3.2	Vodný výluh.....	29
3.3.3	Morgan.....	29
3.3.4	0,01 mol/l CaCl ₂	29
3.3.5	Egner.....	30
3.4	Pšenice ozimá.....	30
4	Metodika.....	31
4.1	Odběry půdních a rostlinných vzorků.....	31
4.2	Zpracování vzorků.....	31
4.3	Provedené analýzy.....	31
4.3.1	Hodnota výměnného pH _{CaCl2}	31
4.3.2	Stanovení obsahu okamžitě přístupných makro- a mikroprvků v půdě vodným výluhem.....	32
4.3.3	Stanovení potenciálně přístupných makro- a mikroprvků v půdě metodou Mehlich 3.....	32
4.3.4	Analýzy rostlin.....	32
4.4	Statistické vyhodnocení.....	32
5	Výsledky.....	33
5.1	Nekarbonátové půdy.....	33
5.1.1	Regresní analýza obsahu živin v nadzemní hmotě a v Mehlich 3.....	34
5.1.2	Regresní a korelační analýza obsahu makro- a mikroprvků v nadzemní hmotě a ve vodném výluhu.....	39
5.1.3	Regresní a korelační analýza vztahu metody Mehlich 3 a vodného výluhu.	39
5.2	Karbonátové půdy.....	40
5.2.1	Regresní analýza obsahu živin v nadzemní hmotě a v Mehlich 3.....	41
5.2.2	Regresní a korelační analýza obsahu makro- a mikroprvků v nadzemní hmotě a ve vodném výluhu.....	46
5.2.3	Regresní a korelační analýza metody Mehlich 3 a vodného výluhu.....	46
6	Diskuze.....	47

7 Závěr	52
8 Literatura.....	53

1 Úvod

Výživa rostlin je jeden z faktorů, který se významně podílí na celkové produkci polních plodin. Je to také faktor, který je ovlivnitelný člověkem, a proto si zaslouží značnou pozornost. Znalost obsahu přístupných makro- a mikroprvků v půdě je pro praxi stěžejním podkladem pro správné nastavení systému hnojení.

Již teorie Justuse von Liebiga říká, že limitujícím faktorem ve výživě je ta živina, jejíž množství je v organismu nejvíce vzdáleno od optima. Z toho vyplývá, že negativně působí nejen nedostatek, který způsobuje stres rostlin, zpomalený růst, nedokončení vývoje či úplné odumření, ale i nadbytek živin může být rovněž negativním faktorem pro pěstitele. Jedním příkladem může být nadbytek draslíku vedoucí k nedostatku vápníku.

V rámci této diplomové práce, která navazuje na práci bakalářskou, se zabývám analýzami makroprvků (fosfor, draslík, vápník, hořčík a síra) a mikroprvků (železo, mangan, zinek a měď). Všechny tyto prvky jsou již sledovány v rámci analýz při agrochemickém zkoušení zemědělských půd (AZZP). Kvůli vysoké dynamice dusíku v půdě se jeho analýza neprovádí. Extrakčním činidlem používaným při rozborech půdy při AZZP je Mehlich 3. Ten je považován za jedno z nejsilnějších extrakčních činidel, proto se předpokládá, že se jím stanoví větší množství živin, než je rostlina schopna přijmout, hlavně pak živiny z méně přístupných sloučenin. Z toho důvodu je cílem práce porovnat stanovená množství živin metodou Mehlich 3 s obsahy živin v nadzemní biomase rostlin. Jako kontrolní činidlo byl stanoven vodný výluh, který stanovuje pouze rostlinám okamžitě přístupné množství živin.

Univerzálnost extrakčního činidla Mehlich 3 dopomohla k jeho používání napříč laboratořemi nejen v České republice, ale i v Kanadě, USA či Austrálii. I přesto není mnoho studií zabývajících se problematikou stanovení skutečně přístupných živin pro jednotlivé polní plodiny vycházejících ze srovnání obsahu živin v rostlině s obsahem živin stanoveným metodou Mehlich 3.

Kvůli kyselé povaze činidla Mehlich 3 se předpokládá, že bude snížena jeho účinnost na karbonátových půdách z důvodu vyššího pH, které může neutralizovat toto činidlo. Lze tedy předpokládat patrné rozdíly u výsledků analýz nekarbonátových půd a karbonátových půd.

Cílovou plodinou pro analýzu nadzemní biomasy, která bude srovnávána s metodou Mehlich 3, byla zvolena pšenice ozimá (*Triticum aestivum* L.). Je dominantní plodinou v osevních plochách v ČR (v roce 2022 32,6 %) i ve světě. Proto je znalost pro ni přístupných makro- i mikroživin důležitým ukazatelem pro aplikaci hnojiv. To může mít pozitivní dopady jak z ekonomického, tak z enviromentálního hlediska.

2 Vědecká hypotéza a cíle práce

Hypotézy

Metoda Mehlich 3 je silným extrakčním činidlem a dá se tak očekávat nadhodnocení obsahů skutečně přístupných makro- i mikroprvků.

Lze očekávat různé výsledky u souboru karbonátových a nekarbonátových půd, kdy na karbonátových půdách bude docházet ke snížení extrakční účinnosti původně kyselého činidla Mehlich 3.

Cíle práce

Vyhodnotit na rozsáhlém souboru vzorků karbonátových a nekarbonátových půd extrakční účinnost metody Mehlich 3 z hlediska vztahu s obsahy okamžitě přístupných prvků stanovených vodným výluhem.

Porovnat výsledky získané metodou Mehlich 3 i vodného výluhu s obsahy makro- a mikroprvků v rostlinách pšenice ozimé na obou zmiňovaných skupinách půd.

3 Literární rešerše

3.1 Makroprvky v půdě a rostlině

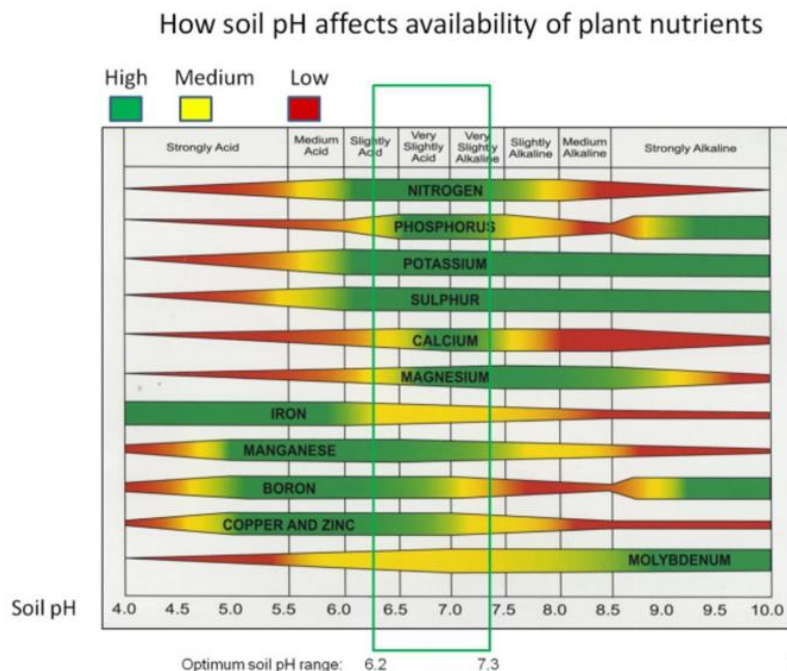
Esenciálními elementy pro metabolismus a veškerý vývoj rostlin jsou makroprvky. Mezi ně řadíme dle Vaněk et al. (2016) následující chemické prvky: uhlík (C), kyslík (O), vodík (H), dusík (N), fosfor (P), draslík (K), vápník (Ca), hořčík (Mg) a síru (S).

Zařazení jednotlivých elementů mezi esenciální se věnovali již Arnon & Stout (1939), jejichž definici bodově shrnuje Marschner (2012) takto:

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.

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

Maathius (2009) uvádí, že tyto prvky jsou rostlinami vyžadovány v poměrně velkém množství (desetiny až jednotky procent v sušině). V půdě se však často nacházejí v podstatně menší koncentraci (setiny procent až jednotky), rostliny je z toho důvodu musí akumulovat proti koncentračnímu gradientu. Přístupnost makroprvků v půdě (často nízká) se mění v důsledku povětrnostních (srážky, teplota) či půdních faktorů (půdní typ, pH). Právě vliv půdní reakce na přístupnost makro- a mikroprvků je graficky znázorněn na obrázku 1, z něhož je patrné, že za optimální pH pro růst rostlin lze považovat rozmezí 6,2 – 7,3.



Obrázek 1: Ovlivnění přístupnosti makro- a mikroprvků výměnným pH půdy (Katedra zemědělství a přírodních zdrojů, Kalifornská univerzita 2022)

3.1.1 Fosfor

3.1.1.1 Fosfor v rostlině

Obsah fosforu v sušině rostlin je po obsahu dusíku nejčastějším limitujícím makroprvkem (Schachtman et al. 1998). Rostliny obsahují běžně kolem 2000 mg/kg P v sušině. Je součástí esenciálních molekul jako jsou nukleové kyseliny, ATP či fosfolipidy (Theodorou & Plaxton 1993). Marschner (2012) uvádí, že pro optimální růst ve vegetativní fázi je nutný jeho vyšší obsah, tedy 3000–5000 mg/kg.

Příjem fosforu probíhá aktivně, protože oproti obsahu P v rostlinách je v půdě 100–1000krát nižší koncentrace. Pro jeho příjem je tedy nutné uvolnit energii z vazeb v ATP. Z toho důvodu je běžný nedostatek a jeho projevy na rostlinách v období nízkých teplot, kdy rostliny nedisponují dostatkem energie pro jeho aktivní příjem (Vaněk et al. 2016).

Pro zlepšení příjmu fosforu se vyvinulo u rostlin několik strategií. Jednou z nich je prokořenění většího objemu půdy, kde má rostlina možnost získat vyšší množství P z půdního roztoku. Růst kořenů je mechanismem, který ale snižuje množství nadzemní biomasy (Vaněk et al. 2016). Druhou strategií pro zlepšení příjmu P je zvýšení kořenové sekrece. Kyselé exsudáty snižují pH v oblasti rhizosféry o 2–3 stupně, tím zlepší rozpustnost a přijatelnost fosforu z jeho běžně nepřístupných forem (Marschner 2012). Jak uvádějí Bais et al. (2006), tuto reakci zkoumali Kania et al. (2003) či Uhde-Ston et al. (2003) u lupiny bílé (*Lupinus albus* L.), ta při deficitu P vytvořila shluky specializovaných kořenových struktur, které zvyšovaly exsudaci organických kyselin, tím zlepšovaly osvojování P z půdy. Tyto pokusy byly však prováděny laboratorních podmínkách. Třetí známou strategií k zefektivnění akumulace P je mykorhizní symbióza. Hyfy mykorhizních hub zvětšují povrch kořenů (Shen et al. 2011).

Přijatý anorganický fosfor je v organismu okamžitě zabudován do organických sloučenin. Ty se poté přesunují do mladých pletiv, jako jsou mladé listy, vegetační vrchol, květy a semena. Semena rostlin mají jako zásobní látku fytin. Zrno obilnin obsahuje 1 % fytinu, v něm je soustředěno přibližně 60–80 % veškerého fosforu. Obsah fytinu se liší dle druhu rostliny. Olejninu jsou známé vyšším zastoupením fytinu, u řepky je obsah až 4 % (Vaněk et al. 2016).

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).

Deficience P způsobuje vysoké ztráty v rostlinné produkci. Je poznamenána kvalita i celkový výnos (Poirier & Bucher 2002; Karthikeyan et al. 2007; Cho et al. 2020). Nejcitlivější období je na začátku vegetace. Po vyčerpání zásob fosforu ze semene je kořenový systém slabý, tudíž jeho příjem z půdy je špatný. Jak bylo zmíněno, povětrnostní podmínky jako je chladno a sucho jsou další příčinou pro nízký příjem (Vaněk et al. 2016).

Projevy nedostatku P jsou většinou latentní, proto je těžké jeho zjištění. Když nedostatek trvá delší dobu, jsou rostliny menšího vzrůstu, mají slabší stonky, obiloviny méně odnožují a listy i paty stébel mají špinavě zelenou až fialovou barvu (Vaněk et al. 2016).

Rostliny se liší svou schopností získávat P. Většina obilovin je známá svou nízkou osvojovací schopností, naopak vojtěška, hrách, bob či pohanka mají tuto schopnost nejlepší (Vaněk et al. 2016). Pohanka je proto často využívanou meziplodinou (Janovská et al. 2008).

3.1.1.2 Fosfor v půdě

Obsah fosforu v půdě se pohybuje v rozmezí od 100 do 1500 mg/kg. S vyšším podílem organické hmoty v půdě se zvyšuje i obsah fosforu. Rostlinám přístupné formy jsou anionty H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} (Vaněk et al. 2016).

Fosfor se v půdě vyskytuje v minerální a organické formě. Většina forem je nepřístupná a vychází z kyseliny trihydrogenfosforečné (H_3PO_4). Sloučeniny s vápníkem se svým uvolňováním mohou značně podílet na výživě rostlin (Vaněk et al. 2016).

20–80 % P v půdě je v organické formě. Z čehož velkou část tvoří fytin (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). Na stejném principu funguje i zpřístupnění P díky meziplodinám, jako je výše zmíněná pohanka.

Pohyblivost P v půdním profilu je značně omezena. Přihnojení během vegetace je neefektivní, protože z povrchu půdy je P nepřijatelný. Absence kořenů v povrchové vrstvě je dalším důvodem nemožnosti přijmout takto aplikovaný P. Je tedy důležité fosforečná hnojiva zapravit do celého půdního profilu (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 za sucha a na místa vzdálenější než 5 mm (Troeh & Thompson 2005).

Aplikace hnoje může být prospěšná pro zvýšení obsahu fosforu. Anorganický fosfor je v něm zastoupen z 50–90 % (Dou et al. 2000). Zbylý obsah P je v organické formě, a to ve fosfolipidech nebo nukleových kyselinách (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*.

3.1.2 Draslík

3.1.2.1 Draslík v rostlině

Rostliny běžně obsahují 15000–35000 mg K/kg v sušině (Vaněk et al. 2016). V extrémních případech může dojít k nárůstu obsahu až na 100000 mg/kg, to odpovídá 10 % sušiny (Leigh et al. 1984). Vyšší obsah K v pletivech je typický pro mladší rostliny, stárnutím pletiv klesá podíl K. Draslík je často také vylučován obilovinami zpět do půdy (Vaněk et al. 2016).

Příjem probíhá aktivní formou v případě nízkého obsahu v půdním roztoku, jinak je přijímán pasivně. Nadbytečný příjem K je nežádoucí. Dochází poté k hromadění draslíku v pletivech a snížení příjmu dalších živin, kationtů Mg^{2+} , Na^+ a Ca^{2+} (Vaněk et al. 2016). I příjem K může být ovlivněn jinými kationty. Zvýšení obsahu Na^+ nebo NH_4^+ způsobuje omezení příjmu 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. Vyšší míra slunečního záření snižuje požadavky rostlin na množství K (Vaněk et al. 2016).

Nejvyšší příjem K je na začátku vegetace (Vaněk et al. 2016). Kukuřice přijme 70–80 % veškerého K v době kvetení. Zbýlých 20–30 % přibližně 3–4 týdny po kvetení (Prajapati & Mondl 2012).

Mnoho důležitých funkcí v rostlině je ovlivňováno draslíkem. Je velmi pohyblivý, tím napomáhá transportu asimilátů do míst spotřeby a do zásobních orgánů. Transport sacharózy do zásobních vakuol je poháněn K^+ pumpou (Vaněk et al. 2016). Má zásadní vliv na osmotický tlak, čímž ovlivňuje turgor buněk. Má tedy vliv na celkové hospodaření s vodou. Při nedostatku vody je K přesunut rostlinou do svěracích 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).

Vyzrávání pletiv, zesilování buněčné stěny a zvýšení množství sklerenchymatických buněk je významně ovlivněno draslíkem. Díky tomu je nižší nebezpečí, že obilniny polehnou. V neposlední řadě tyto účinky snižují riziko napadení rostliny škůdci (Vaněk et al. 2016). Bhiya et al. (2010) uvádí, že výživa K zásadně ovlivňuje poléhání rostlin rýže.

Deficit K je známý chlorózou spodních listů a jejich postupnou okrajovou nekrózou (Fageria et al. 2001). Deficit se také projevuje horším snášením mrazu a častějším napadením houbovými chorobami (Vaněk et al. 2016).

3.1.2.2 Draslík v půdě

Draslík je obvykle nejvíce zastoupeným makroprvkem v půdě. Jeho celkový obsah se pohybuje od <100 mg/kg až do 4000 mg/kg. Běžné množství je 1000 mg/kg (Essington 2004). Přijímanou formou draslíku je jeho kationt K^+ (Vaněk et al. 2016).

Půdní draslík dělíme na:

- vodorozpustný
- výměnný
- fixovaný
- minerální

Přijatelná část draslíku je 1–2 % celkového. Jedná se o vodorozpustný a výměnný K (výměnnou sorpcí vázán na půdní koloidy). Zbýlých 98 % je nepřístupných, tedy minerální K v primárních minerálech jako jsou živce a slídy a fixovaný v mezivrstvách sekundárních jílových minerálů, např. illitů (Lalitha & Dhakshinamoorthy 2014). Z mezivrstev sekundárních jílových minerálů se při vhodných podmínkách může fixovaný K uvolnit a sloužit k výživě rostlin (Vaněk et al. 2016). Fixace či uvolňování 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). Z minerálních forem se uvolňuje K velmi pomalu při procesu zvětrávání (Fotyma et al. 2013). Mezi všemi formami je dynamicky udržována rovnováha (Vaněk et al. 2016).

Dle Zörb et al. (2014) může být nevýměnný draslík mobilizován kořenovými exsudáty, které obsahují organické kyseliny, jako je kyselina citronová či šťavelová (Krafczyk et al. 1984).

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).

Nižší sorpční kapacita lehkých půd vede k značné citlivosti na vyplavení K do hlubších vrstev a jeho vysokým ztrátám, protože K je výrazně pohyblivý iont (Alfaro et al. 2006). S dalšími ztrátami K musíme počítat v případě, že sklizenou částí rostlin je vegetativní hmota například v případě bulev řepy či sklizně kapusty (Vaněk et al. 2016).

Ke kořenům se K dostává prostřednictvím difúze z 96 % (Oliveira et al. 2004), další pohyb je zprostředkován hmotovým tokem (Barber 1962).

3.1.3 Vápník

3.1.3.1 Vápník v rostlině

Sušina rostlin obsahuje 4000–15000 mg/kg. Z půdy ho rostliny přijímají ve formě kationtu Ca^{2+} . Jeho příjem je ovlivněn hlavně vlhkostí půdy. Vyšší vlhkost snižuje jeho příjem (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). Reutilizace ze strašících částí rostlin není známá. Je vyžadováno pravidelné zásobování nových pletiv nově přijatým vápníkem (Vaněk et al. 2016).

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). Hlavními funkcemi vápníku v rostlinách jsou stavební a signální. Stavební funkce se týká především stabilizace buněčných stěn a membrán. Ca tvoří vápníkové můstky, které stabilně propojují makromolekuly, a tím zvyšují pevnost buněčné stěny (Vaněk et al. 2016). Při nedostatku Ca se buněčné membrány rozpadají a rostliny ztrácí buněčnou strukturu (Marschner 2012).

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

Signální funkce spočívá v transdukci signálu (např. světla) na fyziologickou odpověď. Je nutná dočasná změna koncentrace volného cytosolického Ca^{2+} (Marschner 2012).

Koncentrace volného Ca^{2+} v cytoplazmě musí být udržována na nízké úrovni, aby nedošlo k vysrážení fosforečnanů. Volný Ca je ukládán do vakuol a endoplazmatického retikula. Jeho obsah v cytoplazmě může být snížen propustností membrán pro Ca (Vaněk et al. 2016).

Deficit Ca je často důsledkem změnou v půdních podmínkách. Pokles podílu vápníku na sorpčním komplexu způsobí snížení hodnoty pH. Z toho důvodu klesne obsah Ca v půdním roztoku. Deficit je často bez zjevných příznaků – latentní (Vaněk et al. 2016). Známé jsou více projevy deficitu v zelinářství a ovocnictví. Patří k nim hořká pihovitost jablek, nekrózy květního konce plodů paprik, rajčat a vodního melounu či skvrnitost listů u listové zeleniny

(White & Broadley 2003). V polních podmínkách je nejznámějším projevem lámání vegetačního vrcholu řepky a máku (Vaněk et al. 2016).

Nadbytek vápníku běžně nebývá problémem. U brambor se ale 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 hub rodu *Actinomyces* způsobujících strupovitost (Troeh & Thompson 2005).

3.1.3.2 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 rozmanitý od 1500 mg/kg na půdách kyselých a v humidních oblastech, kde je z půdního profilu splavován do větších hloubek, až k 100000 mg/kg 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).

Kvůli výše zmíněnému pozitivnímu vlivu Ca na půdní strukturu je vhodné vápnění. I u něj je však několik rizik. Při vápnění je třeba dávat pozor na výživu mikroprvky (např. bór), protože se zvýšením pH půdy se snižuje jejich přístupnost pro rostliny (viz obrázek 1). Na bór náročná je řepka olejka a cukrová řepa. K vápnění je také nutné přistupovat z hlediska osevňovacího postupu, protože ne všechny polní plodiny snášejí vyvápnění (Matula 2011). Zvýšení pH ale snižuje pohyblivost a přijatelnost těžkých kovů (Vaněk et al. 2016).

V půdě se vápník vyskytuje ve dvou formách, a to jako nevýměnný a výměnný. Nevýměnný Ca se nachází ve špatně rozpustných sloučeninách, mezi ně řadíme uhličitany (vápenec), křemičitany, hlinitokřemičitany (anortit). Ca vázaný v krystalové mřížce má pro výživu rostlin malý význam, protože průběh zvětrávání je pomalý (Vaněk et al. 2016).

Uhličitany vápenatý je ve vodě prakticky nerozpustný. Jeho rozpustnost se zvyšuje za přítomnosti CO_2 ve vodě, se kterou tvoří kyselinu uhličitou. Vzniká hydrogenuhličitany vápenatý, který je dobře rozpustný ve vodě. Má zásaditý charakter, tím napomáhá snížení půdní kyselosti a s vápencem plní funkci půdního pufru. Ca imobilizovaný v mikroorganismech se taktéž řadí do skupiny nevýměnného Ca (Richter 2007).

Výměnný Ca je esenciální 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).

3.1.4 Hořčík

3.1.4.1 Hořčík v rostlině

Obsah hořčíku v sušině rostlin je značně ovlivněn několika faktory. Závisí na druhu rostliny, orgánu i jeho stáří (Vaněk et al. 2016). Richards (2017) uvádí, že obsah Mg v sušině listů řepy se pohybuje v rozmezí 2500–6000 mg/kg. Vaněk et al. (2016) uvádějí, že v zrnu obilnin je obsah stabilně okolo 1200 mg/kg a ve slámě 1000 mg/kg.

Příjem kationtu Mg^{2+} je převážně pasivní pomocí elektrochemického gradientu. Poměr kationtu hořčíku vůči ostatním kationtům v půdním roztoku má velký vliv na jeho příjem. Nepříznivě působí K^+ a NH_4^+ . Pozitivně působí nitrátový aniont (NO_3^-) (Vaněk et al. 2016).

Nejvýznamnější funkcí Mg je jeho postavení jako centrální atom molekul chlorofylu (Maathuis 2009). V něm je vázáno 15–20 % celkového množství v rostlinách (White & Broadley 2009). V případě nedostatku Mg v pletivech 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 má vliv 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).

Nedostatek Mg se projevuje intervenózní chlorózou (Cakmak & Yazici 2010) nejprve na spodních listech, neboť je Mg dobře mobilní (Bergmann 1992; Gransee & Führst 2013). Deficitem trpící rostliny jsou velmi citlivé na sluneční záření (Chen et al. 2018). U obilnin se chloróza spojená s nedostatkem označuje jako korálkovitá mozaika a u kukuřice jako pruhovitost (Vaněk et al. 2016). Následkem nedostatku Mg je snížený růst kořenů, protože chybí jejich zásobování sacharidy. Tím se zvyšuje riziko deficiencie dalších živin a stresu ze sucha (Cakmak & Kirkby 2008).

3.1.4.2 Hořčík v půdě

Množství hořčíku v půdě je mezi 500–5000 mg/kg (Deng et al. 2006). Vaněk et al. (2016) uvádějí obsah půdního Mg v rozmezí 4000–6000 mg/kg a v půdách s podložím dolomitů může obsah dosáhnout až 100000 mg/kg (10 %).

Půdní hořčík lze rozdělit na:

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

Největší vliv na absolutní obsah Mg má chemické složení matečné horniny a stupeň jejího zvětvávání (Gransee & Führst 2013). Mimo minerální formy se Mg v půdě nachází i ve formě solí – síranů, fosforečnanů a dalších, ty mají také podíl na výživě rostlin. Kromě Mg v půdním roztoku má pro výživu význam hořčík vázaný na půdní koloidy. Tam by měl zaujímat 10–15 % KVK (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). V zimním a jarním období

s větším úhrnem srážek se Mg se vyplavuje mimo zónu kořenů. Z důvodu nízké transpirace v tomto období je slabý i hmotový tok, a tak se Mg nedostává ke zpět kořenům (Vaněk et al. 2016).

Vliv na přijatelnost Mg má řada faktorů. Chemické a fyzikální vlastnosti půd patří mezi nejdůležitější (Guo et al. 2016). Ideální pH pro příjem je 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 kyselejší 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, oseední postup či používání hnojiv (Mikkelsen 2010; Gransee & Führst 2013). Pozitivní vliv má hnojení fosforem (Vaněk et al. 2016).

3.1.5 Síra

3.1.5.1 Síra v rostlině

Síra je v poslední době považována za čtvrtou nejdůležitější živinu po dusíku, fosforu a draslíku. Rostliny potřebují k ideálnímu růstu mezi 1000 a 5000 mg/kg síry v sušině. Nejnižší nároky na množství síry mají plodiny čeledi lipnicovitých naopak nejvyšší nároky má čeleď brukvovitých (Sutar et al. 2017).

Rostliny S přijímají ve formě síranového iontu SO_4^{2-} . Síra je primárně 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. Po několika krocích vzniká cystein. Ten je v pletivech první stabilní organickou sloučeninou. Z něj je poté syntetizována mimo jiné aminokyselina methionin, která se s cysteinem podílí na tvorbě peptidů (Vaněk et al. 2016).

Síra je nedílnou složkou různých bílkovin, vitamínů (B1, H), aminokyselin, antioxidantů či kofaktorů. Je taky důležitá pro udržení normálního růstu a vývoje při stresu na zasolených půdách (Reich et al. 2016; Prasad & Shivay 2018; Riffat & Ahmad 2020). Taktéž má klíčovou roli ve tvorbě chlorofylu (Sutar et al. 2017). Díky kofaktorům enzymů obsahujících síru je snižována toxicita těžkých kovů v tělech rostlin (Abrol & Ahmad 2003).

Sekundární sloučeniny síry (fytochelaniny, glukosinoláty či alliin) mají pozitivní vliv na odolnost rostlin vůči abiotickým stresům, chorobám i 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.

Restrikce v průmyslu se značně projevily v zemědělství. Snížené spady síry z atmosféry již nepokrývají potřebu rostlin, začaly se tedy projevovat symptomy deficitu (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).

Specifickým symptomem deficitu síry jsou intervenózní chlorózy následované červenaním stonku a listů od okrajů ke středu. To se projevuje na mladších listech, protože pohyblivost síry v porovnání s P, K a Mg je menší (Tiwari & Gupta 2006; Sutar et al. 2017). Při extrémním nedostatku mohou listy až zbledat. Kritická úroveň nedostatku síry je 1500 mg/kg v sušině nadzemní hmoty (Tiwari & Gupta 2006; Prasad & Shivay 2018).

3.1.5.2 Síra v půdě

V porovnání s dalšími makroprvky je obsah síry v půdě nižší v rozmezí 50–500 mg/kg. Většina síry (až 98 %) je obsažena v organických sloučeninách. Malý podíl (1–3 %) je vázán v biomase mikroorganismů. Ty se mohou značně podílet na výživě rostlin po mineralizaci, stejně jako v případě fosforu. Půdní vlastnosti nemají výrazný vliv na příjem síranového aniontu. (Vaněk et al. 2016).

Půdy obsahují anorganické i organické formy síry. Organická síra je dělena 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-}). Tuto formu nejčastěji rostliny přijímají. Redukční prostředí vytvořené větším množstvím vody 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 a výměnnou sorpcí vázanou S je udržována rovnováha (Kulhánek et al. 2018a).

Sírany Na, K, Ca nebo Mg jsou nejčastější formou, ve které se síra v půdě nachází. Sírany se do oblasti kořenů dostávají difúzí nebo hmotovým tokem. 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 v poslední době je nutné síru doplňovat minerálním hnojením, dříve byl její obsah v půdním roztoku vyšší a stačil i pro náročné plodiny.

Sírany se snadno vyplavují z horní vrstvy půdy. Jejich ztráty jsou největší, když v půdním roztoku dominují jednomocné kationty jako K^+ a Na^+ . Na kyselějších půdách tyto ztráty nejsou tak výrazné, obzvláště za přítomnosti Al^{3+} v půdním roztoku (Eriksen 1996; Knights et al. 2000). Nízká sorpce i imobilizace síranového iontu přispívá k jeho snadnému vyplavování (Vaněk et al. 2016).

Zdroji síry jsou posklizňové zbytky, kořeny rostlin, statková hnojiva, 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).

3.2 Mikroprvky v půdě a rostlině

Mikroprvky jsou esenciální živiny pro správný růst, vývoj a následně i pro kvalitu a výnos všech zemědělských plodin. Rostlinami vyžadované množství těchto prvků se oproti makroživinám liší, je výrazně nižší. Mezi druhové nároky jsou také rozdílné. Akumulace v biomase rostlin se většinou měří v miligramech na kilogram, obdobně jako jejich množství v půdě (Zewide & Sherefu 2021).

Mezi mikroelementy dle Welch & Schuman (2011) řadíme těchto osm prvků: železo (Fe), mangan (Mn), zinek (Zn), měď (Cu), bór (B), molybden (Mo), chlór (Cl) a nikl (Ni).

Z obrázku 1 lze usoudit, že se mikroprvky oproti makroprvkům liší přístupností pro rostliny. Většina těchto elementů je rozpustnější při nižších hodnotách pH půdy. Výjimkou je molybden, který je naopak nejrozpuštěnější v alkalických podmínkách.

V následujících podkapitolách se budu věnovat vybraným mikroprvkům jejich množství v půdě, přijatelným formám, funkcím v rostlinách apod.

3.2.1 Železo

Železo je nezbytným prvkem pro rostliny i jiné organismy, funguje v různých buněčných procesech, včetně dýchání, biosyntézy chlorofylu a fotosyntézy (Kobayashi et al. 2019).

3.2.1.1 Železo v rostlině

Dalšími funkcemi železa v rostlinách je: syntéza a oprava nukleotidů a homeostáze kovů, zejména při udržování strukturální integrity různých proteinů (Zhang et al. 2019). Železo se také účastní procesu oxidace, který uvolňuje energii z cukrů a škrobů, a reakcí, při kterých se v rostlině přeměňují dusičnany na amonný kationt. Hraje zásadní roli v metabolismu nukleových kyselin (Rawashedeh & Florina 2015).

Požadavky obilovin na obsah železa v pletivech nejsou vysoké, obvykle v rozmezí 50–250 mg/kg v sušině. Pod 50 mg/kg v sušině již mluvíme o deficitu. V zrně pšenice byl zjištěn obsah 25–35 mg/kg (Rawashedeh & Florina 2015).

Z důvodu nízké rozpustnosti železa v půdě si rostliny vyvinuly účinné mechanismy pro jeho příjem. Protože Fe je náchylné k vysrážení a přebytek iontového železa je cytotoxický, mají rostliny také vnitřní mechanismy pro jeho transport. Tyto transportní mechanismy zahrnují vznik komplexu chelát-železo apod. (Kobayashi et al. 2019).

Železo je transportováno xylémem do nadzemní biomasy, kde se nejdříve dostane do bazálních částí, do tzv. diskriminačního centra. Z něho je potom transportováno do mladších listů floémem. Předpokládá se, že Fe je také translokováno prostřednictvím floému ze starších listů do vyvíjejících se pletiv, jako jsou nové listy, vrcholy výhonků a zrající semena. To však dosud nebylo přesvědčivě prokázáno (Kobayashi et al. 2019).

3.2.1.2 Železo v půdě

Oproti ostatním mikroprvkům se železo v půdě vyskytuje v poměrně vysokém množství, okolo 200 000 mg/kg (2 %). Jde hlavně o Fe v krystalické mřížce primárních a sekundárních minerálů (Vaněk et al. 2016). V půdě je rozpustnost železa extrémně nízká, zejména za

aerobních podmínek při vysokém pH (Kobayashi et al. 2019). Převážná část je v anorganické formě. V podmínkách vyššího pH tvoří sloučeniny s nízkou rozpustností, až při pH <5 se Fe vyskytuje v iontové formě, a to jako Fe^{3+} a Fe^{2+} . Jejich poměrné zastoupení se řídí podmínkami v půdě, v zamokřených a málo provzdušněných půdách převažuje Fe^{2+} , naopak v biologicky aktivnějších a provzdušněných Fe^{3+} (Vaněk et al. 2016).

3.2.1.3 Nedostatek Fe

Nedostatek železa se běžně vyskytuje u rostlin pěstovaných ve vápenatých a nevápenatých půdách s vysokým podílem částic nad 2 mm, zejména v aridních či semiaridních oblastech. Místa s nedostatkem železa se nacházejí napříč všemi kontinenty (Fageria et al. 2002).

Při nedostatku železa v rostlinách se příznaky projevují na nejprve na mladších listech, a to intravenózní chlorózou, protože Fe je vyžadováno pro biosyntézu chlorofylu i samotnou fotosyntézu (Kobayashi et al. 2019). Mladší listy nejdříve vykazují světle zelenou barvu a následně žloutnou, přičemž je charakteristické, že žloutne i okolí nervatury listu. Tento nedostatek je typický pro acidofilní rostliny, jako je lupina, rajče či réva vinná. U běžných polních plodin se může vyskytovat na alkalických půdách (Vaněk et al. 2016).

3.2.2 Mangan

3.2.2.1 Mangan v rostlině

Mangan hraje roli v různých procesech životního cyklu rostliny, jako např. fotosyntéza, dýchání, zachycování reaktivního kyslíku, obrana proti patogenům a hormonální signalizace. Nejvíce prostudovanou funkcí v metabolismu rostlin, která závisí na Mn, je reakce štěpení vody ve fotosystému II, která je prvním krokem fotosyntézy. Tento proces vyžaduje mangan k rozdělení dvou molekul vody na čtyři elektrony, čtyři protony a molekulární O_2 (Alejandro et al. 2020).

Jak bylo zmíněno, mangan je důležitý při rozvoji odolnosti rostlin vůči chorobám kořenů i listů (Heckman et al. 2003). Dostupnost Mn v půdě se liší a závisí na mnoha environmentálních a půdních biotických faktorech. Vyšší rostliny vyžadují Mn v mnohem vyšší koncentraci než houby a bakterie a patogen má příležitost využít tento rozdíl v požadavcích (Marschner 2012).

Hnojení manganem může regulovat řadu patogenních chorob, jako je padlí, peronospora či hnědá skvrnitost pšenice. Mn inhibuje indukci aminopeptidázy, enzymu, který dodává esenciální aminokyseliny pro růst hub a pektin-methylesterázy, houbového enzymu, který degraduje stěnu hostitelské buňky (Dordas 2008).

V sušině rostlin se obsah manganu značně liší. Vaněk et al. (2016) uvádí, že v sušině trav se pohyboval v rozpětí 8–1119 mg/kg. Li et al. (2019) uvádí, že pro většinu rostlin je mangan nezbytný v obsahu 20–40 mg/kg v suché hmotě. Naproti tomu, když koncentrace Mn v nadzemní biomase rostlin dosáhne 150 mg/kg v sušině, může se objevit toxicita Mn, zejména u rostlin rostoucích v kyselých půdách.

Z půdy je přijímán ve dvojmocné formě Mn^{2+} (Alejandro et al. 2020). V rostlinách je Mn málo pohyblivý a jeho reutilizace ze starších orgánů je omezena (Vaněk et al. 2016).

3.2.2.2 Mangan v půdě

Mangan je po železe druhým nejrozšířenějším stopovým prvkem v zemské kůře a je široce rozšířen v půdách a sedimentech (Li et al. 2019). Obsah manganu v půdě se značně liší, od několika desítek mg/kg na půdách lehkých a kyselých až k desetinám procent na půdách alkalických. V půdě se vyskytuje v několika oxidačních stupních. Hlavní část pro rostliny přijatelného (Mn^{2+}) je v půdním roztoku nebo na sorpčním komplexu (Vaněk et al. 2016).

Přístupnost Mn je lepší v podmínkách kyselejšího pH. Proto vápnění může vést k jeho horší přístupnosti, avšak na půdách zamokřených a kyselých je vyšší přijatelnost až nežádoucí, neboť vede k toxickému působení manganu (Vaněk et al. 2016).

Důležitým faktorem dynamiky Mn v půdách je exsudace protonů (H^+), karboxylátů a enzymů rostlinou kořeny. Exsudace protonů zvyšuje dostupnost Mn v rhizosféře výměnnou sorpcí na jílové minerály či organickou hmotu, a také snížením pH alkalických půd (Rengel 2015). Je pozoruhodné, že dostupnost Mn je také zvýšena exsudací karboxylátů kořeny, které chelatují Mn a redukují Mn^{4+} na Mn^{2+} v kyselých nebo alkalických půdách (Alejandro et al. 2020).

3.2.2.3 Nedostatek Mn

Nedostatek Mn v rostlinách se vyskytuje zejména na alkalických půdách, ve kterých oxiduje Mn^{2+} na nedostupný MnO_x . Takové půdy jsou běžné v severní části Evropy, Spojeném království, USA, Číně a v jižní Austrálii (George et al. 2014).

U rostlin se deficit Mn často vyskytuje jako latentní, bez jasných vizuálních příznaků. Je tedy obtížné kvantifikovat míru, do jaké nedostatek Mn ovlivňuje výnos plodin (Alejandro et al. 2020).

Kritická koncentrace pro nedostatek Mn je obecně pod 10–20 mg/kg v sušině (Marschner 2012). Jedním z důsledků nedostatku Mn u rostlin je narušený růst, který vede k poklesu množství biomasy (Alejandro et al. 2020). To může být způsobeno nižším počtem chloroplastů, nižší fotosyntetickou účinností a poklesem obsahu chlorofylu a také vyšší náchylností k patogenním infekcím (Heckman et al. 2003), nerovnováha v hospodaření rostliny s vodou a snížená tolerance k nízkým teplotám. Nedostatek Mn vede ke snížení počtu Mn-komplexů v jádře PSII, což způsobuje jeho destabilizaci a rozpad, a snižuje tak rychlost fotosyntézy (Alejandro et al. 2020).

Zjevnými příznaky nedostatku Mn jsou šedé až hnědé ohraničené skvrny na středních listech. Kvůli snížení turgoru buněk tyto listy vyhlíží pomačkaně. Takové příznaky vykazují především trávy. Při silnějším nedostatku dochází k nekrotám pletiv (Vaněk et al. 2016).

3.2.3 Zinek

Zinek je další esenciální mikroživinou, která pomáhá při tvorbě tryptofanu, prekurzoru IAA (kyselina indol-3-octová). Ten je odpovědný za stimulaci růstu a hraje zásadní roli při syntéze enzymu karboanhydrázy, který pomáhá při transportu CO_2 ve fotosyntéze. Přímou či nepřímou je tedy zinek vyžadován několika enzymovými systémy a při syntéze auxinu (Zewide & Sherefu 2021).

3.2.3.1 Zinek v rostlině

Tento mikroelement je rostlinami přijímán jako kationt Zn^{2+} , ve velmi alkalických podmínkách je však přijímán ve formě $ZnOH^+$ (Balafrej et al. 2020). Nároky jednotlivých druhů na jeho množství se poměrně liší a jeho obsah se pohybuje od 20 do 100 mg/kg v sušině. Kritickým bodem je proto 20 mg/kg, kdy pod touto hladinou se mohou již projevovat příznaky nedostatku Zn (Vaněk et al. 2016).

Pohyblivost zinku v rostlinách stejně jako v půdě ovlivňuje fosfor. Jeho vyšší přítomnost v pletivech omezuje transport zinku do vegetačního vrcholu rostliny. Proto se sleduje poměr P:Zn, například u kukuřice je považováno za normální 50–200:1. Obecně však platí, že je pohyblivost Zn je nízká, i když je lepší než u dalších mikroprvků hlavně Fe, B a Mo (Vaněk et al. 2016).

V rostlinách hraje zinek klíčovou roli jako strukturální složka nebo regulační kofaktor široké škály různých enzymů a proteinů v mnoha důležitých biochemických drahách. Mezi nejznámější se řadí, kromě výše zmíněného metabolismu auxinu, také:

- metabolismus sacharidů, jak při fotosyntéze a při přeměně cukrů na škrob,
- metabolismus bílkovin,
- tvorba pylu,
- zachování biologické integrity membrán,
- odolnost vůči infekci určitými patogeny (Alloway 2008).

3.2.3.2 Zinek v půdě

Celkový obsah zinku v půdě Kiekens (1995) uvádí v rozmezí 10–300 mg/kg s průměrem kolem 50 mg/kg. Tento průměr se ale může lišit dle zrnitostního složení půdy. Například Kabata-Pendias & Pendias (1992) v Polsku publikovali výsledky pro písčité půdy 37 pro spraše 60 a pro hlinité půdy 75 mg/kg. Dle Alloway (2008) je obsah zinku v půdě závislý na obsahu jílových částic. U písčitých půd lze předpokládat jeho nižší obsah. Tyto půdy potom mají deficit Zn pro rostliny.

Matečná hornina má největší vliv na zásobu Zn v půdě, ale v případech environmentální kontaminace či aplikace materiálů bohatých na zinek zemědělci může dojít k výrazné změně. Aplikace hnoje z intenzivních chovů dobytka či prasat může přivést do půdy nezanedbatelné množství Zn kvůli jeho přidávání do krmných dávek. Dalším významným hnojivem s obsahem zinku jsou čistírenské kaly (Alloway 2008).

Celkový obsah zinku se dělí do pěti frakcí, mezi které patří:

- vodorozpustný
- vázaný fyzikálně-chemickou sorpcí na jílové minerály neboli výměnný
- organicky vázaný – ionty adsorbované, chelatované nebo vázané v komplexu na organické ligandy
- nevýměnný Zn vázaný na jíl
- v primárních minerálech.

Mezi těmito formami se stejně jako u draslíku stále dynamicky ustaluje rovnováha (Alloway 2008). Pro rostliny přístupné frakce jsou vodorozpustný a při uvolnění do roztoku i

výměnný Zn, jejich obsah je však velmi nízký, jak uvádějí Kabata-Pendias & Pendias (1992), 4–270 µg/kg. V této formě je nejčastěji jako Zn^{2+} či $ZnOH^+$

Mobilita Zn je v profilu celkem malá, hlavně při vyšším pH a při vyšším obsahu fosforu (Vaněk et al. 2016).

3.2.3.3 Nedostatek Zn

Při nedostatečném zásobení rostliny zinkem je jedna nebo více z mnoha důležitých fyziologických na něm závislých funkcí nepříznivě ovlivněna, a tím i růst rostliny samotné. Změny ve fyziologických mechanismech mohou vést k viditelným příznakům stresu, které mohou zahrnovat jeden nebo více z následujících: zakrnění (snížená výška), intervenózní chloróza (zežloutnutí listů mezi žilkami), bronzování chlorotických listů, malé a abnormálně tvarované listy či zakrnělé růžice listů. Tyto příznaky se liší podle druhu rostliny. Zřetelně se projevují u jedinců s vážným deficitem. V případech marginálního nedostatku se výnosy rostlin mohou snížit i o 20 % bez zjevných viditelných příznaků (Alloway 2008).

3.2.4 Měď

3.2.4.1 Měď v rostlině

Měď je přijímána rostlinami z půdy ve formě Cu^{2+} , její obsah v sušině je poměrně nízký 2–20 mg/kg, a to i v případech, kdy je její vyšší koncentrace v půdě (Vaněk et al. 2016). Růst rostlin je vysoce závislý na dostupnosti Cu, protože hraje klíčovou roli při regulaci mnoha biochemických reakcí v rostlinách. Cu se aktivně účastní mnoha fyziologických procesů v rostlinách, protože je přítomna ve formě oxidované Cu^{2+} a redukované Cu^+ v histidinu a cysteinu, resp. methioninu. Účastní se oxidačně-redukčních reakcí jako nosič elektronů v chloroplastech a mitochondriích. Měď hraje významnou roli v dýchání, fotosyntéze, lignifikaci, metabolismu fenolů, syntéze bílkovin či regulaci auxinů (Tripathi et al. 2015).

Další funkce Cu v organismu rostlin lze shrnout následovně:

- významně se podílí na metabolismu buněčné stěny a signální dráze při transkripci,
- Cu se aktivně podílí na oxidativní fosforylaci a mobilizaci železa,
- Cu hraje důležitou roli v biogenezi molybdenového kofaktoru (Tripathi et al. 2015).

Asimilace oxidu uhličitého a produkce ATP jsou další klíčové funkce, na kterých se podílí Cu v rostlinách (Mir et al. 2021).

3.2.4.2 Měď půdě

V půdě se měď vyskytuje v mnoha formách, jako jsou oxidy mědi (jak Cu^+ , tak Cu^{2+}), uhličitany či sulfidy. Měď se běžně nachází v krystalových mřížkách primárních a sekundárních minerálů. Kationt Cu^{2+} má vyšší afinitu k půdní organické hmotě ve srovnání s dalšími dvojmocnými kationty (Ni, Pb, Co, Zn, Mn či Mg). V přírodních podmínkách se průměrná koncentrace mědi v půdě pohybuje mezi 6 a 80 mg/kg (Mir et al. 2021).

V důsledku antropogenních činností, zejména průmyslu a zemědělství, se koncentrace Cu v půdě na mnoha místech dramaticky zvýšila a je považována za významný polutant. Mezi příčiny akumulace Cu patří:

- tavení rud obsahujících měď,
- nesprávná likvidace pevného odpadu obsahujícího baterie, slitiny, pigmenty a barvy,
- široké používání agrochemických produktů na bázi Cu, jako jsou hnojiva, fungicidy apod. (Mir et al. 2021).

3.2.4.3 Nedostatek Cu

Nedostatek mědi je na našich půdách nepravděpodobný, zvláště na stanovištích, kde se dříve hojně používaly měďnaté přípravky na ochranu rostlin. Mohl by nastat na kyselých stanovištích či na místech s vysokým obsahem organické hmoty. Přijatelnost sice není významně ovlivněna pH půdy, ale lze očekávat nižší příjem Cu při silném vápnění kyselých půd. Nejcitlivější na nedostatek mědi jsou obilniny. Dochází ke snížení tvorby generativních orgánů, tedy k nižšímu výnosu. Příznaky lze pozorovat již ve fázi odnožování, kdy zasychají a světlají špičky listů, které se dále stáčejí (Vaněk et al. 2016).

3.2.5 Bór

3.2.5.1 Bór v rostlině

Mikroelement bór je pro rostliny nezbytný po celou dobu růstu, a to jak ve vegetativní, tak v generativní fázi (Mousavi & Raiesi 2022). Rostliny potřebují jeho konstantní přísun (Wimmer & Eichert 2013). Dostupnost B v půdě a závlahové vodě je tedy důležitým determinanem zemědělské produkce (Camacho-Cristóbal et al. 2008).

Bór se v rostlinách podílí na velmi rozmanitých procesech, jako je prodlužování kořenů, aktivita oxidázy kyseliny indolctové (IAA), translokace cukru, metabolismus sacharidů, syntéza nukleových kyselin a růst pylové láčky. Dalšími procesy, které bór ovlivňuje jsou: membránový potenciál, enzymy vázané na plazmalemě a toky iontů přes membrány, cytoskeletální proteiny, akumulace fenolických látek a polyaminů a metabolismus dusíku (Camacho-Cristóbal et al. 2008).

Mimo výše zmíněné Vaněk et al. (2016) uvádějí, že bór je nutný dále pro:

- stabilitu buněčné stěny,
- růst a činnost meristematických pletiv.

Jeho obsah v sušině se pohybuje v rozmezí 5–100 mg/kg. Je přijímán obdobně jako vápník pasivně ve formě nedisociované kyseliny borité. Jeho pohyb je známý pouze akropetálně, do apikálních částí rostlin je přesunován transpiračním proudem. V případě, že by došlo k nadměrnému příjmu B, mohl by poškozovat pletiva zejména na okrajích listů (Vaněk et al. 2016).

3.2.5.2 Bór v půdě

Množství celkového B ve většině zemědělských půd světa je přibližně od 5 do 30 mg/kg. Pouze malá část z celkového množství B (5–10 %) je však rozpustná ve vodě, a tak rostlinám přístupná jako živina. Jeho dostupnost ovlivňuje v první řadě pH, které je optimální do hodnoty

6,3 (Mousavi & Raiesi 2022). Při vyšším pH tvoří špatně rozpustné vápenatohlinitokřemičitanové sraženiny (Vaněk et al. 2016).

V půdním roztoku se bór vyskytuje ve formě kyseliny borité, kterou lze snadno vyplavovat z orničního profilu v místech s promyvným vodním režimem (Yan et al. 2006), což vede k deficienci u rostlin, které tam rostou (např. Čína, USA a Brazílie). Naopak při nízkých srážkách se B nemůže dostatečně vyplavovat, a proto se může akumulovat v půdě, kde se stane toxickým pro růst rostlin. To je velmi časté v suchých a semiaridních oblastech, kde dochází k akumulaci B v ornici v důsledku odpařování (Camacho-Cristóbal et al. 2008).

3.2.5.3 Nedostatek B

Projevy nedostatku bóru jsou často latentní, „pouze“ utrpí kvalita produkce z důvodu menší tvorby zásobních látek. Při vyšším deficitu se projevuje snížením výnosu a celkově menší tvorbou nadzemní a podzemní biomasy. Projevy jsou pozorovatelné na mladších částech rostlin, protože B je málo pohyblivý (Vaněk et al. 2016).

Dvouděložné rostliny mají obecně vyšší nároky na množství B, proto na nich můžeme pozorovat viditelné nedostatky. Typickým příkladem je srdéčková hniloba u řepy. U bobovitých rostlin se deficit projevuje chlorózou vrcholových částí (Vaněk et al. 2016).

Nedostatek B může ovlivnit hospodaření rostlin s vodou. Mění se příjem vody kořeny, transport přes nadzemní části a ztráta vody listy. Neexistuje univerzální obraz, jak nedostatek B ovlivňuje hospodaření s vodou celé rostliny, protože může být ovlivněno mnoho procesů a reakce jednotlivých druhů rostlin se velmi liší. Lze například očekávat, že strukturální poškození v důsledku narušené tvorby buněčné stěny se bude u jednoděložných a dvouděložných druhů lišit vzhledem k jejich odlišnému složení buněčné stěny. Kromě toho může deficit B buď snížit, nebo zvýšit celkovou ztrátu vody listem. Tyto opačné účinky se mohou dokonce vyskytovat současně, v závislosti na závažnosti a trvání deficitu B (Wimmer & Eichert 2013).

3.2.6 Molybden

3.2.6.1 Molybden v rostlině

Význam molybdenu pro růst rostlin je neúměrný vzhledem k absolutnímu množství vyžadovaného většinou rostlin (Kaiser et al. 2005). V jejich sušině se nachází přibližně v koncentraci 0,5 mg/kg (Vaněk et al. 2016). Kromě Cu je Mo nejméně zastoupenou esenciální mikroživinou nacházející se ve většině rostlinných tkání (Kaiser et al. 2005).

Příjem molybdenu je pozitivně ovlivněn fosforem, u něhož se přepokládá, že pomáhá při přesunu Mo z kořenových buněk do transportního systému. Naopak při příjmu síry je mezi těmito anionty přímá konkurence (Vaněk et al. 2016).

Molybden je využíván některými enzymy při redoxních reakcích. Mezi enzymy, které ke své aktivitě vyžadují molybden patří nitrát reduktáza, xantinoxidáza, aldehyd oxidáza a sulfid oxidáza (Kaiser et al. 2005).

Pohyblivost molybdenu v rostlinách je nízká. I přes jeho obvykle velmi nízkou koncentraci v pletivech, nezpůsobuje fytotoxicitu při nadbytku v organismu. Přebytečný Mo rostliny ukládají do vakuol. Bylo zjištěno, že rostliny přijímají Mo bez ohledu na svou

fyziologickou potřebu. Takto přijatý Mo zůstává v zelených částech rostlin. Toto může být nebezpečné pro živočichy. Proto byla stanovena limitní hranice zdravotní nezávadnosti pro obsah Mo v rostlinných materiálech na 5 mg/kg (Vaněk et al. 2016).

3.2.6.2 Molybden v půdě

Průměrné množství molybdenu v půdě dosahuje 2,3 mg/kg, může se však díky recyklaci v živých organismech nakumulovat až do množství 300 mg/kg (Reddy et al. 1997).

Přístupnost molybdenu pro růst rostlin je silně závislá na pH půdy, koncentraci adsorbujících oxidů (např. oxidy železa) či organických sloučeninách nalezených v půdních koloidech. Na alkalických půdách se molybden stává rozpustnějším a je pro rostliny přístupný především ve své aniontové formě jako MoO_4^- . Naproti tomu v kyselých půdách ($\text{pH} < 5,5$) dostupnost molybdenu klesá s rostoucí adsorpcí aniontů na oxidy v půdě (Kaiser et al. 2005).

3.2.6.3 Nedostatek Mo

V čeledi *Brassicaceae* jsou nedostatky molybdenu výraznější než u jiných čeledí. Vizuální symptomy u mladých rostlin zahrnují skvrnitost, stáčení okrajů listů a tvorba lžičkovitých listů, šedé zbarvení a zvadlé listy, které se často vyskytují na semenáčcích, ty poté zůstávají zakrslé až do odumření. U starších rostlin, kde byl nedostatek odstraněn nebo když je deficit nízký, se příznaky objevují v mladších listech s charakteristickou ztrátou správného vývoje čepele, kožovitými listy a nekrózou meristému (Kaiser et al. 2005).

3.3 Extraktanty

Při současné snaze maximálního šetření zdroji je nezbytná znalost obsahu živin v půdě dostupných pro rostliny. Pro tyto účely bylo vyvinuto mnoho extrakčních činidel s různou efektivitou a zaměřením. Některá se používají pro analýzy širokého spektra živin (Mehlich 3) a některé pro konkrétní živinu (Olsen). Některé příklady jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

3.3.1 Mehlich 3

Extrakční činidlo Mehlich 3 (M3) bylo vyvinuto v roce 1984 pro překonání omezení, které měly metody Mehlich 1 a 2 (M1 a M2). U metody M1 to byla nemožnost extrakce fosforu na neutrálních až alkalických půdách, kyseliny v metodě M2 nebyly schopny extrahovat měď (Mehlich 1984).

Použité kyseliny jsou: 0,2 mol/l CH_3COOH (kyselina octová), 0,015 mol/l NH_4F (fluorid amonný), 0,013 mol/l HNO_3 (kyselina dusičná), 0,001 mol/l EDTA a 0,25 mol/l NH_4NO_3 (dusičnan amonný) (Mehlich 1984; 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. Roztok má pH 2,5 pro optimální extrakci (dosažené přidáním 0,2 mol/l CH_3COOH), aby byla využita výhoda NH_4F . Hodnota pH 2,5 pomáhá zabránit reakci Ca a F za vzniku sraženiny CaF_2 . NH_4F byl přidán do M3 pro extrakci fosforu ze sloučenin

s Ca, Fe a Al (Mehlich 1984). Metoda M3 je dle Kulhánka et al. (2018a) vhodná i pro stanovení rostlinám přístupné síry.

Mehlich (1984) uvádí, že metoda Mehlich 3 extrahuje o 20 % více fosforu než M2 a o 4 % více než metoda Bray 1. Při porovnání obsahu s octanem amonným bylo množství K a Mg v M3 o 6–8 % vyšší. Všechny stanovené obsahy spolu však úzce korelovaly.

Metoda Mehlich 3 je jako jediná celosvětově uznaná extrakce pro stanovení množství fosforu dostupného pro rostliny mezilaboratorními studii (Zhang et al. 2014). Je využíván jak v České republice, tak v USA, Kanadě či Austrálii (Wünscher et al. 2013).

3.3.2 Vodný výluh

Analýzou půdy pomocí vodného výluhu zjišťujeme množství okamžitě přístupných, vodorozpustných, živin (Kulhánek et al. 2018b).

Nejprve byl vodný výluh použit pro stanovení přístupného fosforu pro rostliny. Dosahoval lepších výsledků než metody Olsen a Truog. Výzkum byl prováděn na odběru vzorků půdy a rostlin jílku. Obsahy ve vzorcích byly poté statisticky vyhodnocovány (Luscombe et al. 1979).

Self-Davis et al. (2004) uvádějí, že vodný výluh je vhodnější metodou pro stanovení přístupného fosforu než M3. Důvodem je, že Mehlich 3 obsahuje silné kyseliny, které extrahují i pro rostliny nepřijatelný P např. z fosforečnanu vápenatého. Lepší korelaci extrahovaného P vodným výluhem než metodou Mehlich 3 potvrzuje i Matula (2009), který dále uvádí, že při extrakci draslíku (z půdy a nadzemní části rostliny) hodnoty korelačních koeficientů u extrakce vodou, M3 a octanem amonným se výrazně nelišily.

3.3.3 Morgan

Morganovo činidlo bylo prvním univerzálním extraktantem pro stanovení množství makroprvků (Jones 1990). Lze s ním určit fosfor, draslík, vápník i hořčík. Jeho složení je 0,54 mol/l CH_3COOH (kyselina octová), 0,7 mol/l CH_3COONa (octan sodný). Tento roztok má pH 4,8 a je vhodný pro stanovení makroprvků i mikroprvků na všech kyselých půdách i v směsích neobsahujících půdu (Jones 1998).

Modifikovaná verze Morganu ve složení 1,4 mol/l $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, 1 mol/l HCl, 0,025 mol/l EDTA a pH = 4,2 byla používána do roku 2004 pro stanovování množství makroprvků na půdách v Texasu. Byla však nahrazena extrakční metodou Mehlich 3 (Mylavarapu et al. 2014).

3.3.4 0,01 mol/l CaCl_2

Tato metoda je dle Houba et al. (2000) jednoduchá, levná a snadno proveditelná, protože chemikálie použité pro extrakci jsou běžně dostupné v laboratoři pro testování půd tj. 0,01 mol/l CaCl_2 . Lze ji využít podobně jako metodu Mehlich 3 pro stanovení draslíku, hořčíku, síry či fosforu. Má potenciál být využívána pro porovnávání výsledků mezilaboratorně. Je možnost touto metodou stanovovat živiny i kovy a následně zvažovat vztahy mezi nimi během interpretace příslušných dat.

Houba et al. (1986) prokázali dobrý vztah mezi extrakční metodou za použití CaCl_2 a konvenčními metodami používanými v Nizozemsku pro makroprvky K, Mg a P. Což naznačuje, že CaCl_2 extrahuje makroprvky z půdního roztoku a vázané výměnnou sorpcí na půdní koloidy (van Erp 2002).

3.3.5 Egner

V minulosti bylo Egnerovo extrakční činidlo používáno pro Agrochemické zkoušení zemědělských půd převážně pro stanovení přístupného P, K, Ca a Mg. Složení tohoto extraktantu je 0,01 mol/l HCl a 0,01 mol/l $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{CaO}_6$ (Zbiral 2000). Jeho pH má hodnotu 3,7 (Landová et al. 2017).

Egnerovou metodou je stanoveno přibližně 60–70 % fosforu oproti metodě Mehlich 3, protože Mehlich 3 obsahuje fluoridy, které extrahují anorganický P na slabě kyselých půdách ze sloučenin s Al a F (Landová et al. 2017).

3.4 Pšenice ozimá

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

Pšenice ozimá je v České republice nejpěstovanější plodinou na orné půdě. Dle dat Českého statistického úřadu (ČSÚ) jí byla k 31.5.2022 oseta výměra 801 578 ha, to odpovídá 32,6 % celkové osevní plochy všech zemědělských plodin. Tato výměra byla o 92 042 ha vyšší než v předchozím roce 2021 (ČSÚ 2023).

Na vysokém zastoupení v osevu má z velké části zásluhu její dlouhodobé šlechtění. Široká škála odrůd vhodných pro různé podmínky se uplatní jak v úrodných oblastech, tak v místech s nižším výnosovým potenciálem (Vaněk et al. 2016).

Výživa pšenice se řídí podle odběrového normativu, předpokládaného výnosu a také dle dynamiky odběru živin v průběhu vegetace. Nároky na makro- a mikroživiny jsou uvedeny v tabulkách 1 a 2. Osvojovací schopnost pšenice je nižší než např. okopanin či bobovitých rostlin. Kořenový systém obilnin je sice bohatý, ale soustředěný převážně do hloubky 40 cm (Vaněk et al. 2016).

Tab. 1: Střední odběr makroživin v kg č. ž. pšenicí 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

Tab. 2: Střední odběr mikroživin v g č. ž. na 1 t zrna a odpovídající množství slámy (Yara 2023)

Cu	Mn	Zn	B	Fe
10	70	52	25	137

4 Metodika

Diplomová práce navazuje bezprostředně na mou bakalářskou práci na téma „Ověření vhodnosti metody Mehlich 3 pro stanovení přístupných makroprvků v půdě pro pšenici ozimou“. Významné rozšíření představuje hodnocení půdních i rostlinných vzorků z nových stanovišť zařazených roce 2022, a především hodnocení obsahu rostlinám přístupných mikroprvků.

4.1 Odběry půdních a rostlinných vzorků

Vzorky rostlin a půdy byly odebírány z ploch s pěstovanou pšenicí ozimou, a to v letech 2015–2022. Cílem odběrů bylo postihnout co nejširší škálu půd, zejména z hlediska půdního druhu a hodnoty pH. Tyto faktory hrají klíčovou roli v přístupnosti jednotlivých makro- a mikroprvků. Naměřené hodnoty výměnného $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ se pohybovaly v rozmezí 4,70–8,30. Z celkového počtu 133 odebraných půdních vzorků činily 37 lehké, 75 střední a 21 těžké půdy. Z předběžných analýz vyplývá, že půdní druh měl na sledované parametry nižší vliv než hodnota pH, proto je v práci dále sledován především vliv pH na přístupnost makro- i mikroprvků. Pozemky pro odběr byly zvoleny na základě dat poskytnutých ústředním kontrolním a zkušebním ústavem zemědělským v Brně (ÚKZÚZ) nebo po dohodě s majiteli pozemků. Vzorky byly odebrány v okresech Benešov (n=3), Chomutov (n=1), Hradec Králové (n=22), Louny (n=10), Litoměřice (n=20), Mladá Boleslav (n=26), Mělník (n=11), Nymburk (n=17), Praha-Východ (n=3), Prostějov (n=6), Rokycany (n=4), Ústí nad Orlicí (n=1), Vsetín (n=1) a Znojmo (n=8). Vzhledem k požadavkům většiny majitelů pozemků nejsou v rámci této práce zveřejněny bližší informace o stanovištích (GPS souřadnice). Na vytipované reprezentativní 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).

4.2 Zpracování vzorků

Vzorky půdy byly usušeny při pokojové teplotě, případně v laboratorní sušárně (max. 40 °C) 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, Německo) přes 1 mm síto. Namleté vzorky byly následně analyzovány.

4.3 Provedené analýzy

4.3.1 Hodnota výměnného $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$

Pro stanovení hodnoty výměnného $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 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 sondou (HANNAH instruments, HI991301, Rumunsko). Metoda byla adaptována dle (Minasny et al. 2011). Obdobný postup je používán i v laboratořích ÚKZÚZ.

4.3.2 Stanovení obsahu okamžitě přístupných makro- a mikroprvků 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 makro- a mikroprvků optickým emisním spektrometrem s indukčně vázaným plazmatem (Varian VistaPro, Mulgrave, Austrálie), dále jen ICP-OES.

4.3.3 Stanovení potenciálně přístupných makro- a mikroprvků 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 ethylendiamintetraoctová kyselina (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. Ve filtrátu byl měřen obsah přístupných makro- a mikroprvků pomocí ICP-OES.

4.3.4 Analýzy rostlin

Bylo naváženo 0,5 g ($\pm 0,005\text{g}$) namletého rostlinného materiálu. Ten byl převeden do roztoku rozkladem na mokré cestě s pomocí mikrovlnné digesce (Ethos 1; MLS GmbH, Švýcarsko) v prostředí kyseliny dusičné a peroxidu vodíku. Získaný vzorek byl poté kvantitativně převeden do roztoku (finální objem 50 ml). V roztoku byl následně měřen obsah sledovaných prvků přístrojem ICP-OES. Pouze obsah draslíku byl měřen plamenovým atomovým absorpčním spektrometrem (F-AAS 280 FS, Mulgrave, Austrálie).

4.4 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. 2023).

5 Výsledky

5.1 Nekarbonátové půdy

V tabulce 3 jsou uvedeny popisné charakteristiky, tedy aritmetický průměr, medián, minimální a maximální hodnoty u pH a množství živin v půdě stanovených metodou Mehlich 3. Karbonátové a nekarbonátové půdy byly rozděleny dle hodnoty pH, a tato hranice byla určena na $\text{pH} = 7,00$. Minimální hodnota pH činila 4,70, průměr dosáhl totožné hodnoty jako medián 5,95. Jednalo se o rozmanitá stanoviště z hlediska zásobenosti potenciálně přístupných živin, protože rozdíly mezi minimy a maximy jsou vysoké. Z toho důvodu lze považovat soubor za vhodný k analýze.

Tab. 3: Popisné charakteristiky hodnoty pH a výsledků analýz metodou Mehlich 3 ($n=60$)

	pH	P	K	Ca	Mg	S
	0,01M CaCl₂	mg/kg				
Průměr	5,95	99,9	276	2692	183	13,5
Medián	5,95	89,1	236	2465	164	10,3
Minimum	4,70	27,9	89,1	752	78,4	6,77
Maximum	6,99	445	692	6737	559	56,5

	Cu	Zn	Fe	Mn
	mg/kg			
Průměr	3,77	4,61	299	108
Medián	2,90	3,69	292	94,9
Minimum	1,07	0,71	97,3	36,5
Maximum	19,8	26,8	540	237

V tabulce 4 jsou stejně jako v tabulce 3 popisné charakteristiky přístupných makro- a mikroprvků, tentokrát stanovených vodným výluhem. Oproti množství stanoveným metodou Mehlich 3 se jedná o výrazně nižší hodnoty u všech živin s výjimkou síry, to potvrzuje hypotézu této práce, že Mehlich 3 je silným extrakčním činidlem.

Tab. 4: Popisné charakteristiky výsledků analýz vodným výluhem ($n=60$)

	P	K	Ca	Mg	S
	mg/kg				
Průměr	9,11	59,9	107	27,7	11,4
Medián	7,79	46,4	90,4	24,8	8,65
Minimum	1,49	13,7	37,1	6,49	4,11
Maximum	30,7	223	229	85,1	39,1

	Cu	Zn	Fe	Mn
	mg/kg			
Průměr	0,13	0,21	62,7	1,18
Medián	0,09	0,13	46,7	0,69
Minimum	0,00	0,00	0,29	0,11
Maximum	0,56	1,84	337	6,80

Naměřené množství a popisné charakteristiky obsahu živin v sušině rostlin pšenice ozimé jsou uvedeny v tabulce 5. Průměrné hodnoty dosahují hodnot běžných pro obsah v nadzemní hmotě rostlin uváděných v literatuře.

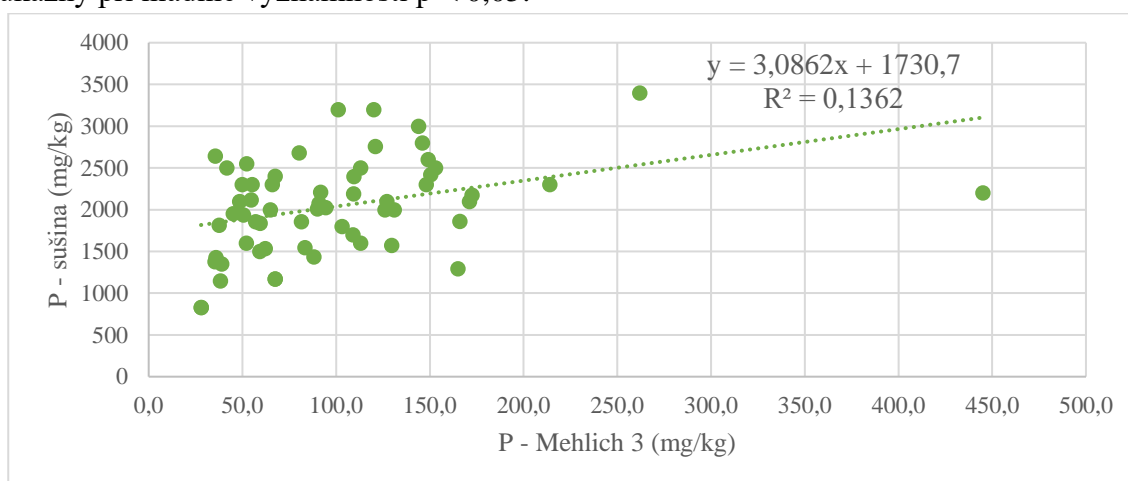
Tab. 5: Popisné charakteristiky celkového obsahu makro- a mikroprvků v nadzemní hmotě (n=60)

	P	K	Ca	Mg	S
	mg/kg				
Průměr	2039	18046	2829	1048	1473
Medián	2049	17274	2800	1000	1375
Minimum	829	8500	1500	680	872
Maximum	3400	33902	4717	1700	3000

	Cu	Zn	Fe	Mn
	mg/kg			
Průměr	2,77	16,6	73,1	37,8
Medián	2,65	15,2	61,8	30,5
Minimum	1,09	5,62	29,6	6,86
Maximum	5,38	37,9	267	181

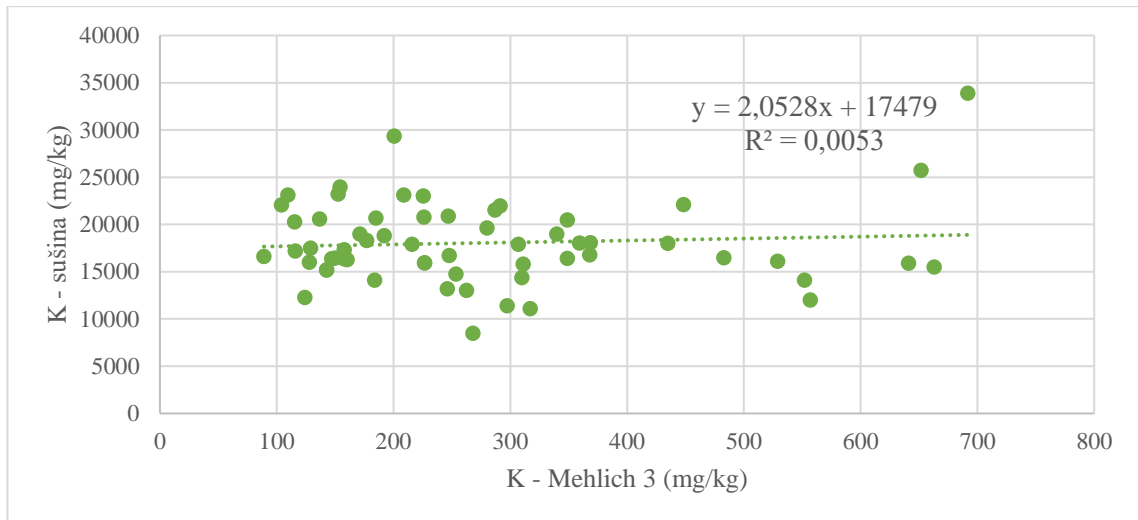
5.1.1 Regresní analýza obsahu živin v nadzemní hmotě a v Mehlich 3

Nejpodstatnějším cílem této práce bylo ověření metody Mehlich 3 z hlediska hodnocení obsahu rostlinám skutečně přístupných živin v půdě. Proto jsou v následující části hodnoceny převážně vztahy výsledků dosažených metodou Mehlich 3 s obsahy živin v rostlinách. V grafu 1 je zobrazen průběh regresní analýzy mezi množstvím fosforu v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 a obsahem P v sušině rostlin. V půdě se tento obsah pohyboval mezi hodnotami 27,9 a 446 mg/kg, v sušině bylo rozmezí 829–3400 mg/kg. Touto regresní analýzou byl vyhodnocen regresní koeficient (R^2) na 0,136. U provedené korelační analýzy byl stanoven korelační koeficient (r) pro tento vztah 0,412. Dle statistického vyhodnocení je tento vztah průkazný při hladině významnosti $p < 0,05$.



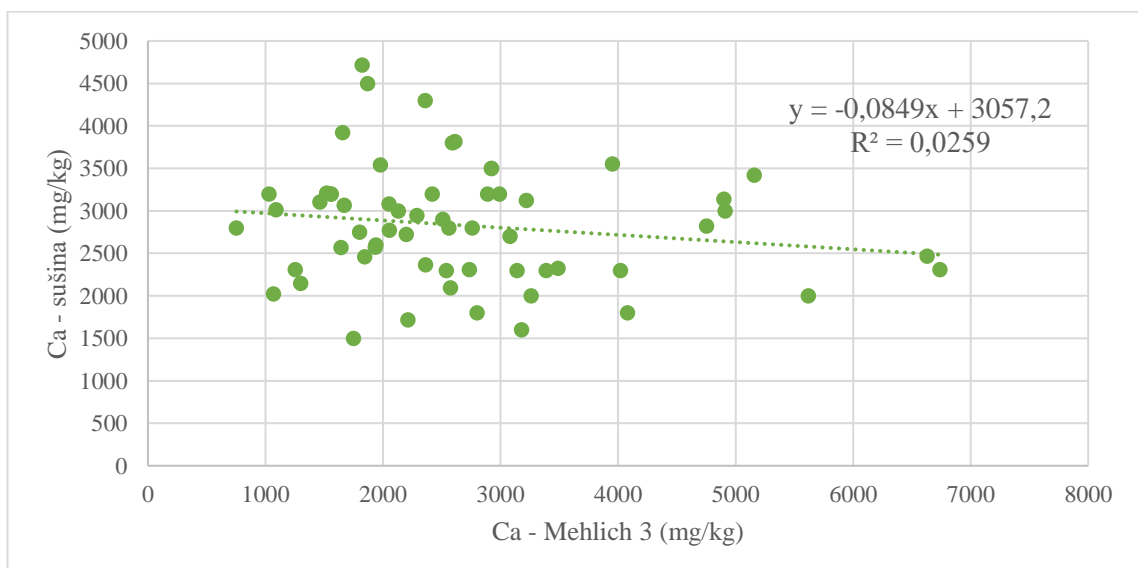
Graf 1: Regresní vztah množství fosforu v sušině rostlin s fosforem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 (n=60)

Graf 2 znázorňuje regresní analýzu stanoveného draslíku v sušině rostlin a v půdě metodou Mehlich 3 vykazuje regresní koeficient 0,005. Hodnoty v půdě dosahovaly hodnot od 89,1 do 692 mg/kg. Obsahy draslíku v rostlinách se pohybovaly od 8500 do 33902 mg/kg. Korelační analýza vykázala hodnotu $r = -0,108$, která při hladině významnosti $p < 0,05$ není průkazná.



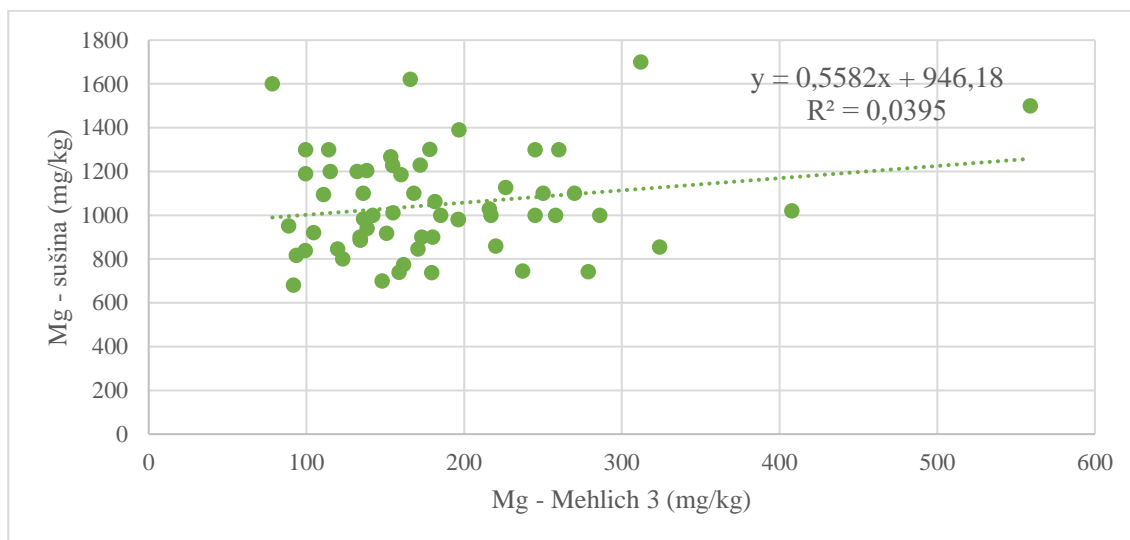
Graf 2: Regresní vztah množství draslíku v sušině rostlin s draslíkem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=60$)

Regresní analýza stanoveného vápníku v sušině rostlin a v půdě metodou Mehlich 3 vykazuje regresní koeficient (R^2) 0,026 (Graf 3). Obsahy v půdě dosahovaly hodnot 752–6737 mg/kg. Obsahy Ca v sušině se pohybovaly v rozmezí 1500–4717 mg/kg. Korelační analýza určila $r = -0,162$, ta není při hladině významnosti $p < 0,05$ průkazná.



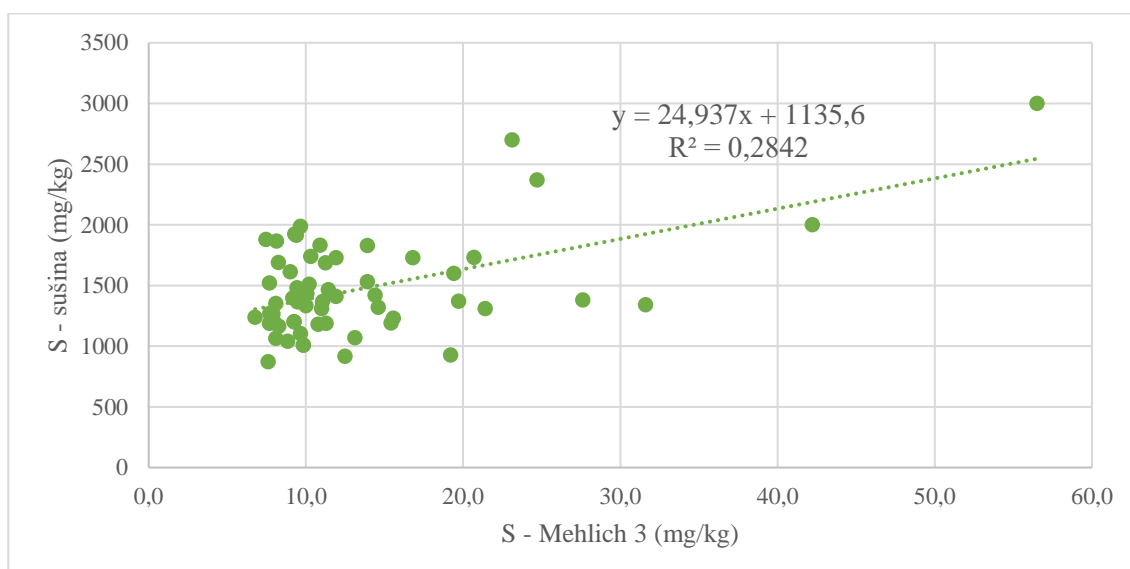
Graf 3: Regresní vztah množství vápníku v sušině rostlin s vápníkem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=60$)

Potenciálně přístupný obsah hořčíku v půdě se ve stejném souboru pohyboval v rozmezí 78,4–559 mg/kg (Graf 4). V sušině byl obsah živin 680–1700 mg/kg. Regresní koeficient (R^2) byl stanoven na 0,040. Korelační analýza byla vyhodnocena jako neprůkazná. Korelační koeficient měl hodnotu 0,130.



Graf 4: Regresní vztah množství hořčíku v sušině rostlin s hořčíkem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=60$)

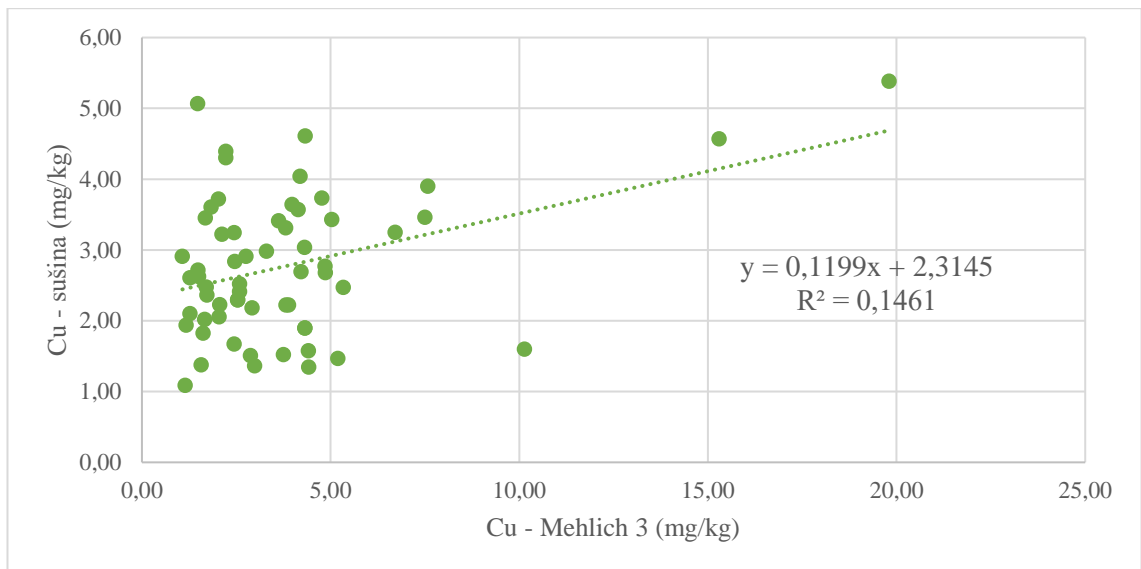
Graf 5 zobrazuje množství síry v půdě (metoda Mehlich 3) a v sušině rostlin. V půdě bylo stanoveno 6,77–56,5 mg S/kg a v rostlinách 872–3000 mg/kg. Regresní analýzou byl vypočten regresní koeficient (R^2) na hodnotu 0,284 a korelační koeficient (r) 0,550, který byl vyhodnocen jako průkazný při hladině významnosti $p < 0,05$.



Graf 5: Regresní vztah množství síry v sušině rostlin se sírou v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=60$)

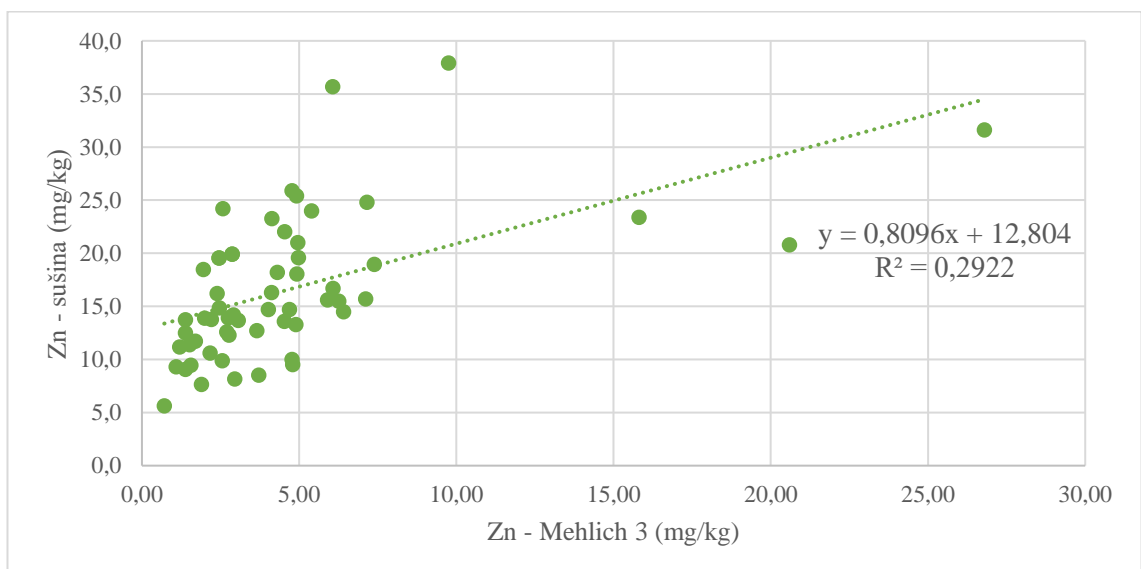
Regresní analýza vztahu obsahu mědi v půdě (metoda Mehlich 3) a v sušině pšenice ozimé je znázorněna v grafu 6. Z něho vyplývá, že regresní koeficient má hodnotu 0,146.

Korelační analýza tohoto vztahu vykazuje hodnotu $r = 0,431$ a je průkazná při hladině významnosti $p < 0,05$. Obsah Cu v půdě se pohyboval v rozmezí 1,07–19,8 mg/kg a v rostlinách 1,09–5,38 mg Cu/kg.



Graf 6: Regresní vztah množství mědi v sušině rostlin s mědí v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=60$)

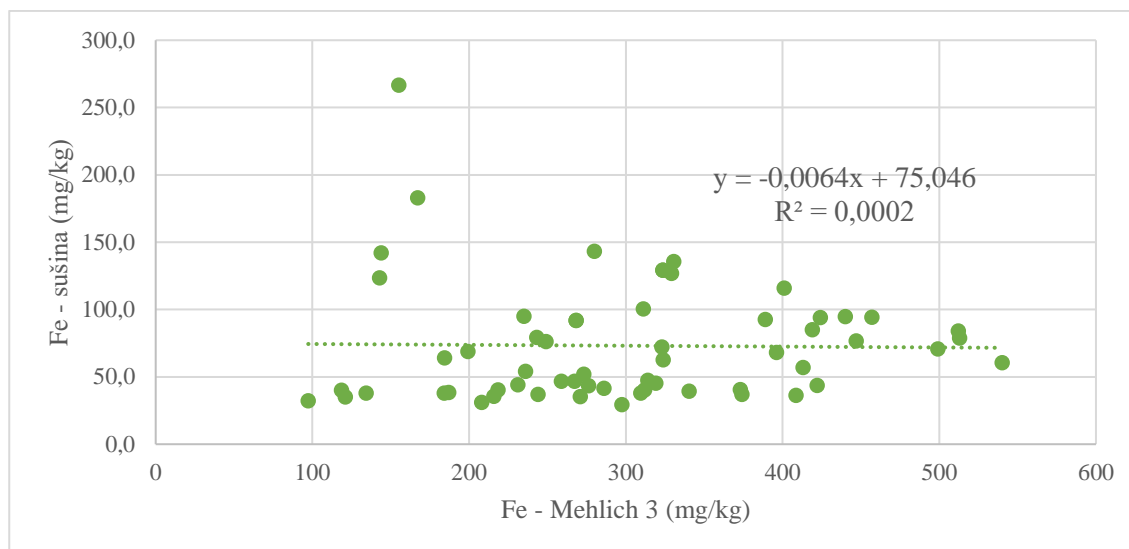
Z grafu 7 je patrné, že obsah zinku v půdě byl v rozsahu 0,71–26,8 mg/kg a obsah v sušině nadzemní hmoty 5,62–37,9 mg/kg. Regresní koeficient (R^2) byl vypočten na 0,292. Korelační koeficient ($r = 0,617$) byl při hladině významnosti $p < 0,05$ průkazný.



Graf 7: Regresní vztah množství zinku v sušině rostlin se zinkem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=60$)

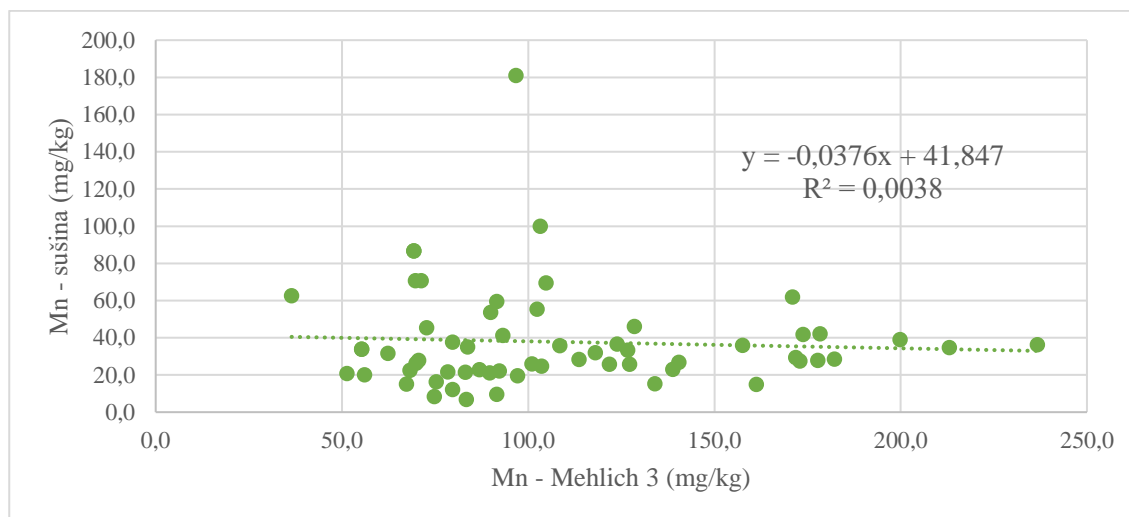
Potenciálně přístupný obsah železa v půdě stanovený metodou Mehlich 3 byl v rozsahu 97,3–540 mg/kg (Graf 8). Sušina rostlin vykazovala obsah Fe od 0,29 do 337 mg/kg. Regresní

analýza vztahu těchto obsahů byla charakterizována koeficientem $R^2 = 0,0002$. Korelační analýza nebyla průkazná a $r = 0,229$.



Graf 8: Regresní vztah množství železa v sušině rostlin se železem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=60$)

Potenciálně přístupné množství manganu na nekarbonátových půdách stanovené metodou Mehlich 3 se pohybovalo v rozpětí 36,6–237 mg/kg. V rostlinách stanovený obsah této živiny byl v širokém rozmezí 6,86–181 mg/kg, což je patrné z grafu 9. Dále je z něj patrný regresní koeficient, který má hodnotu 0,004. Korelační analýza byla vyhodnocena jako neprůkazná s hodnotou $r = -0,081$.



Graf 9: Regresní vztah množství manganu v sušině rostlin s manganem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=60$)

5.1.2 Regresní a korelační analýza obsahu makro- a mikroprvků v nadzemní hmotě a ve vodném výluhu

V tabulce 6 jsou uvedeny parametry lineární regresní analýzy obsahu živin v sušině nadzemní hmoty pšenice a ve vodném výluhu půdy. Tento vztah je vyjádřen i korelační analýzou. Z tabulky je patrné, že pouze v případě fosforu jsou výsledky průkazné jak u analýz metodou Mehlich 3, tak vodným výluhem. Další živinou, která v případě vodného výluhu vykazuje průkazný vztah mezi obsahem živin v rostlinách a v půdě je mangan. Vztahy ostatních živin byly korelační analýzou vyhodnoceny jako neprůkazné, jejich korelační koeficienty (r) jsou uvedeny níže. Hladina významnosti byla stanovena na $p < 0,05$.

Tab. 6: Lineární regresní analýza a korelační analýza obsahu živin v nadzemní hmotě a vodnému výluhu (n=60)

	a	b	R ²	r
P	23,507	1824,9	0,062	0,262
K	8,5488	17534	0,007	-0,047
Ca	-1,0908	2945,6	0,006	-0,120
Mg	-3,9246	1156,8	0,064	-0,246
S	26,797	1166	0,211	0,252
Cu	-0,2048	2,7934	0,0007	-0,058
Zn	-0,3512	16,833	0,0002	-0,013
Fe	-0,1243	80,935	0,037	-0,145
Mn	14,616	20,591	0,539	0,505

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

5.1.3 Regresní a korelační analýza vztahu metody Mehlich 3 a vodného výluhu

Parametry lineární regresní analýzy vztahu mezi obsahy sledovaných živin stanovených metodou Mehlich 3 a vodným výluhem jsou uvedeny v tabulce 7. Dále jsou uvedeny regresní (R²) a korelační (r) koeficienty. Z tabulky je patrné, že všechny makroprvky, tedy P, K, Ca, Mg a S, průkazně korelují při hladině významnosti $p < 0,05$. Nejlepších výsledků dosáhl fosfor a síra. Sledované mikroprvky tyto korelace nevykazují, žádný z vztahů nebyl vyhodnocen jako statisticky průkazný.

Tab. 7: Lineární regresní analýza a korelační analýza obsahu makro- a mikroprvků stanovených metodou Mehlich 3 a vodným výluhem (n=60)

	a	b	R ²	r
P	0,064	2,7204	0,519	0,700
K	0,1918	6,9202	0,494	0,689
Ca	0,0228	45,892	0,360	0,654
Mg	0,034	21,466	0,036	0,381
S	0,7093	1,8588	0,783	0,699
Cu	0,0056	0,1135	0,019	0,173
Zn	-0,0095	0,2567	0,021	0,071
Fe	-0,1272	100,77	0,042	-0,244
Mn	-0,006	1,828	0,038	-0,216

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

5.2 Karbonátové půdy

V tabulce 8 jsou uvedeny popisné charakteristiky stanovené Mehlich 3 u 73 vzorků karbonátových půd. Jak bylo uvedeno výše, hranice mezi karbonátovými a nekarbonátovými půdami byla stanovena na pH = 7,00. Maximální hodnota pH činila 8,30, průměrné pH souboru bylo 7,53, medián měl nepatrně nižší hodnotu a to pH 7,50. Stejně jako případě nekarbonátových půd se jednalo o rozmanitá stanoviště z hlediska zásobenosti potenciálně přístupných živin, protože rozdíly mezi minimy a maximy jsou vysoké. Z toho důvodu lze považovat soubor za vhodný k analýze.

Tab. 8: Popisné charakteristiky hodnoty pH a výsledků analýz metodou Mehlich 3 (n=73)

	pH	P	K	Ca	Mg	S
	0,01M CaCl₂	mg/kg				
Průměr	7,53	87,8	449	10330	283	28,9
Medián	7,50	64,4	368	8880	271	24,0
Minimum	7,00	1,00	99,8	2090	44,9	7,54
Maximum	8,30	345	2430	38600	844	120

	Cu	Zn	Fe	Mn
	mg/kg			
Průměr	4,86	5,62	186	136
Medián	3,50	4,37	155	121
Minimum	0,57	1,47	50,0	36,2
Maximum	24,2	22,9	389	289

V tabulce 9 jsou stejné popisné charakteristiky přístupných makro- a mikroprvků stanovených v tomto případě vodným výluhem. Stanovené obsahy jsou oproti metodě Mehlich 3 několikanásobně menší. Výjimku tvoří opět pouze síra, kde jsou si naměřené hodnoty v obou extrakčních činidlech blízké.

Tab 9: Popisné charakteristiky výsledků analýz vodným výluhem (n=73)

	P	K	Ca	Mg	S
	mg/kg				
Průměr	5,70	75,7	262	28,6	18,8
Medián	4,06	51,2	251	22,6	12,8
Minimum	0,35	9,8	88,9	2,90	4,23
Maximum	38,5	600	625	109	122

	Cu	Zn	Fe	Mn
	mg/kg			
Průměr	0,15	0,11	31,8	0,32
Medián	0,13	0,06	14,6	0,15
Minimum	0,00	0,00	0,38	0,00
Maximum	0,72	1,18	328	4,65

Popisné charakteristiky obsahu živin v sušině rostlin pšenice ozimé jsou uvedeny v tabulce 10. Při porovnání naměřených hodnot s optimálním množstvím uváděným v literatuře docházíme k názoru, že sledované rostliny trpěly nedostatkem hořčíku a zinku. V případě ostatních živin v průměru byly rostliny dostatečně zásobeny.

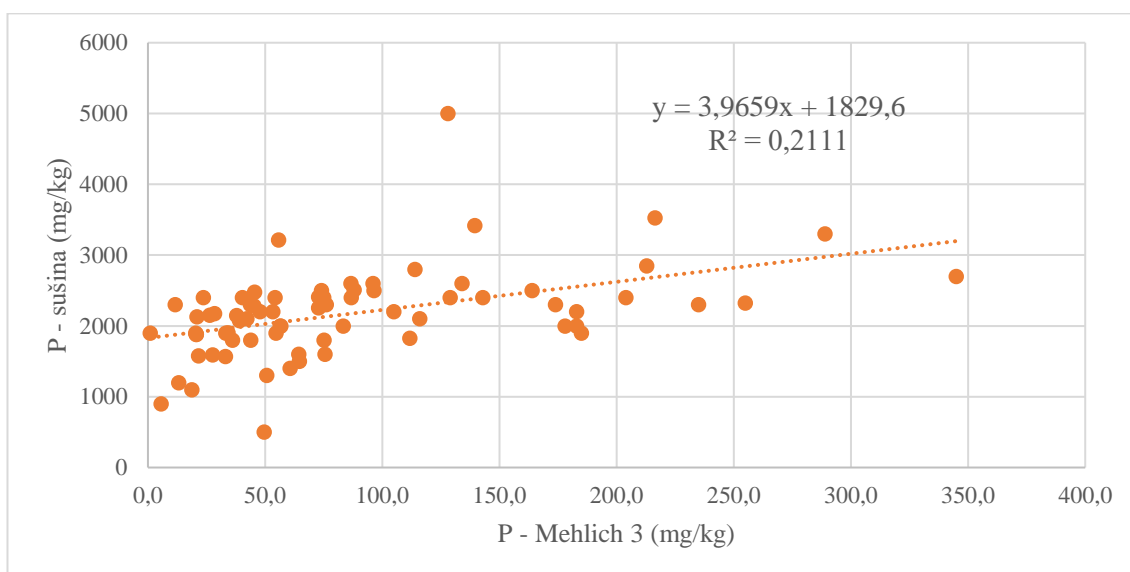
Tab. 10: Popisné charakteristiky celkového obsahu makro- a mikroprvků v nadzemní hmotě pšenice ozimé (n=73)

	P	K	Ca	Mg	S
	mg/kg				
Průměr	2178	20479	3239	1148	1655
Medián	2200	19100	3000	1100	1617
Minimum	500	12000	1459	647	615
Maximum	5000	41100	15200	1900	5150

	Cu	Zn	Fe	Mn
	mg/kg			
Průměr	3,33	17,6	64,0	29,3
Medián	3,50	16,9	57,7	24,0
Minimum	0,57	7,85	16,5	7,69
Maximum	9,68	30,6	157	81,9

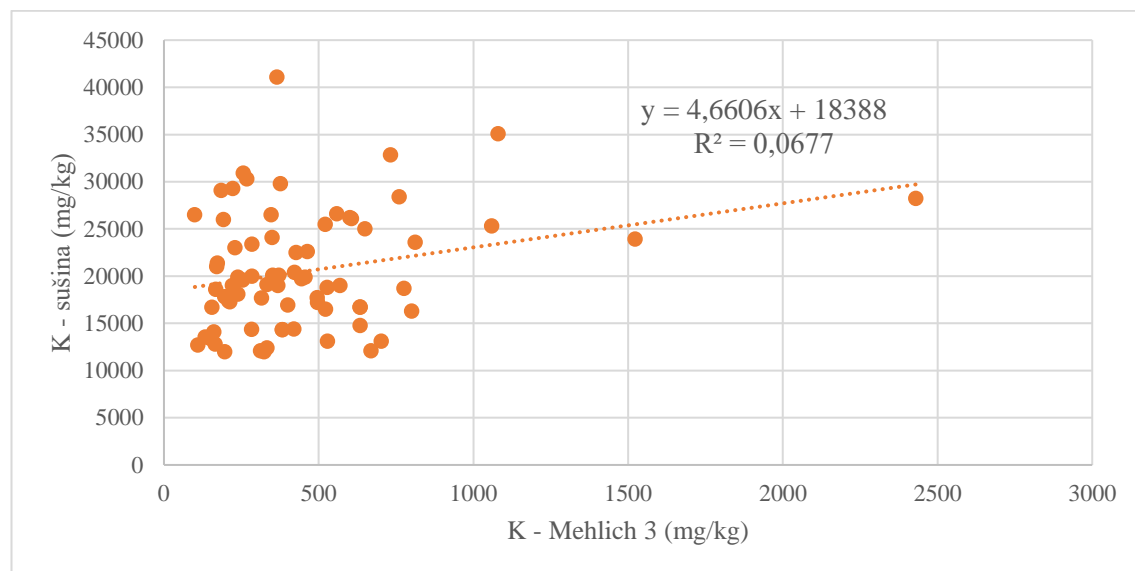
5.2.1 Regresní analýza obsahu živin v nadzemní hmotě a v Mehlich 3

Potenciálně přístupný obsah fosforu v půdě se pohyboval od 1 do 345 mg/kg (graf 10), v nadzemní hmotě pšenice ozimé bylo množství od 500 do 5000 mg/kg. Regresní analýza vztahu těchto obsahů vykazovala regresní koeficient (R^2) 0,211, korelační analýza byla vyhodnocena jako průkazná při $r = 0,551$.



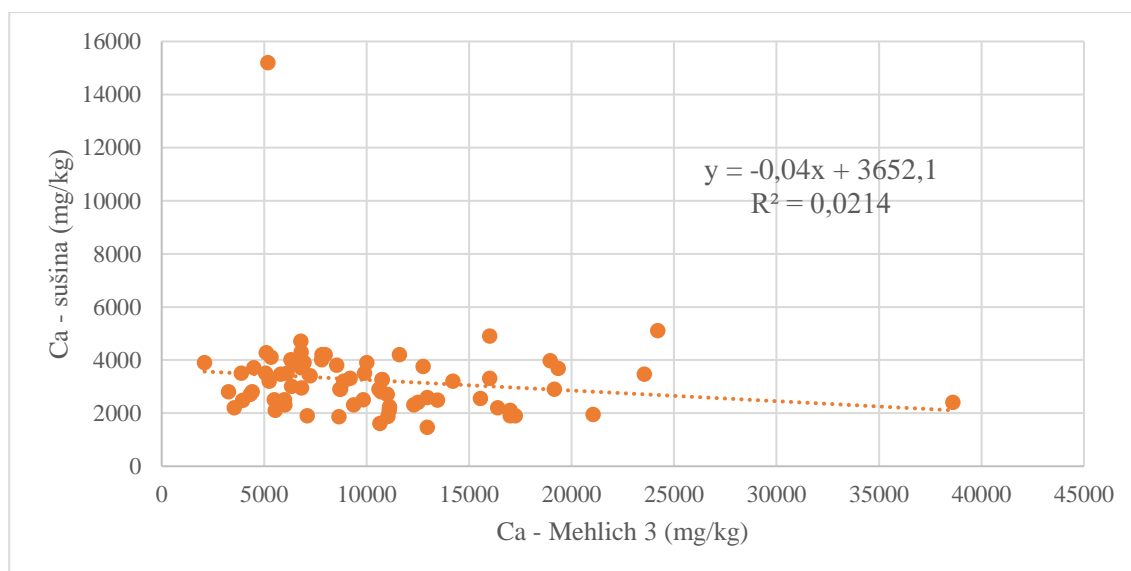
Graf 10: Regresní vztah množství fosforu v sušině rostlin s fosforem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 (n=73)

Graf 11 ukazuje, že obsah draslíku v půdě byl mezi 99,8 a 2430 mg/kg, v sušině rostlin od 12000 do 41100 mg/kg. Regresní koeficient nabył hodnoty 0,068. Korelační analýza nebyla průkazná při hladině významnosti $p < 0,05$, kdy korelační koeficient dosáhl pouze hodnoty 0,193.



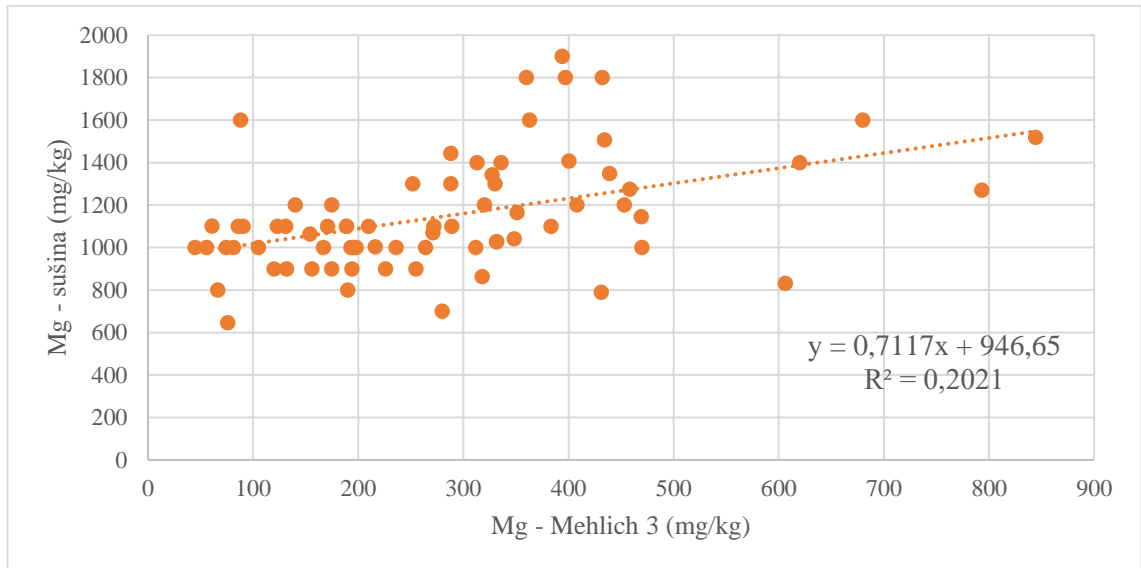
Graf 11: Regresní vztah množství draslíku v sušině rostlin s draslíkem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=73$)

V grafu 12 můžeme vidět, že naměřené množství potenciálně přístupného vápníku v půdě bylo v rozmezí 2090–38600 mg/kg. Obsah v rostlinách byl mezi 1459–15200 mg/kg. Regresní koeficient dosáhl hodnoty 0,021, korelační analýzou byl vztah zjištěn jako neprůkazný, což dokládá i korelační koeficient $r = -0,226$.



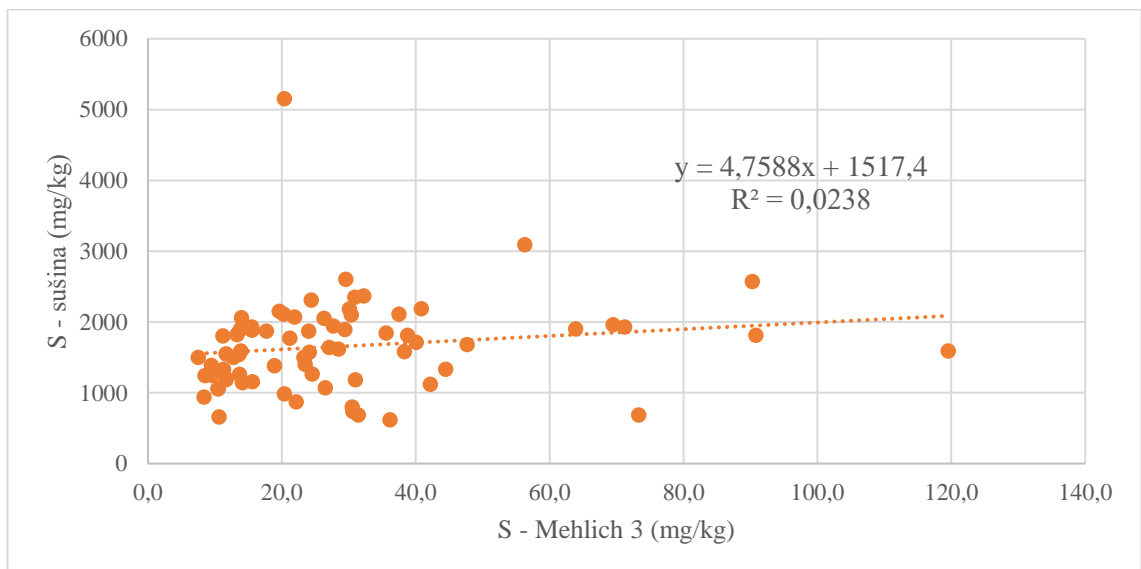
Graf 12: Regresní vztah množství vápníku v sušině rostlin s vápníkem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=73$)

Regresní analýza z grafu 13 srovnávající obsah hořčíku v půdě stanovený metodou Mehlich 3 (44,9–844 mg/kg) s obsahem Mg v sušině rostlin (647–1900 mg/kg) vykazala hodnotu $R^2 = 0,202$. Následná korelační analýza tohoto vztahu potvrdila jeho průkaznost při $p < 0,05$. Korelační koeficient měl hodnotu 0,479.



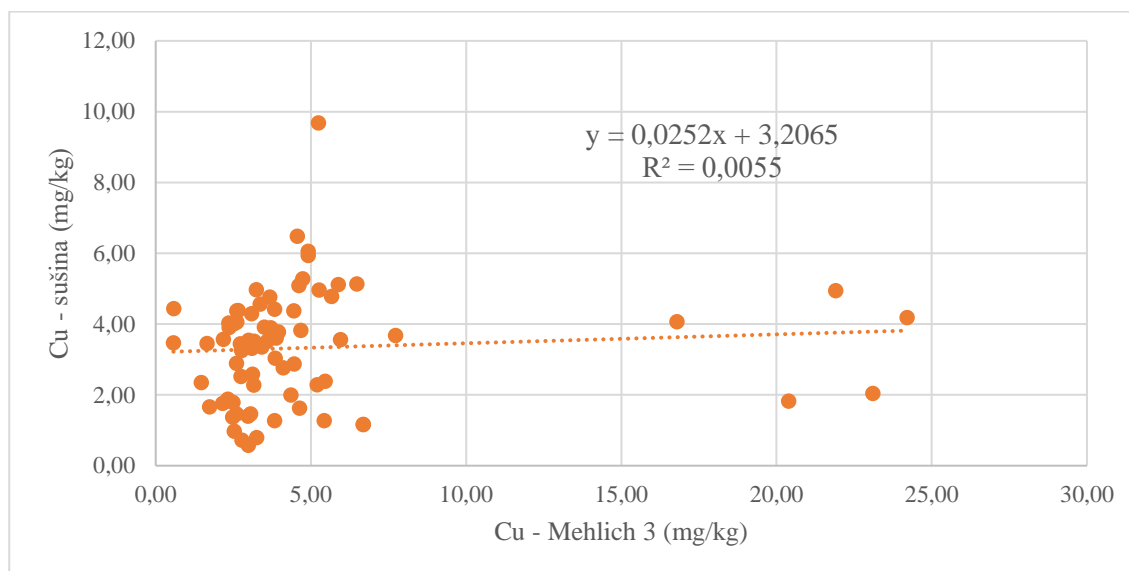
Graf 13: Regresní vztah množství hořčíku v sušině rostlin s hořčíkem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=73$)

Množství potenciálně přístupné síry v půdě stanovené metodou Mehlich 3 bylo v rozmezí 7,54–120 mg/kg. Síra změřená v rostlině se pohybovala od 615 do 5150 mg/kg (graf 14). Regresní koeficient vycházející z lineárního vztahu mezi sírou v půdě a v rostlině měl hodnotu 0,024. Korelační koeficient byl vyhodnocen jako průkazný s hodnotou $r = 0,290$.



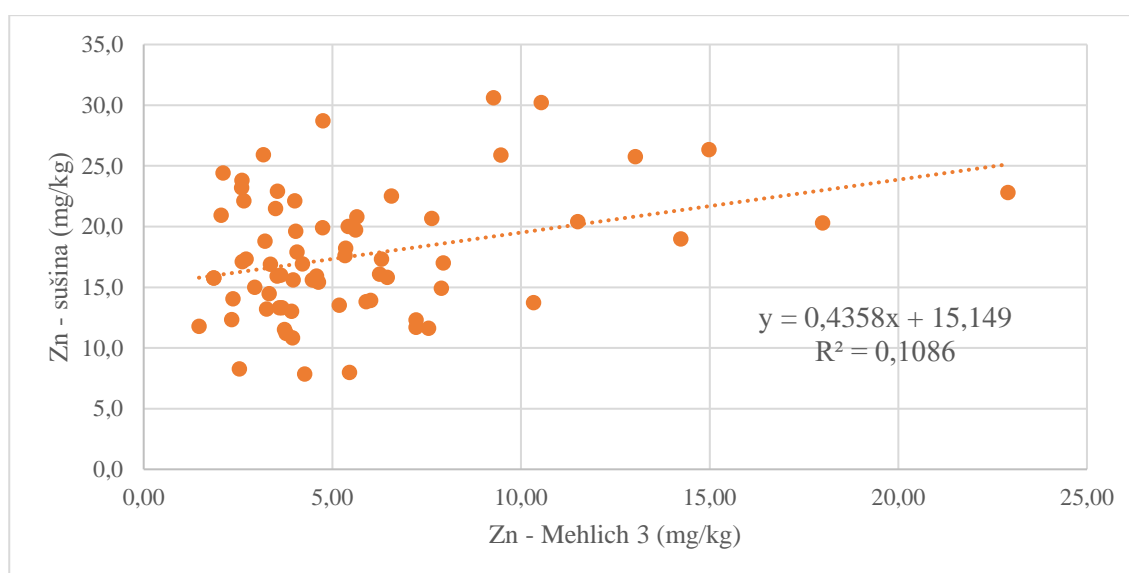
Graf 14: Regresní vztah množství síry v sušině rostlin se sírou v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=73$)

Obsah mědi v půdě se pohyboval v rozmezí 0,57–24,2 mg/kg a v rostlinách 0,57–9,68 mg Cu/kg. Regresní analýza obsahu mědi v půdě (metoda Mehlich 3) a v sušině rostlin je znázorněna v grafu 15, z něhož vyplývá, že regresní koeficient má hodnotu 0,006. Korelační analýza tohoto vztahu vykazuje hodnotu $r = 0,251$ a je průkazná.



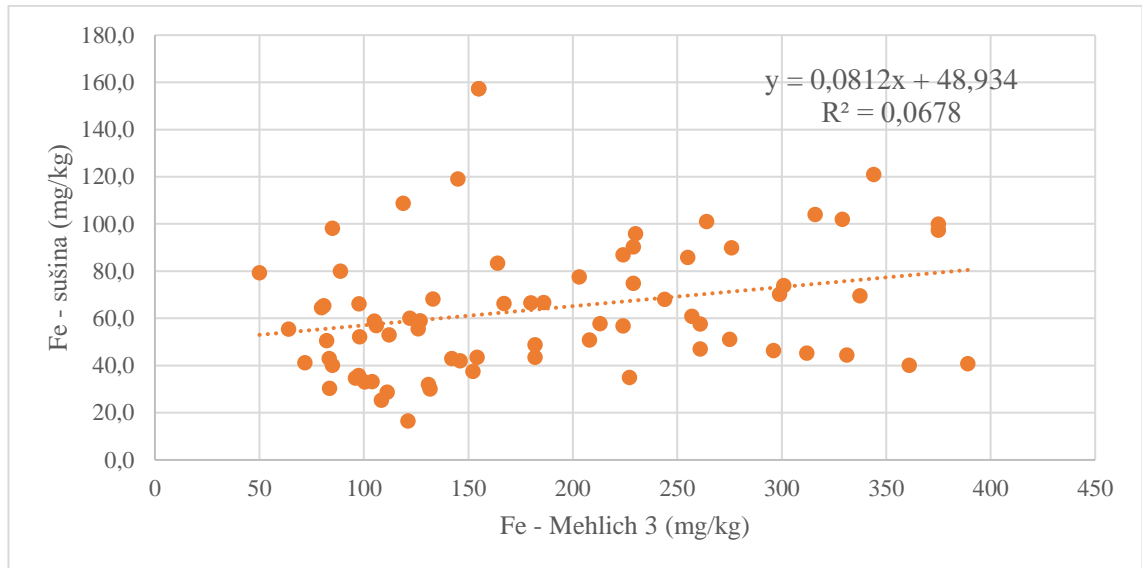
Graf 15: Regresní vztah množství mědi v sušině rostlin s mědí v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=73$)

Regresní analýza stanoveného zinku v sušině rostlin a v půdě metodou Mehlich 3 vykazuje koeficient (R^2) 0,109. Obsahy Zn v půdě dosahovaly hodnot 1,47–22,9 mg/kg (Graf 16), obsahy Zn v sušině se pohybovaly v rozmezí 7,85–30,6 mg/kg. Korelační analýza určila $r = 0,195$, nebyla tedy vyhodnocena jako průkazná.



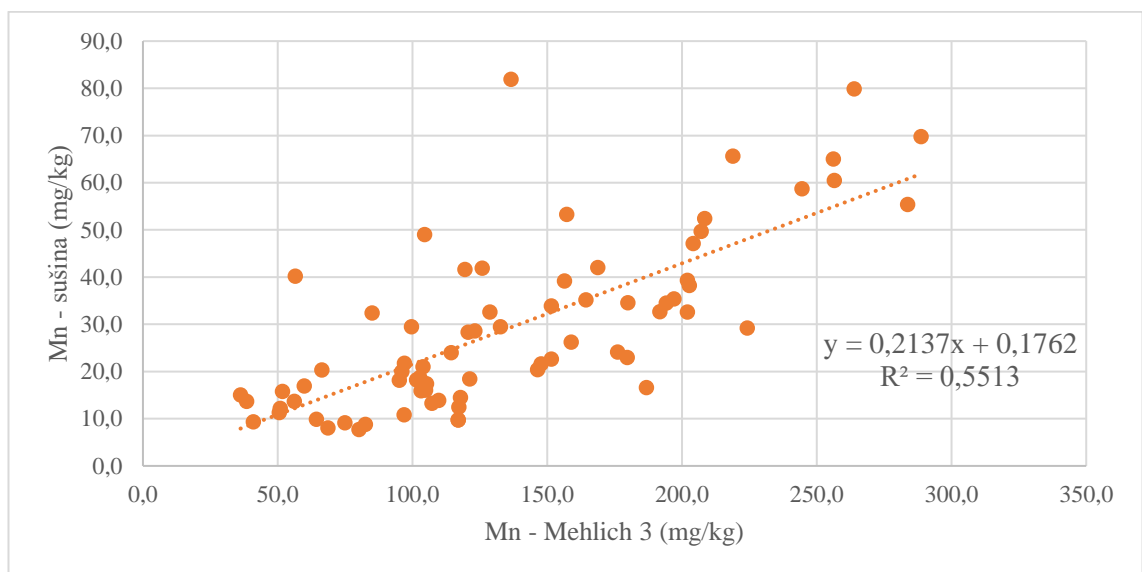
Graf 16: Regresní vztah množství zinku v sušině rostlin se zinkem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=73$)

Z grafu 17 je patrné, že obsah železa v půdě byl v rozmezí 50–389 mg/kg a v sušince nadzemní hmoty pšenice ozimé 16,5–157 mg/kg. Dále je patrné, že provedená regresní analýza vykázala $R^2 = 0,068$. Korelační analýza byla vyhodnocena jako průkazná, kdy korelační koeficient měl hodnotu $r = 0,329$ při hladině významnosti $p < 0,05$.



Graf 17: Regresní vztah množství železa v sušince rostlin se železem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=73$)

Nejsilnější závislost vykazoval vztah manganu obsahu v půdě stanovený metodou Mehlich 3 a obsahu v rostlinách (Graf 18). Obsah Mn v půdě vykázal hodnoty 36,2–289 mg/kg, v rostlinách byl obsah této mikroživiny 7,69–81,9 mg/kg. V regresní analýze byla získána hodnota $R^2 = 0,551$. Ta byla potvrzena následnou korelační analýzou s hodnotou $r = 0,755$, která byla vyhodnocena jako statisticky průkazná.



Graf 18: Regresní vztah množství manganu v sušince rostlin s manganem v půdě stanoveným metodou Mehlich 3 ($n=73$)

5.2.2 Regresní a korelační analýza obsahu makro- a mikroprvků v nadzemní hmotě a ve vodném výluhu

V tabulce 11 jsou uvedeny parametry provedené lineární regresní analýzy obsahu živin v sušině nadzemní hmoty pšenice a ve vodném výluhu půdy. Následně data byla podrobena korelační analýze, jejíž výsledné korelační koeficienty jsou taktéž uvedeny. Z tabulky jsou patrné 3 živiny, které mají průkazný vztah, a to fosfor, hořčík a síra. Vztahy těchto prvků byly hodnoceny jako průkazné i pro obsah živin v Mehlich 3 a v sušině rostlin. Vztahy u ostatních živin byly korelační analýzou při hladině významnosti $p < 0,05$ vyhodnoceny jako neprůkazné.

Tab. 11: *Lineární regresní analýza a korelační analýza obsahu živin v nadzemní hmotě a vodnému výluhu (n=73)*

	a	b	R²	r
P	44,249	1925,6	0,183	0,463
K	22,706	18761	0,092	0,196
Ca	-2,0991	3788,3	0,011	-0,089
Mg	3,1429	1058	0,059	0,336
S	4,5403	1569,3	0,016	0,273
Cu	0,1213	3,311	0,00008	0,097
Zn	10,72	16,214	0,155	0,161
Fe	-0,0892	66,848	0,027	0,020
Mn	5,30720	27,017	0,034	-0,065

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

5.2.3 Regresní a korelační analýza metody Mehlich 3 a vodného výluhu

Parametry lineární regresní analýzy vztahu mezi obsahy sledovaných živin stanovených metodou Mehlich 3 a vodným výluhem jsou uvedeny v tabulce 12. Dále jsou uvedeny regresní (R^2) a korelační (r) koeficienty. Z tabulky je patrné, že všechny makroprvky, tedy P, K, Ca, Mg a S, průkazně korelují při hladině významnosti $p < 0,05$. Nejtěsnějších korelací dosáhl fosfor, draslík, hořčík a síra. Průkazný vztah byl u mikroprvků zjištěn pouze v případě zinku. Cu, Fe a Mn nevykazovaly průkazné korelace.

Tab. 12: *Lineární regresní analýza a korelační analýza obsahu makro- a mikroprvků stanovených metodou Mehlich 3 a vodným výluhem (n=73)*

	a	b	R²	r
P	-0,0663	-0,1168	0,630	0,829
K	0,2068	-17,102	0,749	0,796
Ca	0,0073	186,01	0,279	0,688
Mg	0,0847	4,6075	0,477	0,750
S	0,599	1,5428	0,496	0,772
Cu	0,0151	0,0726	0,367	0,225
Zn	0,0129	0,0369	0,076	0,306
Fe	-0,0397	39,224	0,005	0,117
Mn	-0,00002	0,3183	0,000003	-0,165

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

6 Diskuze

Cílem mé diplomové práce bylo vyhodnotit účinnost extrakční metody Mehlich 3 pro stanovení přístupných makroprvků (P, K, Ca, Mg, S) a mikroprvků (Cu, Zn, Fe, Mn) pro pšenici ozimou. To je ověřováno především pomocí srovnání množství uvedených živin v nadzemní hmotě pšenice ozimé a obsahu těchto elementů, který byl naměřen metodou Mehlich 3. Pro porovnání jsou provedeny analýzy půdních vzorků i slabším extrakčním činidlem – vodným výluhem, který stanovuje pohotově přístupné živiny. I tyto výsledky jsou srovnávány s nadzemní hmotou rostlin. Tyto vztahy jsou porovnávány pomocí regresní a korelační analýzy. Obě extrakční činidla jsou také stejnými analýzami porovnávána i vzájemně.

Korelační analýza vodného výluhu a metody Mehlich 3 v případě makroprvků vykazuje těsné vztahy, které jsou jak na nekarbonátových, tak na karbonátových půdách, průkazné při hladině významnosti 0,05. Na nekarbonátových půdách podle hodnoty korelačního koeficientu (r) lze seřadit sestupně živiny takto: $P > S > K > Ca > Mg$ (tabulka 7). Na půdách karbonátových, tedy s $pH \geq 7,00$ sestupné pořadí dle r je následovné: $P > K > S > Mg > Ca$. Na alkaličtějších půdách byly vztahy těsnější, to může být způsobeno snížením účinnosti kyselého extrakčního činidla Mehlich 3. Nejtěsnějších korelací dosahoval fosfor ($r = 0,700$; $r = 0,829$). Sims et al. (2002) porovnávali obsah fosforu v ornici stanovený metodou Mehlich 3 a vodným výluhem. Analýzy vykázaly hodnotu regresního koeficientu $R^2 = 0,530$. V případě mých vzorků se jednalo o hodnoty $R^2 = 0,519$ (nekarbonátové) respektive $R^2 = 0,630$ (karbonátové). Sims et al. (2002) ve svých odběrech preferovali půdy s kyselejším pH, proto se hodnota jejich R^2 blížila více mnou zjištěné hodnotě na nekarbonátových půdách. Bhatta et al. (2021) analyzoval půdy v Alabamě, přičemž porovnával metodu Mehlich 3 a vodný výluh pro stanovení fosforu. Jeho korelační analýzy vykazovaly korelační koeficient pro nekarbonátové půdy $r = 0,68$; $0,67$; $0,69$, což odpovídá mému korelačnímu koeficientu $r = 0,700$.

V případě mikroprvků toto neplatí. Tam korelační analýza nebyla veskrze průkazná. To lze vysvětlit kyselou povahou extraktantu Mehlich 3. V kyselém prostředí se uvolňují kationty. Pouze v případě zinku na karbonátových půdách byla analýza průkazná, kdy $r = 0,306$.

Rodriguez-Suarez et al. (2007) hodnotili jak specializované, tak univerzální extrakční metody. Mezi nimi i Mehlich 3. Jimi provedené analýzy kyselých půd ($pH(KCl) \leq 5$) ukázaly následné množství živin: P: 0,1–99,1; K: 32,4–565; Ca: 33–2366; Mg: 0,5–852; Cu: 0,14–221,8; Zn: 0,51–53,8; Fe: 50–650 mg/kg. Množství mikroprvků odpovídá množství zjištěnému v této práci, výjimkou je měď, jejíž maximum je výrazně nad námi stanoveným maximem. To může být způsobeno používáním meďnatých fungicidů. Obsahy makroprvků v této DP byly výrazně vyšší s výjimkou hořčíku, který byl srovnatelný (tabulka 3). To může být způsobeno přírodními podmínkami či způsobem hnojení a celkovým hospodařením na půdě.

Kulhánek et al. (2018a) se ve své metodice zabývají stanovením přístupné síry pro rostliny metodou Mehlich 3, kterou porovnávají s vodným výluhem. Při korelační analýze obsahu síry v Mehlich 3 a ve vodném výluhu dosáhli statisticky průkazné hodnoty $r = 0,871$ při $p < 0,001$. V mnou provedené korelační analýze měly koeficienty r hodnoty 0,699 na nekarbonátových půdách a 0,772 na karbonátových pro $p < 0,05$. Nižší průkaznost může být způsobena jiným spektrem analyzovaných vzorků v porovnání s Kulhánek et al. (2018a). Jimi provedená regresní analýza metody Mehlich 3 a vodného výluhu vykázala $R^2 = 0,758$, moje výsledky vykazují $R^2 = 0,783$ a $R^2 = 0,496$. V případě nekarbonátových půd se jedná o shodu,

u půd karbonátových může být nižší shoda z důvodu nižší účinnosti metody Mehlich 3 na alkaličtějším půdách.

Dále Kulhánek et al. (2018a) analyzovali obsah síry v nadzemní hmotě pšenice a v Mehlich 3. Korelační analýza vykazuje hodnotu $r = 0,492$, korelační koeficienty zjištěné v této DP $r = 0,252$ a $r = 0,290$. Tento nesoulad může být způsoben jinou růstovou fází, kdy byla pšenice odebrána.

Sedlář et. al (2018) uvádí, že při korelační analýze obsahu fosforu v nadzemní hmotě pšenice ozimé a obsahu fosforu v Mehlich 3 není vztah statisticky průkazný ($r = 0,18$), dále zkoumaný vztah zinku naopak nabyl hodnoty $r = 0,38$ a byl vyhodnocen jako statisticky průkazný. Jednalo se však o nádobový experiment ve skleníku na půdách s $\text{pH} > 7,1$. Odebírané vzorky pro tuto diplomovou práci byly z polních podmínek, kde fosfor vykazoval průkazný vztah, naopak zinek nevykazoval průkazné hodnoty korelačních koeficientů.

Zbírál (2016) analyzoval vztah mezi množstvím mikroprvků stanovených metodou Mehlich 3 a metodou DTPA. Při porovnání s obsahy stanovenými metodou Mehlich 3 je patrné, že množství mědi se poměrně shoduje. Vyšší maximum u Zbírál (2016) mohlo být způsobeno například vyšší dávkou měďnatého fungicidu na analyzovaném stanovišti, jak bylo zmíněno výše. Obsah zinku byl stanoven vyšší v práci Zbírál, což může být způsobeno kontaminací některých půd z důsledku průmyslové činnosti. Veškeré popisné charakteristiky jsou v tabulce 13.

Korzeniowska et al. (2019) porovnávali výsledky metody Mehlich 3 s obsahem mikroprvků v nadzemní hmotě pšenice. Jak je patrné z tabulky 13, jejich získané obsahy mikroprvků v půdě se shodují s daty v této práci. Pouze vyšší obsah železa může být způsoben analýzou kyselějších vzorků, kde je železo přístupnější.

Tab. 13: Porovnání množství mikroprvků stanovených v půdních vzorcích Zbíralem (2016) a Korzeniowskou et al. (2019) s obsahy v této práci (mg/kg)

	Cu	Zn	Fe	Mn	Cu	Zn	Fe	Mn	Cu	Zn	Fe	Mn
	Nekarbonátové DP				Karbonátové DP				Zbírál (2016)			
Průměr	3,77	4,61	299	108	3,33	17,6	64,0	29,3	3,55	6,73	372	126
Medián	2,90	3,69	292	94,9	3,50	16,9	57,7	24,0	2,80	5,17	378	117
Minimum	1,07	0,71	97,3	36,5	0,57	7,85	16,5	7,69	0,50	1,50	73,3	13,7
Maximum	19,8	26,8	540	237	9,68	30,6	157	81,9	30,0	147	1882	384

	Cu	Zn	Fe	Mn	
	Korzeniowska et al. (2019)				
Medián		2,20	7,60	339	87,2
Minimum		0,05	0,70	36,0	7,10
Maximum		12,6	45	934	270

Korzeniowska et al. (2019) dále ve své práci uvádějí naměřené množství mikroelementů v sušině nadzemní hmoty pšenice ozimé. Obsahy těchto prvků se veskrze shodují (tabulka 14), výjimkou je vyšší maximum zinku v rostlinách, což může být způsobeno růstem na půdách zatížených průmyslovou činností, a tedy s vyšším obsahem přístupného zinku. Taktéž

maximální hodnota železa je vyšší, což odpovídá i vyššímu množství Fe zjištěného v půdě (tabulka 13).

Tab. 14: Porovnání obsahu mikroprvků v nadzemní hmotě pšenice ozimé (mg/kg) získaných v této DP s obsahem uvedeným Korzeniowska et al. (2019)

	Cu	Zn	Fe	Mn	Cu	Zn	Fe	Mn	Cu	Zn	Fe	Mn
	Nekarbonátové				Karbonátové				Korzeniowska et al. (2019)			
Medián	2,65	15,2	61,8	30,5	3,50	16,9	57,7	24,0	5,3	27,1	122	42,6
Minimum	1,09	5,62	29,6	6,86	0,57	7,85	16,5	7,69	0,60	3,00	12,5	3,75
Maximum	5,38	37,9	267	181	9,68	30,6	157	81,9	33,2	117	699	171

Vona et al. (2020) porovnávali metody Mehlich 3, KCl a CoHex pro stanovování obsahu Ca a Mg v maďarských půdách. Hodnota pH půdy byla v rozmezí 3,4–8,1 a obsah Ca: 50–38441 mg/kg, průměrná hodnota byla 6382 mg/kg. Ve výsledcích této DP je průměr (celého souboru nerozděleného dle pH) Ca: 6884 mg/kg a rozpětí 752–38600 mg/kg a hodnota pH je v rozmezí 4,7–8,3. Nejvýraznější rozdíl je v minimální hodnotě, to lze vysvětlit různou charakteristikou odebraných půd. Půdy s nižším pH byly současně chudé na vápník.

Stanovené obsahy hořčíku v Mehlich 3 v publikaci Vona et al. (2020) byly v rozmezí 11–1295 mg/kg, průměr: 395 a medián: 355 mg/kg. Hodnoty v této DP jsou 44,9–844 mg/kg s průměrem 237 a mediánem 194 mg/kg. Vyšší hodnoty u Vona et al. (2020) jsou nejspíš způsobeny odběry vzorků přirozeně bohatších na Mg jako jsou rendziny či černozemě.

Sedlář et al. (2020) při výzkumu vztahu síry obsažené v rostlinách se sírou v půdě naměřili v Mehlich 3 hodnoty 4,5–36 mg/kg. To je výrazné méně než v této DP, kde bylo zjištěno 6,77–120 mg/kg S. Ve vodném výluhu Sedlář et al. (2020) uvádějí hodnoty 4–23 mg/kg, v této DP 4,11–122. Příčinou tohoto rozdílu v maximálních hodnotách může být např. čas a hnojení analyzovaných stanovišť sírou.

Korelační analýza obsahu síry v sušině pšenice a v Mehlich 3 na nekarbonátových půdách byla provedena ve studii Sedlář et al. (2020) vykázala průkazný koeficient $r = 0,408$. Při analýze s vodnými výluhem tato byl $r = 0,213$. V této diplomové práci byly zjištěny koeficienty pro Mehlich 3 $r = 0,252$ a pro vodný výluh $r = 0,252$ obě neprůkazné při $p < 0,05$.

Stejně analýzy na půdách karbonátových u Sedlář et al. (2020) vykázaly hodnoty v Mehlich 3 a sušině $r = 0,420$ a vodný výluh a sušina $r = 0,278$. V mé práci bylo zjištěno v M3 a sušině $r = 0,290$ a ve VV a sušině $r = 0,273$ při $p < 0,05$ statisticky průkazné.

Při porovnání vztahu vodného výluhu a metody Mehlich 3 na nekarbonátových půdách v práci Sedlář et al. (2020) jsou uvedeny 3 korelační koeficienty $r = 0,757$; 746; 667. V mé DP byl výsledek tohoto vztahu $r = 0,699$.

Na karbonátových půdách byly u Sedlář et al. (2020) korelační koeficienty $r = 0,637$; 0,550; 0,660, v mé diplomové práci činil $r = 0,772$. Obecně lze shledávat shodu v těchto výsledcích.

Matula (2009) prováděl analýzu půd s pH v rozpětí 4,08–6,94 pro porovnání extrakční účinnosti metod Mehlich 3, vodného výluhu a octanu amonného. Jím zjištěná minima a maxima na kontrolních variantách jsou uvedena v tabulce 15. a porovnána s minimálními a maximálními hodnotami na nekarbonátových půdách z této diplomové práce. Při samotném porovnání lze konstatovat, že hodnoty se sice mírně liší, avšak rozdíly nejsou extrémní.

Tab. 15: Porovnání minimálních a maximálních hodnot živin na nekarbonátových půdách v této DP se zdrojem Matula (2009)

	Mehlich 3				Vodný výluh			
	DP–min	DP–max	M*–min	M–max	DP–min	DP–max	M–min	M–max
P	27,9	445	41,0	368	1,49	30,7	1,19	15,98
K	89,1	692	89,0	1032	13,7	223	8,2	183
Ca	752	6737	942	5463	37,1	229	39,6	201
Mg	78,4	559	73,0	475	6,49	85,1	4,00	64,2
S	6,77	56,5	16,0	61,0	4,11	39,1	8,17	36,9
Mn	36,5	237	39,0	198	0,11	6,80	0,13	1,43

*Matula (2009)

Nadzemní hmota pšenice byla analyzována v růstové fázi kvetení, tedy BBCH 49-59. V ní bylo zjištěno množství makro- a mikroprvků (viz tabulky 5 a 10). byla naměřena tato rozmezí na nekarbonátových (N) a karbonátových (K) půdách (vše v mg/kg) P_N: 829–3400; P_K: 500–5000; K_N: 8500–33920; K_K: 12000–41100; Ca_N: 1500–4717; Ca_K: 1459–15200; Mg_N: 680–1700; Mg_K: 647–1900; S_N: 872–3000; S_K: 615–5150; Cu_N: 1,09–5,38; Cu_K: 0,57–9,68; Zn_N: 5,62–37,9; Zn_K: 7,85–30,6; Fe_N: 29,6–267; Fe_K: 16,5–157; Mn_N: 6,86–181; Mn_K: 7,69–81,9.

Data získaná pro tuto DP porovnávám s běžnými obsahy živin v rostlinách uváděnými v literatuře, které jsou uvedeny i v kapitole 3 Literární rešerše.

Pro fosfor Marschner (2012) uvádí rozmezí 3000–5000 mg/kg, což potvrzuje Vaněk et al. (2016), kteří uvádí užší rozmezí 3000–4000 mg/kg jako optimum. Obsahy P v rostlinách lze tedy zhodnotit v průměrných hodnotách jako nedostatečné. To je způsobeno horší osvojovací schopností pšenice i možným nedostatkem snadněji přístupných forem fosforu v půdě.

V rostlinách ve vegetativních orgánech by měl draslík zaujímat 20000–50000 mg/kg obsahu, jak uvádí Marschner (2012). Mírně nižší běžné hodnoty uvádí Vaněk et al. (2016) – 15000–35000 mg/kg. V obou případech průměrné hodnoty K v rostlinách byly ve vhodném rozmezí. Pouze minimální hodnoty byly nižší než optimum.

Vápník je uváděn ve velmi variabilním množství v rostlinách od 4000 do 15000 mg/kg (Vaněk et al. 2016) či 1000–50000 mg/kg, jednoděložné rostliny jsou specifické nižším obsahem Ca v sušině (Marschner 2012). Můžeme tedy konstatovat, že veškeré analyzované rostliny měly dostatek Ca pro svůj vývoj.

Optimální obsah Mg v nadzemní hmotě je podle Marschner (2012) uváděn v rozpětí 1500–3500 mg/kg. V obilné slámě je dle Vaněk et al. (2016) obsah Mg přibližně 1000 mg/kg. Rozbory pšenice tedy ukazují na to, že celkový obsah hořčíku je velmi hraniční. Může být tedy limitujícím faktorem. Půdy v ČR jsou obvykle chudé na Mg, což způsobuje i nedostatek v rostlinách.

Síra v sušině rostlin je uváděna Marschner (2012) v rozpětí 1000–5000 mg/kg, přičemž obilniny jsou méně náročné. V průměru byly tedy analyzované pšenice dostatečně vyživené.

Mikroprvky jsou obsaženy v podstatně nižším množství v pletivech rostlin. U mědi je běžný obsah nízký, a to 2–20 mg/kg (Vaněk et al. 2016). Toto množství vykazala většina vzorků, v minimech byly rostliny deficitní, což mohlo mít vliv na případný další vývoj porostu.

Obsah zinku v sušině rostlin je uváděn v rozmezí 20-100 mg/kg, kdy pod 20 mg se již mohou projevit příznaky jeho deficitu (Vaněk et al. 2016). Výsledky analýz v této DP

poukazují na značný nedostatek tohoto mikroelementu. Neboť průměrné i střední hodnoty byly pod hranicí 20 mg/kg. V tomto případě by bylo vhodné zaměřit se na přihnojení zinkem.

Obilniny nemají vysoké požadavky na železo. Rawashedeh & Florina (2015) uvádí, že potřebují 50–250 mg/kg v sušině. Tento obsah byl zjištěn jak v průměru, tak ve středních hodnotách na všech půdách. V minimech byly deficitní rostliny na obou zkoumaných variantách, ale na karbonátových byl výraznější. Příčinou může být horší přístupnost Fe na alkalických půdách.

Li et al. (2019) uvádějí nezbytný obsah manganu sušině 20–40 mg/kg a nad 150 mg/kg může být vyvolána toxicita. V tomto rozmezí se pohybovaly průměrné a střední hodnoty, maximum na nekarbonátových půdách (181 mg/kg) mohlo být způsobeno vyšší přístupností Mn v kyselém prostředí. Minimální hodnoty mohly způsobit omezení výnosu, protože byly pod optimální hranicí.

7 Závěr

Prvotním cílem této práce bylo zhodnotit vhodnost metody Mehlich 3 pro stanovení skutečně přístupných makroprvků (P, K, Ca, Mg a S) a mikroprvků (Cu, Zn, Fe a Mn) v půdě pro pšenici ozimou. Tato metoda byla porovnáována s extrakcí půdy vodným výluhem, který je výrazně slabším extraktantem.

Průkazné vztahy mezi obsahy živin v rostlině a v půdě byly následující:

- Nekarbonátové půdy – v případě metody Mehlich 3 potvrzen vztah pro fosfor a zinek, v případě vodného výluhu pro fosfor a mangan.
- Karbonátové půdy – signifikantní vztah byl potvrzen u P, Mg, S, Cu, Fe a Mn pro metodu Mehlich 3, pro vodný výluh se jednalo o živiny P, Mg a S.

Ze statistického vyhodnocení lze usoudit, že metoda Mehlich 3 je vhodnější než vodný výluh, obzvláště na karbonátových půdách dosahuje lepších výsledků. Nelze ji však doporučit pro všechny zkoumané živiny. Nejlepších výsledků dosahuje při stanovování fosforu na všech půdách. Je třeba zmínit, že nadzemní hmota byla pouze v jedné růstové fázi. Je tedy možné, že vzhledem k dynamice odběru živin se mohou výsledky v jiných růstových fázích lišit.

Porovnání metody Mehlich 3 s odlišným extrakčním činidlem (vodný výluh) bylo stanoveno jako druhý cíl práce. Korelační koeficienty poukázaly na skutečnost, že vztahy stanovených obsahů živin jsou signifikantní v případech P, K, Ca, Mg a S na nekarbonátových půdách. Nejtěsnější vztahy byly v případě fosforu a síry. Na karbonátových půdách byly taktéž průkazné vztahy mezi všemi makroprvky, a také v případě zinku. Nejsilněji korelovaly výsledky v případě fosforu a draslíku.

Z výsledků této diplomové práce lze konstatovat, že metoda Mehlich 3 je vhodná pro stanovení přístupného fosforu na všech půdách. V případě ostatních živin má pH půdy vliv na vhodnost tohoto extrakčního činidla. Je však všeobecně vhodnější než vodný výluh, který vykazoval ve většině případů nižší sílu závislosti než metoda Mehlich 3.

8 Literatura

- Abrol YP, Ahmad A, editors. 2003. Sulphur in Plants. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Alejandro S, Höller S, Meier B, Peiter E. 2020. Manganese in Plants: From Acquisition to Subcellular Allocation. *Frontiers in Plant Science* **11**:1–23.
- Alfaro MA, Jarvis SC, Gregory PJ. 2006. Factors affecting potassium leaching in different soils. *Soil Use and Management* **20**:182–189.
- Alloway BJ. 2008. Zinc in soils and crop nutrition. International Zinc Association, Brussels; International Fertilizer Industry Association, Paris.
- 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.
- Balafrej H, Bogusz D, Triqui Z-EA, Guedira A, Bendaou N, Smouni A, Fahr M. 2020. Zinc Hyperaccumulation in Plants: A Review. *Plants* **9**:562.
- 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.
- Bhatta A, Prasad R, Chakraborty D, Shaw JN, Lamba J, Brantley E, Torbert HA. 2021. Mehlich 3 as a generic soil test extractant for environmental phosphorus risk assessment across Alabama soil regions. *Agrosystems, Geosciences & Environment* **4**: 1–15.
- 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.
- Camacho-Cristóbal JJ, Rexach J, González-Fontes A. 2008. Boron in Plants: Deficiency and Toxicity. *Journal of Integrative Plant Biology* **50**:1247–1255.

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 January 2023).

Český statistický úřad. 2023. 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-vyhledavani&vyhltext=osev&bkvt=b3Nldg.&pvo=ZEM02A&z=T&f=TABULKA&katalog=all&evo=v551 ! ZEM02A-2022 1&&str=v443> (accessed March 2023).

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.

Dordas C. 2008. Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **28**:33–46.

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, Baligar VC, Clark RB. 2002. Micronutrients in Crop Production. *Advances in Agronomy* **77**:185-268.

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.

George TS, French AS, Brown LK, Karley AJ, White PJ, Ramsay L, Daniell TJ. 2014. Genotypic variation in the ability of landraces and commercial cereal varieties to avoid manganese deficiency in soils with limited manganese availability: is there a role for root-exuded phytases? *Physiologia Plantarum* **151**:243–256.

- 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.
- Heckman JR, Clarke BB, Murphy JA. 2003. Optimizing manganese fertilization for the suppression of take-all patch disease on creeping bentgrass, *Crop Science* **43**:1395–1398.
- Houba VJG, Novozamsky I, Huybregts AWM, Van Der Lee JJ. 1986. Comparison of soil extractions by 0.01M CaCl₂, by EUF and by some conventional extraction procedures. *Plant and Soil* **96**:433–437.
- Houba VJG, Temminghoff EJM, Gaikhorst GA, van Vark W. 2000. Soil analysis procedures using 0.01 M calcium chloride as extraction reagent. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **31**:1299-1396.
- 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* **41**:63–71.
- Janovská D, Kalinová J, Michalová A. 2008. Metodika pěstování pohanky obecné v ekologickém a konvenčním zemědělství. Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha.
- Jones JB. 1990. Universal soil extractants: Their composition and use. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **21**:1091–1101.
- Jones JB. 1998. Soil test methods: Past, present, and future use of soil extractants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **29**:1543–1552.
- Kabata-Pendias A, Pendias H. 1992. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton.
- Kaiser BN, Gridley KL, Ngaire Brady J, Phillips T, Tyerman SD. 2005. The Role of Molybdenum in Agricultural Plant Production. *Annals of Botany* **96**:745–754.
- 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.
- Kiekens L. 1995. Zinc. Pages 284–305 in Alloway BJ, editor. *Heavy Metals in Soils*. Blackie Academic and Professional, London.
- 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.
- Kobayashi T, Nozoye T, Nishizawa NK. 2019. Iron transport and its regulation in plants. *Free Radical Biology and Medicine* **133**:11–20.
- Korzeniowska J, Stanisławska-Głubiak E, Lipiński W. 2019. Development of the limit values of micronutrient deficiency in soil determined using Mehlich 3 extractant for Polish soil conditions. Part I. Wheat. *Soil Science Annual* **70**:314–323.
- 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, Sedlár O, Zbírál J, Smatanová M, Suran P. 2018a. Stanovení přístupné síry v půdě metodou Mehlich 3. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Kulhánek M, Černý J, Balík J, Sedlár 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.
- Landová H, Fiala K, Látal O, Veselý A, Hulová I. 2017. Fosfor v půdě. Stanovení přijatelných / přístupných forem fosforu – srovnání vybraných metod (Mehlich 3, Egner). *Výzkum v chovu skotu*.
- 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.
- Li J, Jia Y, Dong R, Huang R, Liu P, Li X, Wang Z, Liu G, Chen Z. 2019. Advances in the Mechanisms of Plant Tolerance to Manganese Toxicity. *International Journal of Molecular Sciences* **20**:5096.
- 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.

- 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. 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 January 2023).
- 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.
- Mir AR, Pichtel J, Hayat S. 2021. Copper: uptake, toxicity and tolerance in plants and management of Cu-contaminated soil. *BioMetals* **34**:737–759.
- Mousavi SM, Raiesi T. 2022. Essentiality of boron in higher plants. Pages 1–28 in Aftab T, Landi M, Papadakis IE, Araniti F, Brown PH, editors. *Boron in Plants and Agriculture*. Academic Press, Cambridge.
- 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 January 2023).
- 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 January 2023).
- 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.
- 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.
- Qi Z, Spalding EP. 2004. Protection of Plasma Membrane K⁺ Transport by the Salt Overly Sensitive Na⁺ -H⁺ Antiporter during Salinity Stress. Plant Physiology **136**:2548–2555.
- Rawashdeh HM, Florina S. 2015. Foliar application with iron as a vital factor of wheat crop growth, yield quantity and quality: A Review. International Journal of Agricultural Policy and Research **3**:368-376.
- Reddy KJ, Munn LC, Wang L. 1997. Chemistry and mineralogy of molybdenum in soils. In: Gupta UC, ed. Molybdenum in agriculture. Cambridge: Cambridge University Press.
- 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.
- Rengel Z. 2015. Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. Journal of Soil Science and Plant Nutrition **15**:397–409.
- 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 January 2023).
- 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. 2004. Vápník. Mendelova univerzita v Brně, Brno. Available from: http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/biogenni_prvky/ca.htm (accessed January 2023).
- 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 January 2023).
- Rodriguez-Suarez JA, Arias M, Lopez E, Soto B. 2007. Comparison of Multi-element to Single-Element Extractants for Macro- and Micronutrients in Acid Soils from Spain. Communications in Soil Science and Plant Analysis **39**:231–240.
- 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.

Sedlář O, Balík J, Kulhánek M, Černý J, Kos M. 2018. Mehlich 3 extractant used for the evaluation of wheat-available phosphorus and zinc in calcareous soils. *Plant Soil Environment* **64**:53–57.

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.

Sims JT, Maguire RO, Leytem AB, Gartley KL, Pautler MC. 2002. Evaluation of Mehlich 3 as an Agri-Environmental Soil Phosphorus Test for the Mid-Atlantic United States of America. *Soil Science Society of America Journal* **66**:2016–2032.

StatSoft Inc. 1984–2013 (2023): 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.

The Regents of the University of California. 2022. Effects of soil pH, sodicity, and salinity on soil fertility. University of California, Berkeley. Available from: https://ucanr.edu/sites/Salinity/Salinity_Management/Effect_of_salinity_on_soil_properties/Effect_of_pH_sodicity_and_salinity_on_soil_fertility/ (accessed September 2022).

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.

Tripathi DK, Singh S, Singh S, Mishra S, Chauhan DK, Dubey NK. 2015. Micronutrients and their diverse role in agricultural crops: advances and future prospective. *Acta Physiologiae Plantarum* **37**:139–164.

- 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.
- Van Erp PJ. 2002. The potentials of multi-nutrient soil extraction with 0.01 M CaCl₂ in nutrient management [D.Sc. Thesis]. Wageningen University & Research, Wageningen.
- Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2016. *Výživa a hnojení polních plodin*. Profi Press, Praha.
- Vona V, Centeri C, Giczi Z, Kalocsai R, Biró Z, Jakab G, Milics G, Kovács AJ. 2020. Comparison of magnesium determination methods on Hungarian soils. *Soil and Water Research* **15**:173–180.
- Welch RM, Shuman L. 2011. Micronutrient Nutrition of Plants. *Critical Reviews in Plant Sciences* **14**:49–82.
- White PJ, Broadley MR. 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.
- Wimmer MA, Eichert T. 2013. Review: Mechanisms for boron deficiency-mediated changes in plant water relations. *Plant Science* **203–204**: 25–32.
- Wünscher R, Unterfrauner H, Zehetner F. 2013. A Comparison of Different Phosphorus Extraction Methods with the Phosphorus Uptake of Wheat.
- Yan X, Wu P, Ling H, Xu G, Xu F, Zhang Q. 2006. Plant nutriomics in China: an overview. *Annals of Botany* **98**:473–482.
- Yara. 2023. Wheat nutritional summary. Yara UK Ltd. Available form: <https://www.yara.co.uk/crop-nutrition/wheat/wheat-nutritional-summary/> (accessed March 2023).
- Zbiral J. 2000. Determination of phosphorus in calcareous soils by mehlich 3, mehlich 2, cal, and egner extractants, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **31**:3037–3048.
- Zbiral J. 2016. Determination of plant-available micronutrients by the Mehlich 3 soil extractant – a proposal of critical values. *Plant Soil Environment* **11**:527–531.

Zewide I, Sherefu A. 2021. Review Paper on Effect of Micronutrients for Crop Production. *Journal of Nutrition and Food Processing* **4**:1–8.

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.

Zhang X, Zhang D, Sun W, Wang T. 2019. The Adaptive Mechanism of Plants to Iron Deficiency via Iron Uptake, Transport, and Homeostasis. *International Journal of Molecular Sciences* **20**:2424.

Zörb C, Senbayram M, Peiter E. 2014. Potassium in agriculture – Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology* **171**:656–669