

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Dlouhodobý vliv různých systémů hnojení na změny
obsahů hořčíku v půdě a v zrnu ozimé pšenice**

Diplomová práce

**Bc. Filip Filgas
Kvalita produkce**

doc. Ing. Martin Kulháněk, Ph.D.

© 2022 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci " Výživa pšenice ozimé hořčíkem a následný vliv hořčíku na kvalitu produkce " jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14.04. 2022

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Martinu Kulhánkovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování diplomové práce věnoval.

Dlouhodobý vliv různých systémů hnojení na změny obsahů hořčíku v půdě a v zrnu ozimé pšenice

Souhrn

Tato diplomová práce je uvedena literární rešerší, která pojednává o tématice hořčíku v půdě, výživě rostlin (zejména pšenice ozimé) hořčíkem, hnojivech s hořčíkem, vlivu hořčíku na výživu člověka, biofortifikaci obilovin a potenciální rizika použití čistírenských kalů.

Cílem práce bylo sledování obsahu hořčíku v půdě, odběru Mg zrnem a slámou pšenicí ozimou, obsahu Mg v zrnu a sledování výnosů v dlouhodobých přesných polních pokusech s osevnickým postupem brambory, pšenice ozimá, ječmen jarní.

Výzkum probíhal v letech 1996-2017 a zabýval se různými variantami hnojení (čistírenský kal, hnůj, NPK, nehnojená kontrola) na výše zmíněné parametry. Účinek těchto hnojiv byl sledován na stanovištích Hněvčeves, Humpolec, Červený Újezd a Suchdol. Pro analytická půdní stanovení byla použita metoda vodného výluhu a metoda Mehlich 3. Stanovení obsahů Mg v rostlině bylo realizováno rozkladem na suché cestě.

Výsledky ukázaly, že hnojivo NPK dosahovalo nejvyšších výnosů ze všech variant. Použití tohoto hnojiva však mělo také za následek nejhlubší negativní bilanci hořčíku v půdě. Varianty organických hnojiv měly sice nižší vliv na výnos, ale způsobily pozitivní bilance Mg v půdě. Obsah hořčíku v zrnu byl srovnatelný u všech hnojených i nehnojených variant.

Záporná bilance hořčíku u varianty NPK ukazuje, že i přes její výborné výnosy může mít dlouhodobé používání fatální vliv na budoucí půdní vlastnosti. Jako výhodnější se tak jeví využívání organických hnojiv, která mají komplexní účinnost a zároveň zajišťují dobré výnosy.

Obsah hořčíku v zrnu se při užití různých variant hnojení do půdy při tomto pokusu mimořádně nezměnil. Při biofortifikaci je tak možné u agronomické varianty uvažovat spíše o foliárním přihnojování hořčíkem nebo zvolit genovou biofortifikaci.

Klíčová slova: Hnojení, Pšenice ozimá, Půda, Biofortifikace

Long term influence of different fertilizing systems on the content of magnesium in soil and winter wheat grain

Summary

This diploma thesis is presented with a review, which deals with the topics of magnesium in soil, plant nutrition (especially winter wheat) with magnesium, magnesium fertilizers, magnesium influence on human nutrition, biofortification of cereals and potential risks of using sewage sludge.

The aim of this thesis was to monitor the magnesium content in soil, Mg uptake by grain and straw, Mg content in grain and to monitor winter wheat yields in precise long-term field experiments with potatoes, winter wheat, spring barley crop rotation.

The research was conducted in 1996-2017 and deals with various fertilization variants (sewage sludge, manure, NPK, non-fertilizer control) on the parameters mentioned above. The effect of these fertilizers was monitored at experimental stations in Hněvčeves, Humpolec, Červený Újezd and Suchdol. Methods used for analytical soil determinations were water and Mehlich 3 extraction. Determination of total Mg content in plant materials was carried out with dry ashing procedure.

The results showed that the NPK fertiliser achieved the highest yields of all variants. However, the use of this fertiliser also resulted in a deepest negative balance of magnesium in the soil. The organic fertilisers had a lower effect on yield but caused positive Mg balance. The content of magnesium in the grain was comparable for all fertilised and non-fertilised variants.

The negative balance of magnesium in soil indicates that the NPK variant might have fatal effect on future soil properties despite its excellent yields. The more long-term advantageous approach seems to be usage of organic fertilisers which are representing more sustainable effect and at the same time achieve good yields. The content of magnesium in the grain did not change much when using different fertilisation variants in this experiment. As for agronomical biofortification method the choice of foliar fertilisation or a different gene biofortification method might be more beneficial.

Keywords: Magnesium, Fertilizer, Winter wheat, Soil, Biofortification

Obsah

1 Úvod.....	8
2 Hypotézy	9
3 Cíle	10
4 Literární rešerše.....	11
4.1 Hořčík v půdě.....	11
4.1.1 Pevná fáze.....	11
4.1.2 Kapalná fáze.....	12
4.1.3 Plynná fáze.....	13
4.2 Hořčík v rostlině.....	13
4.3 Nedostatek hořčíku.....	14
4.3.1 Chloróza	15
4.3.2 Abiotický stres.....	15
4.4 Nadbytek hořčíku	17
4.5 Hnojiva obsahující hořčík	17
4.5.1 Pomalu rozpustná hnojiva	18
4.5.2 Rychle rozpustná hnojiva.....	18
4.5.3 Organická hnojiva	19
4.5.4 Kombinovaná hnojiva	19
4.5.5 Čistírenské kaly	19
4.6 Hnojení pšenice ozimé	20
4.6.1 Předsetové hnojení.....	20
4.6.2 Hnojení během vegetace	21
4.6.3 Hnojení hořčíkem.....	21
4.7 Hořčík ve výživě člověka.....	23
4.8 Hořčík v potravinách	23
4.1 Biofortifikace obilovin.....	24
4.1.1 Genová biofortifikace	25
4.1.2 Agronomická biofortifikace	28
4.2 Čistírenské kaly – potenciální rizika použití.....	30
4.2.1 Anorganické kontaminanty	30
4.2.2 Organické kontaminanty	30
4.2.3 Farmaceutika a kosmetické produkty	31
4.2.4 Nanočástice	32
4.2.5 Patogeny	32
5 Metodika.....	33

5.1 Analytická stanovení	35
5.1.1 Stanovení okamžitě přístupného Mg.....	35
5.1.2 Stanovení potenciálně přístupného Mg	35
5.1.3 Měření obsahu Mg ve výluhu	36
5.1.4 Výnosy rostlin a odběry Mg	36
5.1.5 Statistické vyhodnocení	36
6 Výsledky	37
6.1 Analýzy půdy.....	37
6.1.1 Obsah hořčíku v půdě ve vodném výluhu v roce 2017.....	37
6.1.2 Obsah hořčíku v půdě stanovený metodou Mehlich 3 v roce 2017.....	37
6.1.3 Bilance obsahu hořčíku v půdě ve vodném výluhu (1996-2017).....	38
6.1.4 Bilance obsahu hořčíku (1996-2017) získaná pomocí metody Mehlich 3	39
6.2 Výnosy zrna a slámy	40
6.2.1 Výnos zrna od roku 1997 do 2017 na stanovišti Hněvčeves	40
6.2.2 Výnos slámy od roku 1997 do 2017 na stanovišti Hněvčeves.....	41
6.2.3 Výnos zrna od roku 1997 do 2017 na stanovišti Humpolec	42
6.2.4 Výnos slámy od roku 1997 do 2017 na stanovišti Humpolec.....	43
6.2.5 Výnos zrna od roku 1997 do 2017 na stanovišti Červený Újezd	44
6.2.6 Výnos slámy od roku 1997 do 2017 na stanovišti Červený Újezd	45
6.2.7 Výnos zrna od roku 1997 do 2017 na stanovišti Suchdol	46
6.2.8 Výnos slámy od roku 1997 do 2017 na stanovišti Suchdol	47
6.2.9 Průměrný roční výnos zrna	48
6.2.10 Průměrný roční výnos slámy.....	49
6.3 Průměrný obsah hořčíku v zrna pšenice ozimé.....	50
6.4 Průměrný roční odběr hořčíku rostlinou	51
6.5 Roční bilance hořčíku.....	52
7 Diskuze	53
7.1 Analýza půdy.....	53
7.2 Výnosy	54
7.3 Obsah hořčíku v pšenici	55
7.4 Průměrný roční odběr a bilance hořčíku.....	56
8 Závěr	57
9 Seznam literatury.....	58

1 Úvod

Obsah minerálů v půdě dlouhodobě klesá. Vlivem tzv. Zelené revoluce a kvůli rozšíření minerálních hnojiv jsou živiny, jako je hořčík v nedostatku. Příčinou je jeho antagonistický vztah k draslíku – hojné využívání NPK vede k vytlačování hořčíku, navíc je hořčík náchylný na změny pH a jiné abiotické faktory. I samotné hnojení dusíkem vede ke zvýšeným odběrům Mg.

V dnešní době je již jasné, že i když se dříve hořčík přehlížel, je velmi důležitým prvkem. Rostlina potřebuje hořčík pro své životní pochody a stejně tak i živočich, který jí následně konzumuje využívá přijatý hořčík.

I když žijeme v moderní době, stále existují lidé, kteří trpí malnutricí. Ať už kvůli tomu, že potraviny špatně vybírají a nehlídají na kvalitu nebo proto, že si vybírat nemohou a konzumují tak nutričně nevyváženou stravu.

Mnoho dnešních mezinárodních institucí řeší hlad a špatnou výživu v zemích třetího světa. Konzumace obilovin zde tvoří velkou část jídelníčku. Proto vyšší výnosy obilnin a zároveň zvyšování obsahu minerálních látek může značně pomoci.

Je tak nutné vytvořit udržitelný systém, ve kterém bude půda a na ní pěstované plodiny v harmonii. Není však možné hledět pouze na výnos. Je nutné mít zdravou půdu a kvalitní plodiny. A půda s vyváženým obsahem živin a organických látek pomůže k tomu, abychom pěstovali kvalitní plodiny, dosahovali dostatečných výnosů a dostali živiny jako je hořčík zpátky do naší stravy.

2 Hypotézy

Dá se předpokládat, že hnojení čistírenskými kaly a hnojem budou z dlouhodobého hlediska udržitelné systémy s ohledem na bilanci Mg v půdě. Zároveň povede aplikace těchto hnojiv k pravděpodobnému zvýšení obsahu Mg v zrně ozimé pšenice.

Dlouhodobá aplikace minerálních hnojiv (pouze N, P, K) povede sice ke zvýšení výnosů, ale díky tomu se dá očekávat prohloubení negativní bilance hořčíku a horší výsledná kvalita zrna.

3 Cíle

Cílem práce bylo sledování změn obsahů různých forem hořčíku v půdě dlouhodobě hnojené různými systémy hnojení (čistírenský kal, hnůj, NPK, nehnojená kontrola).

Dalším cílem bylo vyhodnocení výnosů pšenice. Dále byl sledován vliv hnojení na vybraný kvalitativní parametr – obsah Mg v zrně a jeho odběr.

4 Literární rešerše

4.1 Hořčík v půdě

Zastoupení hořčíku v půdě je různorodé a jeho obsah závisí na složení matečné horniny. Celkově se obsah hořčíku v půdě pohybuje kolem 0,4-0,6 % (Škarpa et al. 2010). Převážně je vázán v minerálech. Takový hořčík je méně přístupný a nazývá se nevýměnný. Dle Senbayram et al. (2015) je ho z celkového množství 90-98 %. Výměnný hořčík se vyskytuje jako dvojmocný kationt v půdním roztoku (díky rozpuštěným solím) a sorbovaný na půdní koloidy (Pavlů 2018).

V první řadě je však důležité zmínit, že půda je složitý systém živých a neživých procesů. Výsledkem těchto procesů je pak určitá půdní rovnováha všech látek mezi živou a neživou složkou půdy. Jelikož je výměna látek v půdě podmíněna řadou fyzikálních i chemických vlastností a hořčík v nich figuruje, je dobré složení půdy rozdělit na plynnou, pevnou a kapalnou fázi (Gliński et al. 2011).

4.1.1 Pevná fáze

Pevná fáze je rozdělena na minerální část a organickou část. U minerální části se hořčík vyskytuje v primárních a sekundárních minerálech. V primárních minerálech má největší zastoupení. Jelikož má vysokou sorpci, je uvolňován velice pomalým procesem zvětrávání hornin, který je mimo jiné složitější než u vápníku (Vaněk et al. 2016). Výskyt je hlavně u minerálů jako olivín, magnezit, serpentín, biotit, amfibol a pyroxen. Znamená to, že biologicky dostupný hořčík se dle Senbayram et al. (2015) nevyskytuje v písčitéch hrubozrnných půdách ochuzených o tyto minerály. Část hořčíku se vyskytuje i v uhličitanech, jako dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), které mají větší rozpustnost než výše zmíněné horniny. U sekundárních minerálů se Mg vyskytuje v trojvrstevném jílovitém silikátu verminkulitu. Ten je tvořen dvěma vrstvami tetraedrů (jeden atom křemíku obklopený 4 atomy kyslíku), mezi nimiž je vrstva oktaedru. Obvykle je u silikátů oktaedr složen z centrálního atomu hliníku obklopeného 6 skupinami OH. V případě verminkulitu je atom hliníku zaměněn za hořčík, který přejímá funkci vodíkových můstků a udržuje tak jeho soudržnost. Dalším sekundárním minerálem je chlorit, kde je vrstva oktaedrů tvořena $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (Pavlů 2018). Celkově mají sekundární minerály vliv na sorpci kationtů, proudění vody v půdním profilu a pórovitost. Dle

Senbayram et al. (2015) se Mg vyskytuje převážně v jílovitých půdách. Písčité půdy jsou na Mg většinou chudé. Různými výzkumy bylo prokázáno, že obsah hořčíku nelze přímo připisovat jeho výskytu v matečných horninách a jsou důležité i ostatní faktory jako délka a trvání zvětrávání, vlhkost půdy, pH půdy, kořenová a mikrobiální aktivita v půdě (Mayland et Wilkinson 1989). V organické části půd je spolu s ostatními kationty hořčík součástí humusu, a to hlavně vysokomolekulárních huminových kyselin. Spolu se sekundárními jílovými minerály tvoří komplexy půdních agregátů, které jsou základem stabilní struktury půdy. Do pevné fáze můžeme zařadit také hořčík vyskytující se jako součást solí, například síranů, fosforečnanů, chloridů, které jsou velmi dobře rozpustné. Díky tomu se řadí mezi hořčík výměnný a na rozdíl od výše zmíněných forem hořčíku je ve své rozpuštěné formě přímo využitelný rostlinami. Jiná pevná využitelná forma je výměně sorbovaný Mg^{2+} na půdní koloidy. Čítá 5-10 % celkového obsahu hořčíku v půdě a měl by zastávat 10-15 % KVK z celkového součtu sorbovaných kationtů (Hlušek et al. 1994). Je důležité, aby byly dodrženy doporučené poměry zastoupení jednotlivých kationtů. Nejdůležitějším je vztah k draslíku, kdy by měl být poměr Mg:K zhruba 3:1. Je to hlavně z toho důvodu, že má hořčík větší hodnotu hydratačního obalu, než je velikost iontu a koloidy by mohly sorbovat přednostně jiné, zpravidla jednomocné kationty (K^+ , NH_4^+). Mezi ostatní antagonistické kationty patří i Ca^{2+} , jehož vyšší zastoupení je sice v půdě vyžadováno (zajišťuje rovnovážný příjem ostatních kationtů), ale při příliš vysokých hodnotách může negativně působit na příjem hořčíku (Vaněk et al. 2016).

4.1.2 *Kapalná fáze*

V kapalně fázi se hořčík vyskytuje ve formě Mg^{2+} v půdním roztoku. Půdní roztok je pro rostliny velice důležitý. Zastává hlavní přísun živin a minerálních látek v něm rozpuštěných, které mají ideální chemickou a fyzikální strukturu pro následný příjem kořeny.

Při vyšším obsahu solí v půdě bývá množství hořčíku pro rostliny dostatečné. Je však nutné brát v potaz vyšší rozpustnost hořčíku a slabší sorpci než Ca. Proto se může stát, že je Mg z půdy vyplavován a dochází k jeho ztrátám. Dalším kritériem pro správný obsah přístupného hořčíku v půdě je neutrální až mírně zásadité pH půdního roztoku. V kyselějších půdách může být obsah hořčíku vyšší vlivem většího množství kyselých kationtů H^+ . V rhizosféře je ovšem příjem Mg pozastaven a může zapříčinit jeho nedostatek v rostlině a snížit tak výnos a kvalitu produkce (Senbayram et al. 2015).

4.1.3 Plynná fáze

Plynná fáze půdy se týká hlavně půdních pórů, které jsou vyplněny vzduchem. To znamená, že na tuto fázi má vliv hlavně obsah kyslíku a CO₂, případně fyzikální vlastnosti jako je obsah vodní páry nebo tlak. Právě vyšší tlak CO₂ může dle Vaněk et al. (2016) vést k tvorbě kyseliny uhličité, která má vliv na mobilitu hořčíku a ostatních kationtů – vyšší kyselost může vést ke snížení pH, což může mít za následek jejich vyplavování.

4.2 Hořčík v rostlině

Hořčík hraje v rostlině velice důležitou roli. V prvé řadě se účastní tvorby chlorofylu. Zde figuruje jako centrální atom v porfyrinovém jádře, kde je vázán v chelátové vazbě (Vaněk et al. 2016). Dále je důležitý pro mnoho fyziologických procesů v rostlině. Například zařizuje transport látek ve floému, účastní se Calvinova cyklu, figuruje jako kofaktor a allosterický regulátor pro více než 300 enzymů (kináz, RNA, polymeráz, adenosin trifosfatáz). Díky tomu je Mg zásadní pro transport asimilátů mezi zásobními a ostatními orgány (Senbayram et al. 2015). V sušině rostlin je jeho obsah zpravidla nižší než 0,5 % (Čermák et al. 2010).

Celkově rostlina přijímá hořčík z půdního roztoku ve formě kationtu Mg²⁺, a to hlavně pasivně. Při potřebě minerálních látek začne v rostlině uvnitř buněk převládat záporný elektrický náboj a vyrovná se potřebnými kationty z půdy. Přes vyšší elektrochemický gradient díky zvýšené exkreci protonů z cytoplazmy dokáže rostlina přijímat nutný hořčík a ostatní kationty (Senbayram et al. 2015). Oběh hořčíku v rostlině je bezproblémový, rostlina dokáže využívat uložený hořčík z jiných sloučenin v případě nedostatku. Transport hořčíku je zajišťován xylémem a může být závislý na vápníku, celkově je však hořčík 3x pohyblivější než vápník (Richter 2004).

Díky účasti hořčíku v chlorofylu je jeho obsah vysoký hlavně v listech, koncem vegetačního období se přesouvá i do zrna a zde může být ukazatelem kvality. Dokonce i v rostlinách, kde dochází k nedostatku hořčíku, není jeho obsah vázaný na chlorofyl větší než 30 %. Nedostatek se primárně projeví tím, že se zpomalí ostatní biologické a enzymatické pochody. Na deficit Mg v chlorofylu dojde až sekundárně (Hlušek et al. 1994). V zrnu se dle vyskytuje zhruba 0,12 % Mg v sušině. Příjem hořčíku vrcholí na konci vegetace na rozdíl od draslíku a dusíku. Negativní vliv na příjem Mg má antagonistický kation draslíku a NH₄⁺, který

můžou při vysoké koncentraci působit inhibičně. Špatný příjem se vyskytuje také v kyselém prostředí (Vaněk et al. 2016).

Hořčík se v rostlině objevuje v chlorofylu, fytinu, oxalátech nebo ve formě chelátů a ostatních sloučenin. Dále se také může vyskytovat sorpčně vázaný nebo ve formě volných iontů. 70 % je vázáno s organickými a anorganickými ionty. 15-20 % hořčíku v rostlině je součástí chlorofylu (Vaněk 2016). Je prokázáno, že více hořčíku obsahují rostliny dvouděložné oproti jednoděložným (Hlušek et al. 1994).

Fyziologické procesy stojí na aktivaci enzymů. Mezi příklady enzymů, kde hořčík figuruje, se můžou zařadit fosfokinázy, dekarboxylázy, dehydrogenázy. Hořčík se účastní nejen fotosyntézy jako součást chlorofylu, ale ovlivňuje také aktivaci enzymu Rubisco, který řídí karboxylaci CO₂ v temnostní fázi Calvinova cyklu. Ten je součástí sekundární fáze fotosyntézy, kde vzniká glyceraldehyd-3-fosfát, který se dále přeměňuje na důležité sacharidy, mastné kyseliny a aminokyseliny (Šebánek 1983). Dalším místem účasti Mg je syntéza bílkovin. Dle Vaněk et al. (2016) ovlivňuje oddělení polypeptidických řetězců od bílkovin. Při nedostatku tak může rostlina vykazovat nízké hodnoty bílkovin, naopak vyšší obsah aminokyselin a peptidů. Dalším bílkovinným enzymatickým cyklem ovlivněným Mg je syntéza neesenciální aminokyseliny glutaminu. Hlušek et al. (1994) navíc uvádí, že Mg udržuje koloidní stav protoplazmy.

4.3 Nedostatek hořčíku

V prvních fázích se nedostatek hořčíku viditelně neprojevuje. Rostlina nejprve brzdí své fyziologické a enzymatické procesy a až potom snižuje množství hořčíku v chlorofylu. Proto je počáteční fáze latentní (Vaněk et al. 2016). Vyšší nedostatek je viditelný ve formě chlorózy. Té však může předcházet snižující se kvalita produktů, která se ukáže pouze po analýze požadovaných hodnot kvality sledovaných plodin. Je tak nutné kontrolovat hladiny hořčíku v půdě s předstihem, abychom předešli ztrátě kvality plodiny (Vaněk et al. 2016).

Časným příznakem stresu rostliny při nedostatku hořčíku je narušené rozdělení asimilátů mezi kořeny a ostatními částmi rostliny. Zvyšuje se tak akumulace těchto asimilátů v listech, kde blokují ostatní biologické procesy a snižují růst kořenových orgánů (Cakmak & Kirkby 2008). Zmíněné asimiláty jsou z největší části sacharidy, figurující jako zásobárny pro rostliny. Dle Vaněk et al. (2016) nejsou využívány pro tvorbu biomasy a nejsou ani schopny

se může transportovat zpátky do kořenů, to je důvod omezeného růstu kořenů. Mimo to také rostlina potřebuje tyto asimiláty dostat do nově rostoucích mladých listů a zrna. Ty však trpí narušením floemu, a proto i jejich nedostatkem (Gransee & Führs 2013; Cakmak 2013). Kvůli tomu se latentní formy nedostatku ukazují na kvalitě produkce. Dle Vaněk et al. (2016) je to například snížený obsah bílkovin, sacharózy, škrobu.

Z důvodu výše zmíněné blokace floemu a narušení transportních procesů rostliny dochází k akumulaci sacharidů v listech trpících nedostatkem Mg. Často to způsobuje snížení fixace CO₂ Ribulosou-1,5-bisfosfátkarboxylázou (RuBisCO). K tomu dochází dvěma hlavními mechanismy. Prvním je zpětná inhibice syntézy sacharózy (Cakmak & Kirkby 2008), druhým je akumulace škrobu v chloroplastu ovlivňující vodivost CO₂ v chloroplastové membráně a způsobující nižší parciální tlak CO₂ v katalytickém místě Rubisca. Je známo, že syntéza a akumulace škrobu v chloroplastech způsobuje deformaci chloroplastů a snížení rychlosti difúze CO₂ z membrány. Obvykle tedy dochází k nerovnováze mezi zachycením světla a jeho využíváním, kdy nevyužití spouští produkci reaktivních forem kyslíku (ROS-reactive oxygen species) v rostlinách s nedostatkem Mg. To, zda by zesílení ROS mohlo způsobit oxidační poškození molekul chlorofylu, závisí na rovnováze mezi produkcí ROS a jejich poutáním (Senbayram et al. 2015; Guo et al. 2016).

4.3.1 Chloróza

Vizuální symptomy u listů trpících nedostatkem Mg se nazývají intervenální chloróza. V důsledku nadměrné produkce ROS dochází k degradaci chlorofylu. Téměř ve všech případech je příčinou takové chlorózy u listů s nedostatkem Mg nadměrné poškození kvůli ROS, nikoli z důvodu nedostatku Mg pro syntézu chlorofylu. K chloróze dochází hlavně u starých listů kvůli omezenému přísunu hořčíku z xylému, jelikož se rostlina snaží přivést hořčík přednostně do mladších tvořících se listů. Kvůli tomu, že ho není dostatek k obnově chlorofylu ve starších listech, dochází k jejich žloutnutí v důsledku nedostatečného množství zeleného barviva. U obilnin se často hovoří o korálkovité mozaice nebo pruhovitosti u kukuřice (Škarpa et al. 2010).

4.3.2 Abiotický stres

Rostliny pěstované na poli čelí řadě abiotických stresů ve formě sucha, zasolení/kyselosti půdy, horkému/studenému počasí, které mají vliv na jejich správný vývoj a

s tím spojené výnosy. Příznaky chlorózy a nedostatku hořčíku se často vyskytují po vlhkých a teplých zimách. Kvůli vyplavení živin z horních částí půdy rostlina musí najít způsob, jak se dostat k hořčíku ve spodnějším místech. Proto dokáže prodloužit kořeny a tím se vypořádat s krátkodobým nedostatkem. Pokud však nemá dostatek již před tím (doplnění například hnojením), může docházet k tomu, že kořeny nedokáže prodlužovat z důvodu listů zaplněných asimiláty a nedostatečným floemovým transportem právě k jejich prodloužení. Prodlužování kořenů a tvorba tzv. slizové substance neboli anglicky mucilage (Carminati et Vetterlein 2013), která pomáhá k lepšímu zadržení vody, je velmi energeticky náročná. To znamená, že snížený tok energie z listů ke kořenům může být pro rostlinu fatální. Dochází pak k silnému nedostatku Mg, který vyústí v nedostatečný vývin orgánů rostlin. Opožděně metají, čímž se podílejí na nerovnoměrnosti případných plánovaných agrotechnologických procesů. Také opožděně zrají, což zapříčiňuje pozdní sklizeň a díky tomu možné zvýšené náklady spojené s nedostatečným pokrytím poptávky. Nedostatek hořčíku může na první pohled vypadat jako nedostatek dusíku. Kromě toho se výskyt chlorózy projevuje nerovnoměrně, což může komplikovat jeho identifikaci. Některé rostliny mohou lépe kořenit a dostat se do spodnějším vrstev půdy, kde je méně draslíku negativně působícího na příjem Mg. Díky tomu mohou hluboko kořenící rostliny chloróze odolávat (Vaněk et al. 2016).

Hladiny hořčíku by se měly sledovat také při suchu a teplotnímu stresu, jelikož adekvátní hořečnatá výživa je kritická při boji rostliny s těmito abiotickými faktory. Inhibice fotosyntézy suchem zapříčiňuje špatné umístění elektronu na kyslík a způsobuje tak oxidační stres. Jelikož nedostatek Mg může působit podobně, efekty se sčítají. Proto je nutné v takových situacích zvýšit přísun například formou hořečnatých hnojiv (Mengutay et al. 2013). V některých kritických situacích se prokázalo, že s nedostatkem Mg můžeme bojovat i aplikací foliárních hnojiv, která se aplikují přímo na listy. Dle EL-Metwelly et al. (2010) při kombinaci s Cu dochází ke stabilizaci hladin hořčíku ve vysušených půdách. Hlušek et al. (1994) uvádí 2-5% postřik síranem hořečnatým přímo na listy postižené chlorózou. V době sucha ale rostlina nemusí pomocí listů hořčík při jeho deficienci dostatečně přijímat. Je to z toho důvodu, že jsou stomata (průduchy) v listech uzavřena a listy se snaží co nejvíce udržet vodu, avšak v tomto ohledu je nutný další výzkum (Eichert et al. 2008). Dochází také ke změnám morfologie – rostliny vytvářejí voskový povrch listu nebo dochází k tloušťnutí listu (Senbayram et al. 2015). I tak je foliární výživa při akutních chlorózách doporučována.

4.4 Nadbytek hořčíku

Dle Vaněk et al. (2016) v našich podmínkách k nadbytku hořčíku nedochází, a to z důvodu používání hnojiv, která ho obsahují málo (ať už se jedná například o NPK nebo organická hnojiva). Neděje se tomu však pouze u nás. Kvůli tzv. zelené revoluci v minulém století je obsah Mg v půdě minimální po celém světě. Jak bylo vysvětleno v předešlých kapitolách, K je antagonistou Mg v půdě. Z extrémního navýšení používání minerálních hnojiv s dusíkem doprovázených draslíkem docházelo ke snižování hodnot hořčíku v půdě a tím i v plodinách. K porovnání byl před rokem 1968 obsah hořčíku v sušině pšenice ozimé 115–126 mg/100 g, oproti tomu po roce 1968 byl 91–101 mg/100 g (Guo et al. 2016).

Neznamená to ale, že rostlina na nadbytek Mg nereaguje. Gerendás et Hendrik (2013) sice ve své práci popisují, že přímý vliv na metabolismus rostliny nebyl evidován. Kobayashi et al. (2015) však ve svém experimentu vlivu zvýšeného množství Mg ve formě $MgCl_2$ a $MgSO_4$ na růst rýže a ježatky kuří nohy dokázali, že dochází k celkem výraznému snížení růstu. U ježatky se jednalo o pokles růstu o 60–67 % a u rýže o 48–56 %. Výsledky ukázaly, že hlavním faktorem je snížení hladiny Ca v celé rostlině. U ježatky docházelo k zoubkování a vyblednutí listů, u rýže nikoliv, jelikož má větší odolnost vůči nadbytku Mg.

Nadbytek Mg tedy může vyústit ve špatné poměrné uspořádání minerálních živin a díky tomu v nežádoucí omezení růstu. Potvrdilo se tak tvrzení Führs & Gerendás (2013), že fyziologické změny nadbytkem Mg jsou možné pouze nevyváženou dodávkou ostatních kationtů. I když je šance na nadbytek hořčíku mizivá, vlivem špatné agrotechnologie může na nedostatečně analyzovaných půdách s vyšším obsahem hořčíku při vysokém hnojení hořečnatými hnojivy, například ještě v kombinaci s foliárním hnojením, docházet k negativním vlivům na případný výnos a kvalitu produkce (Führs & Gerendás 2013).

4.5 Hnojiva obsahující hořčík

Hořčík je důležitý pro vysoký výnos a kvalitu produkce (Wang et al. 2020). Z matečné horniny se ho však uvolňuje nedostatek. Příjem Mg je také náchylný na fyzikální a chemické podmínky jako je vysoké či nízké pH, sucho nebo vyšší hladiny antagonistických kationtů v koncentračních poměrech. To má za následek nižší dostupnost Mg pro rostliny, i když je ho

v půdním roztoku dostatek. Proto je k optimální produkci důležité používání hořečnatých hnojiv hlavně na půdách s omezeným množstvím dostupného Mg (El-Nour & Shaaban 2012).

Základním kritériem pro správné užití hnojiv je analýza půdy a srovnání jejích výsledků s požadavky určité plodiny. Dle Senbayram et al. (2015) je pro dosažení 90 % relativního výnosu potřeba $2,1 \text{ mmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ výměnného hořčíku.

4.5.1 Pomalu rozpustná hnojiva

Hladiny dostupného Mg uvolněného z hnojiv do půdy jsou podmíněny fyzikálním a chemickým složením, které stojí na velikosti částic a rozpustnosti ve vodě. Proto hnojiva s hořčíkem můžeme rozdělit na dvě skupiny: rozpustné a málo rozpustné (Senbayram et al. 2015). Z málo rozpustných je známá například hornina dolomit, ve které se přirozeně vyskytuje uhličitan hořečnatý. Řadí se mezi hnojiva s minimálním zpracováním. Rozdrcený se využívá k vápnění půdy, což přispívá k úpravě pH kyselých půd (Škarpa et al. 2016). Jelikož je v tomto případě vápnění většinou primárním důvodem jeho použití, uvolňování Mg a Ca do půdy je sekundárním benefitem pro udržování správné hladiny živin v půdě. Jedním z negativ však je, že z důvodu nižší rozpustnosti je jejich uvolňování pozvolné. Proto není jako hnojivo využitelný při akutnějších nedostatcích Mg nebo situacích, kdy je potřeba zvýšit množství Ca a Mg za kratší časový úsek.

4.5.2 Rychle rozpustná hnojiva

Mezi rychle rozpustná hnojiva se díky obsahu Mg v hydratované formě $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ řadí Kieserit. Znovu se jedná o přirozeně se vyskytující minerál. V přirozené formě se však netěží, získává se flotací z tvrdé soli (Hlušek et al. 1994). Nejčastěji se prodává ve formě granulí, někdy i ve formě krystalické. Díky výše uvedené rozpustnosti se využívá k celkovému základnímu hnojení, ale i přihnojování. Doporučená je aplikace na neutrální až zásadité a písčité půdy s dostatečným obsahem draslíku a nízkou zásobou hořčíku. Vaněk et al. (2016) uvádí obsah 15 % hořčíku, 21 % síry a 3 % Cl a doporučuje hnojit jařiny až při předseťové přípravě půdy na lehkých písčitých půdách, kde může hrozit vyplavení. Kieserit je možno vyrobit chemickou reakcí oxidu hořečnatého s kyselinou sírovou, kdy pak vzniká syntetický MgSO_4 (Senbayram et al. 2015).

Další rozpustné hnojivo bohaté na Mg je hořká sůl. Hlušek et al. (1994) uvádí obsah MgO 16,5 %. Vyrábí se krystalizováním Kieseritu a jedná se o nejlépe rozpustné a nejčistší

hořečnaté hnojivo. Díky tomu se využívá hlavně ve formě postřiku při akutním nedostatku hořčíku (blíže vysvětleno v kapitole nedostatek hořčíku). Pokud se objevují viditelné známky, je možné po intervalech 10-14 dní aplikovat 2-3 x denně ve formě postřiku. Je však nutné si dát pozor při vyšších teplotách a vyšší vzdušné vlhkosti, kdy by se měla snížit koncentrace postřiku (Vaněk et al. 2016). Dále je také možná kombinace s jinými rozpustnými hnojivy jako DAM 390. Na podobné bázi se vyskytuje i hnojivo s názvem Microtop, které navíc obsahuje bór a mangan. Hnojivo je ihned vstřebatelné, doporučuje se však dávat pozor u rostlin citlivých na bór (Hlušek et al. 1994).

4.5.3 *Organická hnojiva*

Kromě anorganických hnojiv se hořčík v menších koncentracích vyskytuje i v organických hnojivech. Parnes (2013) sice uvádí, že chlévský hnůj dokáže teoreticky pokrýt potřeby rostliny v ohledu na hořčík. Uvádí ale také, že se živiny poskytnuté z těchto organických hnojiv rychle vyplavují. Navíc obsahují několikanásobné množství draslíku, například u kravského a prasečího hnoje je tomu až 4:1 (K:Mg). Proto by aplikace větších dávek organických hnojiv při nedostatku hořčíku mohla situaci ještě zhoršit hlavně z důvodu antagonismu K a Mg.

Z kombinovaných vícesložkových tuhých hnojiv je důležité zmínit Campofort, což je hnojivo kombinující močovinu a síran hořečnatý, které obsahuje 4,8 % Mg. Dalším je Duslofert extra 12-8-5 S + 5 MgO, bezchloridové hnojivo používané pro zahradní plodiny (Vaněk et al. 2016).

4.5.4 *Kombinovaná hnojiva*

Hořčík se často vyskytuje v kapalných kombinovaných hnojivech aplikovatelných foliárně. Objevují se hlavně kombinace hořčíku s dusíkem. Patří sem MgN-sol, Folimag, Premag. Tato hnojiva jsou užívána hlavně pro foliární přihnojování nebo zálivku. Dvousložková hnojiva používaná jako základní hnojivo vpravované do půdy jsou Dammag 1,2,3 a Dumag (Vaněk et al. 2016).

4.5.5 *Čistírenské kaly*

V neposlední řadě lze k hnojení využít čistírenské kaly (Singh & Agrawa 2008). Jsou suspenzí odpadních látek z čistíren odpadních vod, obsahující velké množství organických i

anorganických látek. Dle Hýblerová (2005) docházelo při testování hnojení topolů k velice dobrým výsledkům nárůstu biomasy a zlepšení růstu. Kromě velkého zvýšení množství přístupného dusíku v půdě docházelo i k vybalancování ostatních živin včetně hořčíku.

4.6 Hnojení pšenice ozimé

Ozimá pšenice se řadí mezi plodiny náročné na pěstování. Dle Hřivna (2012) odčerpá z půdy 25 kg dusíku (N), 5 kg fosforu (P), 20 kg draslíku (K), 2,4 kg hořčíku (Mg), 4 kg síry (S) a díky tomu se řadí k plodinám se středním odběrem živin.

Jedním z prvních faktorů nutných pro vysoké výnosy je druh půdy. Pšenice ozimá obecně vyžaduje spíše neutrální až mírně alkalické půdy. Nejlépe se jí daří na černozemi či hnědozemi v hlinitých až jílovitohlinitých půdách. I když se pšenice pěstuje po celé republice, Vaněk et al. (2016) uvádí, že vysoké výnosové kvality zrna a potravinářské jakosti mouky je dosahováno hlavně v teplých oblastech. Proto je nutné si v oblastech s horšími podmínkami dávat pozor na správnou rostlinnou výživu.

Základem správné výživy je obsah organických sloučenin ve formě humusových látek. Pšenice se sama o sobě organickými hnojivy jako je kejda nebo močůvka nehnojí. Je proto důležité zvolit předplodinu hnojenou organickými hnojivy nebo využít posklizňových zbytků (například slámy) a zaorat je do půdy. Tímto bude v půdě docíleno dobrého vázání vody a pohybu živin (Hřivna 2012).

Výživa pšenice ozimé začíná s ohledem na jednotlivé živinné potřeby chemickou analýzou půdy. Díky tomu můžeme korigovat množství potřebného hnojiva vůči již obsaženým živinám v půdě. Samotné hnojení se rozděluje na základní hnojení, hnojení během vegetace, regenerační, produkční a kvalitativní (Hřivna 2012).

4.6.1 Předseťové hnojení

Základní neboli předseťové hnojení probíhá, jak název napovídá, před zasetím na podzim. I když, jak uvádí Hřivna (2012), pšenice na podzim odebírá minimum živin, je to období kdy si vytváří zásoby na přezimování a je tak dobré ho nepodcenit. Deficit se může ukázat už zde a rostliny tak nedokážou přezimovat nebo je na jaře čeká problém s růstem. Proto je doporučeno na podzim odebrat vzorky rostlin a po analýze porovnat s tabulkou optimálního obsahu živin v podzimním období u porostů pšenice. Dusík, který má nejvyšší vliv

na výnos, kvalitu (obsah bílkovin v zrna-dobré vlastnosti lepku) a řadí se mezi hlavní limitující prvky ve výživě rostlin, se v tomto období zpravidla neaplikuje (Hřivna 2012). Jelikož rostlina odebírá pouze zhruba 10 % celkového odběru dusíku v podzimním období, postačí jí dusík poskytnutý v půdě z posklizňových zbytků. Může se ale stát, že nebyla vhodně zvolena předplodina, kterou se rozumí například jetelovina přirozeně bohatá na dusíkaté látky nebo předplodina v minulosti hnojená statkovými hnojivy. Také mohlo dojít k negativním fyzikálním procesům zpomalení mineralizace například vlivem počasí a dusíku je na podzim v půdě málo. To lze zjistit pomocí laboratorního testu N_{min} na množství minerálního dusíku v půdě (Černý et al. 2014). Při hodnotách nižších než 25-30 kg N_{min} na hektar je možné dusíkem přihnojit. Jednotlivé živiny, které se doplňují základním hnojením jsou převážně fosfor, draslík, hořčík a případně síra. Hlavním důvodem je, že jejich správná hladina pozitivně působí na budoucí využití dusíku při růstu (Hřivna 2012).

4.6.2 *Hnojení během vegetace*

Hnojení během vegetace začíná na jaře, kdy se podporuje hlavní růst biomasy rostliny. Protože hlavní hraniční živinou pro správný nárůst biomasy je dusík, je možné použít LAV nebo z tekutých hnojiv například DAM. První hnojení hned po zimě se nazývá regenerační. Jak název napovídá, napomáhá po mrazech zregenerovat rostlinná pletiva, urychlit růst a podpořit odnožování (vznik produktivních stébel). Tento typ hnojení má největší vliv na výnos. Dalším typem přihnojení je produkční, které zajišťuje dostatek N v době sloupkování a má přímý vliv na počet zrn v klasu. Posledním je kvalitativní hnojení, díky kterému může být zvýšena kvalita zrna a další kvalitativní jakostní údaje jako hmotnost 1000 zrn. Jedná se o pozdní přihnojení, které nemá takový vliv na výnos, může při něm navíc při velkém množství srážek docházet k vyššímu výskytu houbových chorob a tím naopak k nižší kvalitě zrna (Vaněk et al. 2016).

4.6.3 *Hnojení hořčíkem*

Co se týká hnojení hořčíkem, nejčastější je jeho kombinace s tekutými dusíkatými hnojivy a aplikuje se tak na jaře při regeneračním hnojení. I když je odběr rostlinami zhruba 10x menší než v případě dusíku nebo draslíku, je důležité ho nevynechat (Černý et al. 2014). Při viditelných chlorózách, zapříčiněných nedostatkem hořčíku, pak existují přípravky, které můžeme využít v celém období růstu. Doporučuje se například hořká sůl. Z kombinovaných tekutých hnojiv je také možné použít Lamag, který se vyskytuje v několika kombinacích

s ostatními živinami, jako je bór nebo síra. Z pohledu kontroly fyzikálních vlastností půdy a množství živin v půdě před setím lze také hořčík doplnit při vápnění ve formě mletého dolomitu (blíže vysvětleno v kapitole hnojiva s hořčíkem). Je však nutné počítat s tím, že se takto doplněný hořčík vyskytuje v méně rozpustných uhličitanech a uvolňuje se tak do půdy pomaleji (Senbayram et al. 2015). Pokud nedocházelo k vápnění nebo je v půdě stále nedostatek Mg, Černý et al. (2014) doporučuje při podzimním základním hnojení použít například hnojivo Kamex, což je draselné hnojivo kombinované s hořčíkem.

Dle Chwil (2014), který ve svém výzkumu porovnával základní hnojení a hnojení na list u pšenice ozimé, je aplikace základních hnojiv v podzimních měsících důležitější pro výnos. Jako jedno z nejefektivnějších se ukázalo ošetření půdy před acidifikací ve formě vápnění, což omezilo množství negativně působícího hliníku v půdě ze 140 na 28 mg/kg zeminy a mělo pozitivní vliv na biologickou aktivitu půdy. V kombinaci s užitím NPK při základním hnojení docházelo k dobrému zastoupení živin v rostlině a nejlepším výnosovým hodnotám. Tato kombinace však způsobila také největší odběr minerálů z půdy. Studie Hlisnikovský et al. (2019) toto potvrzuje. I když se v jejich výzkumu ukázal dusík jako limitní živina pro výnos a obsah bílkovin pšenice ozimé, odsun ostatních živin, který se nemusí projevit v prvních letech pěstování, může být fatální pro půdní vlastnosti v budoucnosti. Nedostatek těchto živin v půdě a tím i v rostlinách můžeme vidět v praxi, Guo et al. (2016) dává do souvislosti historické zanedbávání hnojení hořčíkem v zemích třetího světa s nízkou hladinou hořčíku ve výživě místní populace nedosahující minimálních doporučených dávek Mg. Ve studii Chwil (2014), mělo foliární hnojení dobré výsledky na zvýšení kvality zrna, ale v ohledu na bílkoviny bylo výhodnější základní hnojení (i když obsah bílkovin byl v obou případech podobný). Je také vhodné zmínit, že dobré výsledky foliárních hnojiv lze připsat spíše jejich zásadnímu vlivu na zlepšení utilizace ostatních živin a podpoření fotosyntézy než samotnému zvýšení obsahu živin, jako je tomu u základních hnojiv. Ve studii Gaj & Górski (2013) se ukázalo, že minerální hnojiva zásadně působí na obsah bílkovin a lepku, což potvrzuje výsledky studie Chwil (2014). Navíc se objevil vztah přímé úměrnosti obsahu hořčíku v listech s hodnotou bílkovin a lepku. Dalším důležitým objevem bylo, že na kvalitativní znak uniformity velikosti zrna, nemělo vliv hnojení, ale pouze počasí (Gaj & Górski 2013).

4.7 Hořčík ve výživě člověka

Hořčík je nepostradatelný nejen ve výživě rostlin, ale i ve výživě člověka. Podle Haraminac (2012) se vyskytuje jako čtvrtý nejhojnější minerál v těle a je nepostradatelný pro život. V dospělosti máme v těle zhruba 25 g hořčíku (existují odlišnosti u ženského a mužského pohlaví). Ze 30-40 % se vyskytuje v buňkách a měkkých tkáních, z 1 % v krvi a zbytek je v kostech (FAO 2002). Z toho plyne, že hlavní úlohou hořčíku je stavba kostí (Ornstová 2008). V měkkých tkáních a krvi figuruje jako kofaktor enzymů, účastní se metabolických dějů, proteosyntézy, syntézy DNA a RNA, udržuje správný elektrický potenciál nervové soustavy (FAO 2002, Čížková 2009). Mimo jiné také úzce souvisí s tokem draslíku v těle. Proto může nedostatek Mg zapříčinit problémy s jeho hladinou.

Nedostatek hořčíku může vznikat buď jako deplece, což je dáno poruchou metabolismu nebo jako deficit. Deficitem se rozumí nedostatek hořčíku důsledkem nedostatečného příjmu potravou, nadměrného vylučování ledvinami (selhání ledvin, nadměrná konzumace alkoholu, nadměrná konzumace kofeinových nápojů), nemoci nebo například při růstu (jeho ukládání do kostí). Deficit může také nastat při těhotenství, kojení nebo vyšší fyzické zátěži, případně mohou negativně působit i různé léky (antikoncepce, inzulin). Příznaky jsou různé. Je to dané i tím, že je hořčík přítomen v buňkách. Proto je nutné nejdříve zkontrolovat hladinu hořčíku, aby se potvrdilo, jestli jde opravdu o jeho deficienci. Samotné příznaky jsou pak migrény, bolesti temene, bolesti u srdce, deprese, úzkosti, strach, nervozita, průjemy, bolesti břicha, zvracení, bolesti svalů, svalový třes (u alkoholiků). Příznaky tedy souvisí s nervovou, svalovou, pohybovou a srdeční soustavou. K vyléčení nedostatku hořčíku se podávají tablety, může se doplnit i nitrožilně infuzí (Čížková 2009). Hlavním cílem je však tomuto předejít a zvýšit příjem správnou stravou, složením stravy, případně užíváním suplementů například při těhotenství.

4.8 Hořčík v potravinách

Kromě příjmu z pitné vody nebo z minerálních vod přirozeně bohatých na Mg je z hlediska potravin hořčík nejvíce obsažen v rostlinné stravě. Z důvodu jeho značného množství v chlorofylu se hojně vyskytuje v zelené zelenině jako je například špenát. Vysoké hodnoty Mg se také objevují v ořechách, luštěninách, obilninách, některých mořských

plodech. Naopak v mase, vejcích, mléčných výrobcích, bílé mouce nebo ovoci se tolik nevyskytuje. Tuhy, oleje a cukr mohou působit proti jeho vstřebávání. Podle FAO (2002) navíc snižuje vstřebávání také vláknina. Potraviny s vysokým podílem vlákniny však zároveň obsahují i vyšší množství Mg, což kompenzuje negativní efekt vlákniny. Dle Haraminac (2012) je také velká ztráta hořčíku způsobena vařením a dalším zpracováním. Pokud je v potravíně hořčík umístěn převážně ve vodě rozpustných sloučeninách, může pařením, blanšírováním nebo vařením docházet k jeho vyplavení. U špenátu se po blanšírování vyplaví až jedna třetina Mg, u fazolí po vaření dojde ke ztrátě až 65 % Mg.

S ohledem na kvalitu potravin je dle Fühns & Gerendás (2013) míra kvalitativních znaků jako je skladovatelnost, textura, pevnost (například u zeleniny, ovoce) zapříčiněná poměrem Mg:Ca a Mg:K, samotný obsah Mg není tak důležitý. Poměr Mg:Ca má vliv na výše zmíněné vlastnosti, poměr Mg:K pak hlavně na organoleptické vlastnosti, protože přímo reguluje iontovou rovnováhu a organické kyseliny uvnitř buněk, čímž ovlivňuje hodnotu pH.

Pšeničná mouka patří mezi dobré zdroje hořčíku. Čím více je ale rafinovaná, tím méně má minerálů. Obsah Mg u pšenice je tak velice rozmanitý (od 200-1300 mg.kg⁻¹) a závisí na druhu použité mouky (Ornstová 2008). Nejnižší obsah má bílá mouka, nejvyšší pak celozrnná. Hussain et al. (2010) zkoumal obsahy minerálních látek v mouce u různých genotypů pšenice. Byl porovnán denní příjem pšeničné mouky (z průměru zhruba 200 g na osobu) s tabulkou pokrytí minerálních potřeb člověka. Při vybrání vhodného genotypu docházelo k pokrytí ze 72-84 %. Je důležité zmínit, že se jednalo o rostliny organicky hnojené. Výzkum ale ukázal, že více záleželo na zvoleném genotypu pšenice než typu hnojení.

4.1 Biofortifikace obilovin

Nedostatek mikroživin celosvětově postihuje asi 38 % těhotných žen a 43 % dětí předškolního věku. Podvýživa mikroživinami je proto hlavním problémem nejen v mnoha rozvojových zemích. Nerovnoměrné rozdělení živin mezi různé části rostlin je další příčinou tohoto problému. Například obsah železa je vysoký v rýžových pluchách, ale nízký ve vylouštěných rýžových zrnech (Garg et al. 2018).

Kromě zavedení různorodé diety, potravinových doplňků nebo fortifikací potravin je další možností, jak bojovat s nutričními nedostatky minerálních živin ve výživě člověka, proces biofortifikace (White & Broadley 2009). Dle Pataco et al. (2017) jde o zvyšování obsahu živin

pomocí hnojení (agronomické strategie biofortifikace) nebo zvýšení schopnosti akumulace živin, případně snížení množství antinutričních látek díky šlechtění či genetickému inženýrství (genetické strategie biofortifikace). Kromě zaměření přímo na minerální živiny lze pomocí biofortifikace zvýšit i jiné nutriční látky jako je kyselina listová (Strobbe & Van Der Straeten 2017) nebo vitamíny B1, B6 a E (Cobalchin et al. 2021).

Světový zemědělský systém dosud nebyl navržen tak, aby podporoval lidské zdraví; místo toho se zaměřuje pouze na zvýšení výnosu obilí a produktivity plodin. Tento přístup vedl k rychlému nárůstu nedostatku mikroživin v potravinách, čímž se zvýšila podvýživa mikroživinami mezi spotřebiteli. Nyní zemědělství prochází posunem od produkce většího množství potravinářských plodin k produkci potravin bohatých na živiny v dostatečném množství. To pomůže v boji proti „skrytému hladu“ nebo „mikronutriční podvýživě“, zejména v chudých a rozvojových zemích, kde ve stravě dominují plodiny základních potravin chudé na mikroživiny (Garg et al. 2018).

Biofortifikace má oproti ostatním metodám řadu výhod. Metoda potravinové fortifikace sice uměle dodá určité potravině živiny, například mouka s přidaným zinkem a železem, ale tyto prvky mění organoleptické vlastnosti, potravina je méně udržitelná a snáze podléhá oxidaci (Gómez-Galera et al. 2010). Při agronomické biofortifikaci se využívá hnojení nutné pro správný růst a výnos. Zároveň lze díky určitým technikám zvýšit obsah minerálních látek při zachování kvalitativních parametrů produkce (Pataco et al. 2017).

Obiloviny jsou stále jednou z nejdůležitějších složek potravy. Z celosvětového pohledu na příjem kalorií pokrývá 23 %, 17 % a 10 % celkových globálních kalorií, v tomto pořadí, pšenici, rýži a kukuřici. I proto se vědci touto problematikou stále více zabývají (Cobalchin et al. 2021).

4.1.1 *Genová biofortifikace*

V první řadě je důležité zmínit strategii genové biofortifikace. Výhodou je, že náklady, i když mnohdy vyšší, jsou pouze jednorázově za výzkum. Mezi negativa patří délka a celková komplexnost výzkumu. Organizace CGIAR zavedla program HarvestPlus ve spolupráci s různými mezinárodními organizacemi pro rozvoj biofortifikovaných základních plodin (s vysokou koncentrací mikroživin), jako je pšenice, rýže, kukuřice, maniok, fazole, právě pomocí genetické biofortifikace (Das et al. 2019).

Základními body jsou zvýšený příjem minerálů z půdy, zlepšení ukládání minerálů v zrně, snížení antinutričních faktorů v obilovinách, posílení látek podporujících biologickou dostupnost minerálů a přesun minerálů do endospermu (Rawat et al. 2013).

4.1.1.1 Zvýšený příjem minerálů z půdy

Příjem minerálů z půdy se v rostlinách řídí složitými mechanismy, které se vyvinuly kvůli sice hojnému výskytu těchto minerálů v půdě, ale v nesnadno dostupných formách (Colangelo & Guerinot 2006). Rostliny pro příjem kovových iontů využívají strategie 1 u dvouděložných a negraminózních jednoděložných rostlin nebo strategie 2 u lipnicovitých. Geny, které zodpovídají za transport kovových iontů v rostlinách byly zjištěny v mnoha studiích. Jde hlavně o FRO2 – železitá reduktáza oxidáza, IRT – železem regulovaný transportér, TOM1 a YSL1 (Hell & Stephan 2003, Nozoye et al. 2011). Zvýšení exprese těchto genů v různých kultivarech rostlin pak může zvyšovat získávání kovů z půdy (Rawat et al. 2013).

4.1.1.2 Zlepšení ukládání minerálů v zrně

Moderní metody šlechtění jsou soustředovány hlavně na vysoký výnos, ale zapomíná se na alokaci minerálů v rostlinách. Dle Graham et al. (2001) mají nízkou variabilitu minerálního složení. Bylo však zjištěno, že starší kultivary vykazují vyšší obsah minerálů. Proto se genetická biofortifikace zabývá křížením moderních a starších kultivarů pro zachování vysokých výnosů, ale zlepšení ukládání minerálů v zrně (Rawat et al. 2013).

4.1.1.3 Přesun minerálů do endospermu

Při biofortifikaci pšenice a jiných obilovin metodou přesunu minerálů do endospermu se využívá hlavně genetiky a šlechtění. Příčina vzniku této metody je, že největší množství minerálů, a to hlavně P, K a Mg, se vyskytuje v aleuronové vrstvě. Pouze nižší koncentrace živin jsou v endospermu. Vápník se pak nachází hlavně v otrubách, pravděpodobně kvůli funkci udržování struktury (Wang et al. 2019). Z toho důvodu následný příjem těchto minerálů z mouky závisí na míře vymletí při jejím zpracování. Toho ale nelze dosáhnout pouze agronomickou biofortifikací. Například u zinku sice lze dle Borg et al. (2018) při aplikaci zinečnatých hnojiv zvýšit akumulaci Zn v zrně až o 300 % (v závislosti na druhu a genotypu dané plodiny) a tím i minimální koncentraci v endospermu, avšak tato metoda by byla vhodná

spíše pro následné zpracování do celozrnné mouky. Použití této metody bylo neudržitelné vzhledem k rozvojovým zemím, kde se spíše konzumuje mouka více zpracovaná. Proto vědci ze studie Borg et al. (2018) využili metody přesunu minerálů do endospermu. U zkoumaného ječmene použili transportní vakuolární gen HvMTP1, který distribuuje Zn v zrně. Zvýšení exprese tohoto genu v obilném zrně ječmene pak značně zvýšilo akumulaci Zn v endospermu.

4.1.1.4 Snížení antinutričních faktorů v obilovinách

Antinutriční látky, které zabraňují vstřebávání minerálů ve střevech, jsou dalším důležitým bodem biofortifikace. Mezi tyto látky se řadí kyselina fytová, která je hlavní zásobní látkou skladující fosfor v obilovinách. Tato kyselina však tvoří komplexy s minerály a člověk nemá potřebné enzymy pro jejich rozklad. Proto se takto vázané minerály nevstřebají ve střevech a jedná se o jednu z nejdůležitějších antinutričních látek u člověka (Bouis 2000). Kvůli tomu se vědci snažili snížit obsah fytové kyseliny, aniž by se snížil obsah fosforu v obilovinách. Příkladem řešení bylo zavedení určitých genů mikrobů obsahujících fytázu – enzym štěpící komplexy kyseliny fytové. Po zavedení genu nastala vyšší aktivita fytázy (Brinch-Pederson et al. 2000). Vzhledem k tomu, že jsou tyto fytázy náchylné k teplu, došlo k jejich inaktivaci během zpracování a tepelné úpravě. Z tohoto důvodu se vyvinula strategie manipulovat s biosyntetickou cestou kyseliny fytové. Genetické linie lpa (low phytic acid) byly objeveny u několika různých obilovin například rýže nebo ječmene. Příkladem jsou linie kukuřice a sóji s embryo-specifickým genovým umlčením transportéru ATP-binding cassette (ABC) multidrug resistance-associated protein (MRP). Takto upravené linie vykazovaly normální rychlost klíčení a zároveň nižší množství fytové kyseliny (Rawat et al. 2013).

4.1.1.5 Posílení látek podporujících biologickou dostupnost minerálů

White & Broadley (2009) popisují nutriční látky, které zvyšují možnost vstřebání minerálů ve střevech. Příkladem je kyselina askorbová, β -karoten a inulin. Například inulin podporuje růst bakterií, které vytvářejí ve střevech kyseliny s krátkým řetězcem a následně snižují pH, čímž zvyšují rozpustnost minerálů. Další bodem genové biofortifikace je tedy zakomponovat tyto látky do obilovin. Je popsáno mnoho genů, způsobujících tvorbu výše zmíněných látek v obilovinách. Příkladem je zvýšení β -karotenu v rámci genového inženýrství. U rýže bylo provedeno zvýšení obsahu β -karotenu zavedením genu fytoen syntázy (psy) z narcisu a genu bakteriální fytoen desaturázy (crtl). Dalším příkladem je mutace genu syntázy

škrobu (SSIIa), která zvýšila obsah inulinu 42krát oproti plané odrůdě. U těchto genetických modifikací je však stále důležitý další výzkum (Rawat et al. 2013).

4.1.2 *Agronomická biofortifikace*

Zvýšení koncentrace minerálů v plodinách je hlavní strategií agronomické biofortifikace. Zásadní nástroje jsou použití hnojiv nebo zlepšení rozpustnosti a mobilizace půdních minerálních prvků. V půdě, kde jsou minerály méně dostupné, je nutné aplikovat cíleně anorganická nebo organická hnojiva na kořeny. Příkladem je používání anorganických hnojiv se selenem ve Finsku, které dlouhodobě zvýšilo obsah Se v potravinách. V situaci, kdy je rozvádění minerálů v rostlině problematické kvůli vnějším vlivům se pak užívá foliární hnojení na listy. Jejich výhodou je pozitivní vliv na výnosy a při správných postupech i biofortifikace. Nevýhodou je vyšší dopad na životní prostředí při nedodržení správných agronomických postupů (White & Broadley 2009).

Další možností jsou úpravy osiva, které zahrnují základní nátěr a obalování semen. Jsou alternativou ke zlepšení úrody a obohacování zrna živinami (Das et al. 2019). Takto ošetřené osivo zlepšuje založení porostu, fenologické procesy, zvyšuje výnos a koncentraci mikroživin v zrně (Das et al. 2019). Kromě hnojiv a úprav osiva výzkumníci také zkoumali roli biohnojiv při podpoře výnosu zrn. Mykorhizní houby v kombinaci s hnojivy jsou široce používány pro biofortifikaci (Noori et al. 2014).

4.1.2.1 *Biofortifikace půdním hnojením*

Příkladem biofortifikace kořenovou výživou je hnojení mědí. Ta se sice i po aplikaci do půdy stává pro rostliny rychle nedostupnou, i tak může být tímto zvýšena koncentrace Cu v obilovinách, zelenině a ovoci. Plodiny jsou obvykle hnojeny Cu prostřednictvím CuSO_4 nebo jako hnůj a kaly z čistíren odpadních vod. Dalším příkladem je aplikace hořečnatých hnojiv. Ta zvyšuje koncentraci Mg v rostlinných pletivech a existuje silný pozitivní vztah mezi Mg^{2+} v půdním roztoku a koncentracemi Mg ve vypěstovaných produktech (White & Broadley 2009).

4.1.2.2 *Biofortifikace foliárním hnojením*

Biofortifikace foliárními neboli listovými hnojivy je stále populárnější. Listová aplikace má vliv na zlepšování nutričního stavu rostlin, a následná adekvátní koncentrace cílových živin může mít potenciál zvýšit výnos a kvalitu různých plodin jako alternativu k tradičním hnojivům

aplikovaným do půdy. Důležitý je mechanismus těchto hnojiv. Živiny aplikované prostřednictvím listového hnojení, zejména makroživiny, jako je dusík (N), draslík (K), vápník (Ca), hořčík (Mg) a síra (S) mohou pronikat přímo do listu nebo skrze buněčné vrstvy, jako je kutikula nebo průduchy. Některé další minerály jako železo jsou méně pohyblivé. Proto má na správnou aplikaci vliv také stáří listu a pH postřikového roztoku (Cobalchin et al. 2021).

Dle Ramzan et al. (2020) je metoda listové aplikace vhodnější pro podání dostupných živin rostlinám pro optimální růst ve srovnání s metodou aplikace do půdy. V této studii bylo sledováno hnojení kombinace zinku a železa prostřednictvím postřiku na list (0,5 % $ZnSO_4$ a 1 % $FeSO_4$), které zvýšilo výnosové vlastnosti pšenice i jakostní parametry zrna.

Niyigaba et al. (2019) zkoumali foliární aplikaci Fe a Zn. Uvedli, že foliární ošetření Zn a Fe významně zlepšilo výnosové a kvalitativní parametry plodiny pšenice včetně hmotnosti tisíce zrn, množství hrubých bílkovin, délky klasu, zrn na klas, výnos zrna, obsahy Zn a Fe.

Zajímavé je také foliární hnojení dusíkem v pozdní sezóně mezi klasováním a kvetením. Bylo zjištěno, že takový postřik byl příčinou zvýšení obsahu bílkovin v zrně. Zásadními faktory výše zmíněného hnojení rychlost a načasování k dosažení zlepšení výnosu, ale také ke zvýšení obsahu bílkovin, kvality lepku a zlepšení reologických parametrů. V jejich studii zkoumali hnojení různých kultivarů pšenice foliárním Mg, K a Ca v kombinaci s foliárním hnojením dusíkem v pozdní sezóně. Tato studie zjistila, že listové hnojivo s kationtovými dusičnany umožnilo biofortifikaci pšeničných zrn minerály Mg, K a v menší míře Ca beze změny výtěžku a kvality (Cobalchin et al. 2021).

4.1.2.3 Kombinace foliárních a půdních hnojiv

Kombinace foliárních hnojiv a půdních hnojiv se ukázala jako nejlepší ve výzkumu Chattha et al. (2017). Zde byla srovnána aplikace zinku ve formě ošetření osiva, foliárního hnojiva, půdního hnojiva a kombinace foliárního a půdního hnojiva v půdě s nízkým obsahem zinku. Kombinovaná aplikace poskytla vyšší výnos zrna a byla zaznamenána maximální koncentrace zinku v zrně spolu s nejnižšími hodnotami kyseliny fytové v zrně. Je tedy možno konstatovat, že pro dobrou biofortifikaci bez ztráty výnosů je využití kombinace těchto metod.

4.2 Čistírenské kaly – potenciální rizika použití

Použití čistírenských kalů pro přivedení živin a organické hmoty do půdy je velmi udržitelný způsob využití těchto odpadních látek. Představuje však také riziko kvůli obsahu kontaminantů, jako jsou těžké kovy, organické sloučeniny, patogeny, farmaceutika, kosmetické produkty a nanočástice (Fijalkowski et al. 2017)

4.2.1 Anorganické kontaminanty

Anorganické kontaminanty nejsou biologicky rozložitelné. Proto se mohou hromadit v půdě, vstupovat do potravního řetězce a ukládat se v životním prostředí. Historicky nejvýznamnější jsou těžké kovy. V tomto ohledu se sledují Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Hg, Cd, Pb, Sn, Mo, V. I když stejně důležité z hlediska toxicity jsou metaloidy jako As, Se, popř. nekovy a lehké kovy jako Al. Proto se stále častěji používá termín kovové stopové prvky. Hlavním zdrojem těžkých kovů v čistírenských kálech jsou průmyslové odpadní vody a povrchový odtok. Celkový obsah se pohybuje v širokých mezích (od 0,5 do 2 % suchého kalu. S přihlédnutím k množství jednotlivého prvku jej lze seřadit následovně: Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Cd nebo Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > Cd. V Evropě jsou limitující hodnoty zadány evropským nařízením 86/278/EEC. To nastavuje limity u prvků Zn, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb. Dle rozsáhlé studie provedené v Německu se však od roku 1977 do roku 2012 hodnoty těchto prvků značně snížily. Například ty nejvíce toxické prvky jako Cd, Pb, Hg se snížily o 95.4 %, 84.5 % a 89.6 %. Odborníci se však shodují, že tato legislativa je zastaralá vzhledem k tomu, že nezohledňuje to, jak jsou tyto anorganické látky v půdě mobilní a v jakých se vyskytují sloučeninách (Fijalkowski et al. 2017, Lamastra et al. 2018).

4.2.2 Organické kontaminanty

Anorganické látky jsou sledovány dlouhodobě a představují mnohem menší riziko kontaminace než toxické organické polutanty. Ty jsou nejčastěji detekované v komunálních čistírenských kálech a patří mezi ně absorbovatelné organické halogeny (AOX), lineární alkybenzensulfonáty (LAS), nonylfenoly a nonylfenoethoxyláty (NP a NPnEO), diethylhexylftalát (DEHP), polyaromatické uhlovodíky (PAH), polychlorované bifenyly (PCB), polychlorované dibenzo-pdioxiny a-furany (PCDD/F) (Kapanen et al. 2013). Přítomnost NP, NPnEO a DEHP je zvláště významná vzhledem k jejich široké škále použití. NPnEO jsou

nejrozšířenějšími alkylfenoethoxyláty (APnEO), které představují 80–85 % z celkového množství. Jsou široce používány pro průmyslové, zemědělské a domácí aplikace jako neiontové povrchově aktivní látky. V čistírnách odpadních vod procházejí NPnEO řadou přeměn, kdy se polyethoxylátové řetězce rozpadají a vytvářejí se nonylfenoly s krátkým řetězcem, které zahrnují nonylfenol (NP), nonylfenolmonoethoxylát (NP1EO) a nonylfenoldiethoxylát (NP2EO). Velmi sledované jsou také DEHP. Tyto estery kyseliny ftalové jsou průmyslové chemikálie používané jako přísady v různých výrobních procesech, jako jsou polyvinylchlorid, polyvinylacetát a celulózové a polyuretanové pryskyřice. Zmíněné látky jsou prokazatelně škodlivé a mimo jiné jsou například karcinogenní. Evropské nařízení 86/278/EEC bylo sice roku 2000 zrevidováno a bere v potaz perzistentní organické polutanty, ale jeho dodržování není povinné a pouze některé státy jako Německo, Dánsko, Švédsko, Francie a Rakousko mají limity těchto škodlivých látek zavedeny ve svých legislativách (Lamastra et al. 2018).

4.2.3 *Farmaceutika a kosmetické produkty*

V dnešní době je také stále více kladen důraz na riziko výskytu PhC (farmaceutika) a PCP (kosmetické produkty) v čistírenských kalech. Dle Verlicchi & Zambello (2015) se ve vodních kalech nachází analgetika, antihistaminika, hormony, antiseptika, antianginatika, antihypertenziva, hypnotika, repelenty proti hmyzu, antiarytmika, antineoplastika, lipidové regulátory, UV filtry, antibiotika, antiagregancia, psychiatrická léčiva, syntetická pižma, antikoagulancia, antiprotozoika, kontrastní látky, neiontové povrchově aktivní látky, antidiabetika, beta-agonisté, antagonisté receptorů, antiemetika, beta-blokátory, stimulanty, antimykotika, diuretika. Vzhledem k širokému spektru výskytu výše uvedených látek je velmi složité zjistit souvislost se zpracováním čistírenských kalů, i když nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u biosolidů (pevné organické látky oddělené po procesu čištění odpadních vod). Ohledně léků v čistírenských kalech bylo zjištěno, že se v mnoha státech EU vyskytují významná rezidua například aspirinu, diklofenaku nebo nitrophenolu. (Fijalkowski et al. 2017). Ve výzkumu Malmborg & Magnér (2015) se ukázala jako nejúčinnější technologie pro snížení farmaceutických reziduí anaerobní digesce, došlo ke snížení až o 30 %.

4.2.4 Nanočástice

Dalšími kontaminanty jsou nanočástice vzhledem k růstu používání nanotechnologií v posledních letech. Příkladem těchto nanočástic je stříbro, oxid titaničitý nebo oxid zinečnatý, které se vyskytují například v textilu a kosmetice. Oxid titaničitý se dokáže vázat s toxickými stopovými kovy, které následně vstupují do půdního prostředí (Fijalkowski et al. 2017).

4.2.5 Patogeny

Čistírenské kaly obsahují vysoké množství různých organismů, saprofytů a patogenů. Právě patogeny jsou rizikem. Dle Fijalkowski et al. 2017 jsou hlavní skupiny patogenních organismů přítomných v čistírenských kálech střevní bakterie, paraziti, viry a houby. Kvůli výskytu antibiotik se v kálech nachází i multirezistentní bakterie, například *E. coli*. Mezi metody pro odstranění takových patogenů se využívá hygienizace s použitím vysoké teploty, anaerobní digesce, skrápěcí filtry nebo autotermální termofilní aerobní digesce. (Fijalkowski et al. 2017).

Pokud tedy čistírenské kaly nepřesahují hraniční hodnoty toxických látek (a těžkých kovů, lze je využít pro hnojení rostlin (Hýblerová 2005). Kaly z různých čistíren mají odlišné obsahy látek, je proto nutné vybrat tu správnou kombinaci. Je však nutné věnovat pozornost také dalším toxickým látkám, které se v čistírenských kálech mohou vyskytovat.

5 Metodika

Experiment byl založen na pokusných stanicích ČZU a VÚRV v.v.i. Ruzyně v roce 1996. Jedná se o stanoviště s různými půdně-klimatickými podmínkami (Humpolec a Praha-Suchdol, Červený Újezd a Hněvčeves). Charakteristika stanovišť je patrná z tabulky č. 1. Na parcelkách jsou pěstovány v tříhonném osevním sledu tyto plodiny: brambory, ozimá pšenice a jarní ječmen. Cílem práce bylo hodnocení obsahu hořčíku u ozimé pšenice, kde byly pěstovány následující odrůdy: Samanta (1996-1999), Calgary (1999-2015) a RGT Reform (2015-2017).

Tabulka č. 1a: Základní charakteristika pokusných stanovišť.

Stanoviště	Humpolec	Praha-Suchdol
GPS souřadnice	49°33'16"N, 15°21'02"E	50°7'40"N, 14°22'33"E
Nadmořská výška (m. n. m.)	525	286
Průměrná roční teplota (°C)	7,0	9,1
Průměrné roční srážky (mm)	665	495
Půdní typ	Kambizem	Černozem
Půdní subtyp	<i>modální</i>	<i>modální</i>
Půdní druh ¹⁾	písčito hlinitá	prachovitá hlína
pH ²⁾	5,1 (±0,09)	7,5 (±0,10)
p ³⁾	115 (±14)	79 (±10)
K ³⁾	191 (±26)	236 (± 23)
Ca ³⁾	1785 (±247)	7531 (±1710)
Mg ³⁾	114 (±17)	167 (±20)

¹⁾ dle NRSC USDA

¹⁾ Stanoveno 0.01 mol/l CaCl₂, 1:10 w/v v archivních vzorcích (1996)

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

Tabulka č. 1b: Základní charakteristika pokusných stanovišť.

Stanoviště	Červený Újezd	Hněvčeves
GPS souřadnice	50°4'22''N,14°10'19''E	50°18'46''N, 15°43'3''E
Nadmořská výška (m. n. m.)	410	265
Průměrná roční teplota (°C)	7,7	8,2
Průměrné roční srážky (mm)	493	573
Půdní typ	Luvizem	Luvizem
Půdní subtyp	<i>haplická</i>	<i>modální</i>
Půdní druh ¹⁾	hlinitá	jílovito-hlinitá
pH ²⁾	6,7 (±0,11)	5,9 (±0,10)
p ³⁾	140 (±15)	96 (±6)
K ³⁾	196 (±8)	203 (±19)
Ca ³⁾	2720 (±15)	2079 (±394)
Mg ³⁾	89 (±6)	130 (±6)

¹⁾ dle NRSC USDA

²⁾ Stanoveny 0.01 mol/l CaCl₂, 1:10 w/v v archivních vzorcích (1996)

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

Organickými hnojivy je hnojeno pouze k první plodině v osevním sledu, proto je u brambor sledováno přímé působení aplikace organických hnojiv, u ozimé pšenice a jarního ječmene působení následné. Dávky dusíku jako hlavní živiny a hořčíku v hnojivech u jednotlivých variant jsou uvedeny v tabulce č. 2. Pro potřeby pokusu jsou používány čistírenské kaly z Ústřední čistírny odpadních vod Praha Trója. Živiny z minerálních hnojiv (varianty NPK a N) jsou dodávány v LAV (27,5 %), trojitým superfosfátu (21 % P) a 60 % draselné soli (50 % K).

Celý systém byl (s výjimkou nehnojené kontroly) založen na jednotné dávce dusíku tak, aby celková dávka N za 3 roky (brambory + pšenice ozimá + ječmen jarní) činila 330 kg N/ha. To platí pro organická i minerální hnojiva, popřípadě jejich kombinaci. Proto jsou při stejné dávce dusíku hodnoceny rozdíly mezi variantami z hlediska přístupných forem Mg v půdě a jejich odběr rostlinami.

Tabulka č. 2: Systém hnojení polního pokusu ČZU (množství dodaných živin na 1 ha).

Varianta	Brambory	Ozimá pšenice	Jarní ječmen
kontrola	0	0	0
kal	330 kg N	0	0
	70 kg Mg	0	0
hnůj	330 kg N	0	0
	30 kg Mg	0	0
NPK ¹⁾	120 kg N	140 kg N	70 kg N
	0 kg Mg	0 kg Mg	0 kg Mg

¹⁾ označené živiny (prvky) byly dodány v minerální formě, pokud je symbol u názvu varianty, byla celá varianta hnojena pouze minerálními hnojivy

Odběr vzorků ornice (0-30 cm) byl prováděn každoročně po sklizni pšenice. Bylo tak zjištěno, kolik přístupných živin zbývá v půdě při testovaných systémech hnojení. Ornice byla usušena a přeseta přes síto s velikostí otvorů 2 mm. Pro potřeby diplomové práce byly k analýzám využity archivní vzorky půdy z roku 1996 (před založením pokusu) a posledního ukončeného cyklu osevního postupu, tj. z roku 2017.

5.1 Analytická stanovení

5.1.1 Stanovení okamžitě přístupného Mg

Extrakty pro stanovení okamžitě přístupného hořčíku byly zhotoveny dle Luscombe et al. (1979). Ke 3 g vzorku bylo doplněno 30 ml demineralizované vody. Vzorky byly třepány 1 hodinu a následně odstředěny při 9000 g za minutu. Vzniklé extrakty byly analyzovány.

5.1.2 Stanovení potenciálně přístupného Mg

Ke stanovení obsahu potenciálně přístupného hořčíku byl použit extrakční roztok Mehlich 3 (Mehlich, 1984) složený z CH_3COOH (0,2 mol/l), NH_4F (c=0,015 mol/l), HNO_3 (c=0,013 mol/l), NH_4NO_3 (c=0,25 mol/l) a EDTA (c=0,001 mol/l). Poměr zeminy a vyluhovadla činil 1:10 (10g zeminy, 100 ml vyluhovadla). Třepání probíhalo po dobu 5 min. Získaný roztok byl filtrován.

5.1.3 Měření obsahu Mg ve výluhu

Všechna měření obsahu hořčíku v získaných výluzích byla realizována na optickém emisním spektrometru s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES, Varian Vista-Pro, Austrálie).

5.1.4 Výnosy rostlin a odběry Mg

Na všech stanovištích byly každoročně monitorovány výnosy zrna pšenice ozimé. Po sklizni byl vždy měřen obsah Mg v zrně ozimé pšenice a ve slámě. Analýza byla provedena prostřednictvím suchého rozkladu. Na základě obsahu Mg v rostlinách a výnosu byl vypočten odběr Mg sklizní. Porovnáním vstupů Mg (vypočteno z výsledků rozborů analyzovaných hnojiv) a odběru Mg bylo možno vypočítat jednoduchou bilanci hořčíku.

5.1.5 Statistické vyhodnocení

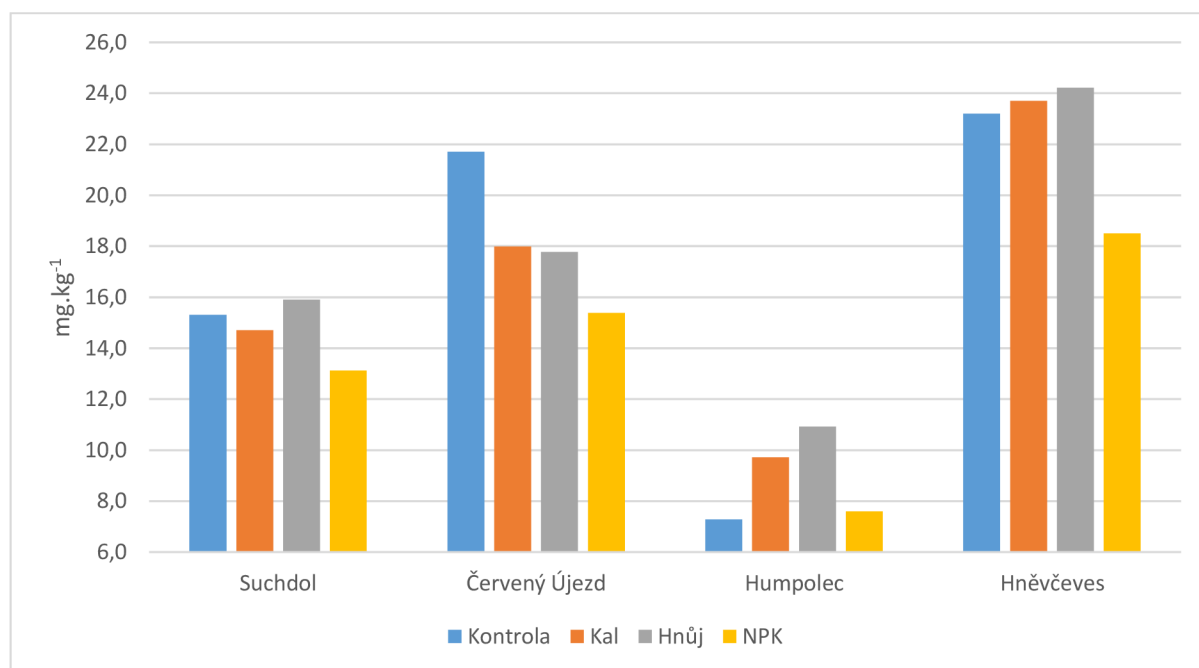
Pro statistické vyhodnocení byly využity základní popisné charakteristiky, časové řady a výpočty bilancí hořčíku v programu Microsoft Excel (Excel 2007).

6 Výsledky

6.1 Analýzy půdy

6.1.1 Obsah hořčíku v půdě ve vodném výluhu v roce 2017

Na grafu č. 1 jsou sloupcovými grafy ukázány hodnoty obsahu hořčíku v půdě ve vodném výluhu na konci pokusu v roce 2017. Z grafu je vidět, že nejméně hořčíku zůstalo v půdě v Humpolci, nejvíce naopak v Hněvčevsi. Co se týče zkoumaných variant, nejméně hořčíku zůstalo v půdě po použití NPK napříč stanovišti. Jen na stanovišti Humpolec nastala výjimka, kdy nejnižší hodnota byla naměřena u kontroly (7,3 mg.kg⁻¹) a hned po ní následovala NPK (7,6 mg.kg⁻¹). Na stanovištích v Suchdole a Hněvčevsi jsou hodnoty ostatních 3 variant (Kontrola, Kal, Hnůj) vyrovnané.

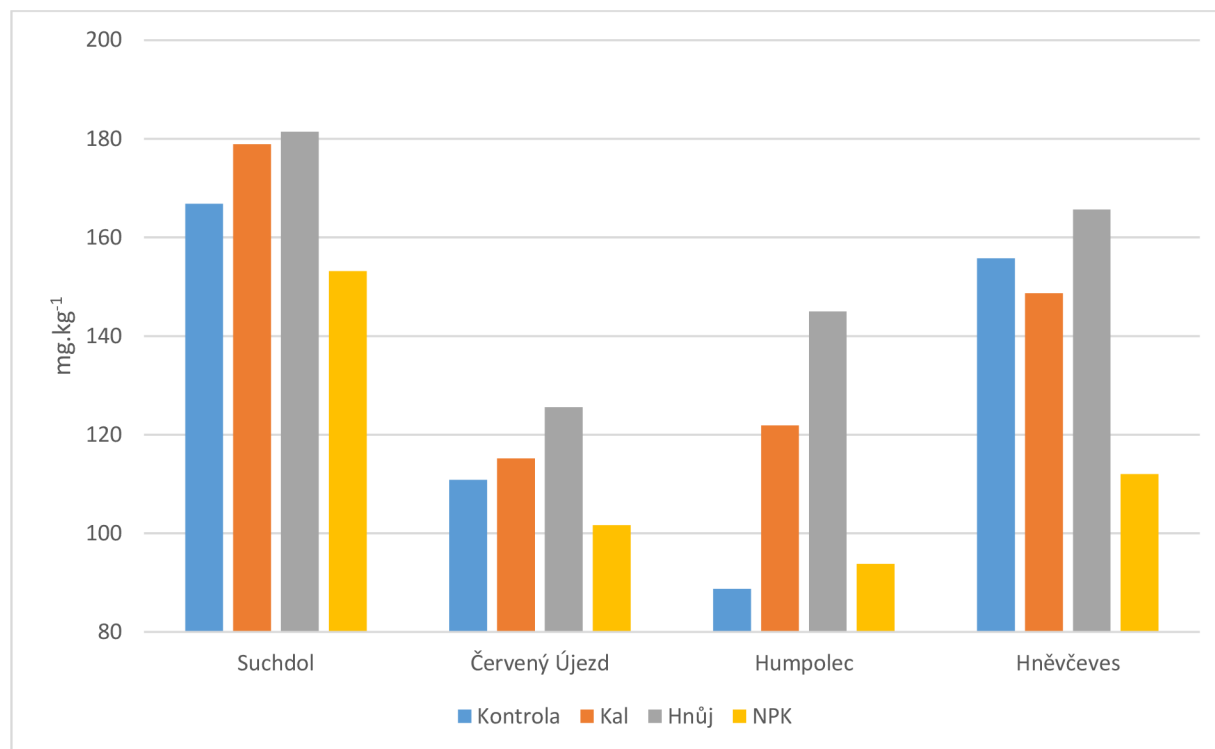


Graf č. 1: Obsah hořčíku v půdě ve vodném výluhu v roce 2017 (mg.kg⁻¹)

6.1.2 Obsah hořčíku v půdě stanovený metodou Mehlich 3 v roce 2017

Graf č. 2 znázorňuje sloupcovými grafy obsahy hořčíku v půdě na konci pokusu v roce 2017 stanovené metodou Mehlich 3 (mg.kg⁻¹). Napříč všemi stanovišti bylo nejvíce hořčíku v půdě u varianty hnůj, následovala varianta kal kromě stanoviště Hněvčevsi. Tam byly naměřeny vyšší hodnoty u nehnojené varianty. Nejnižších hodnot podobně jako metodou vodného výluhu bylo dosaženo v půdě po hnojení variantou NPK. Pouze u stanoviště

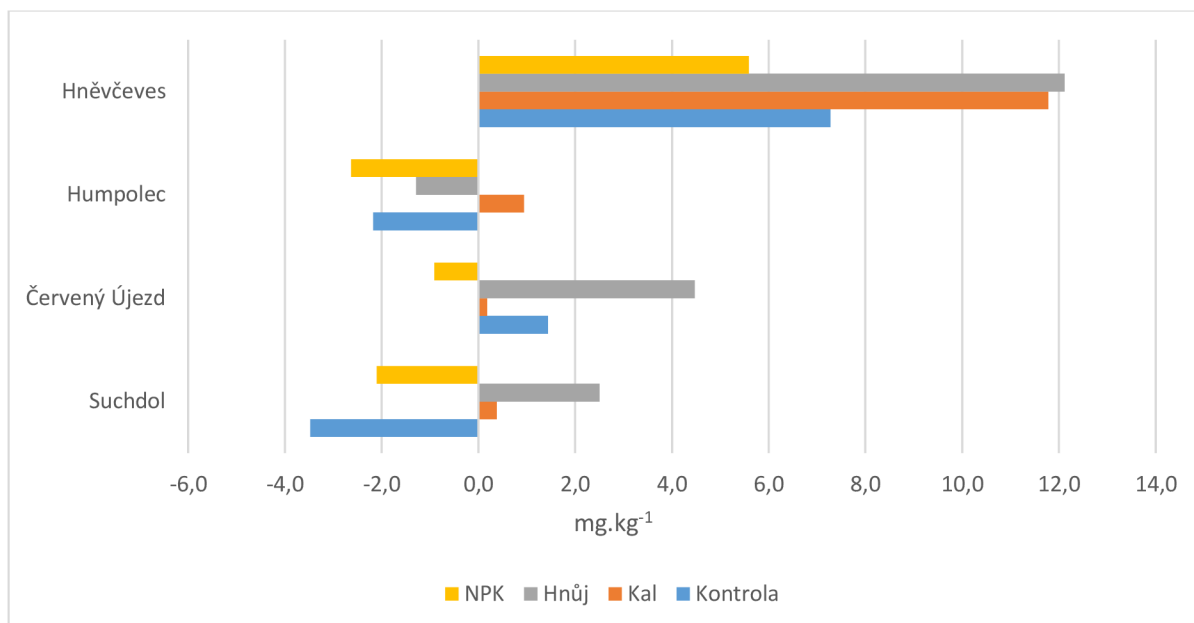
Humpolec měla nejnižší hodnoty znovu kontrola. Nejvíce hořčíku zůstalo průměrně na stanovišti Suchdol. Nejméně pak průměrně u stanoviště Humpolec, kde ale maximum u varianty hnůj bylo vyšší než v Červeném Újezdu.



Graf č. 2: Obsah hořčíku v půdě v roce 2017 pomocí metody Mehlich 3 (mg.kg^{-1})

6.1.3 Bilance obsahu hořčíku v půdě ve vodném výluhu (1996-2017)

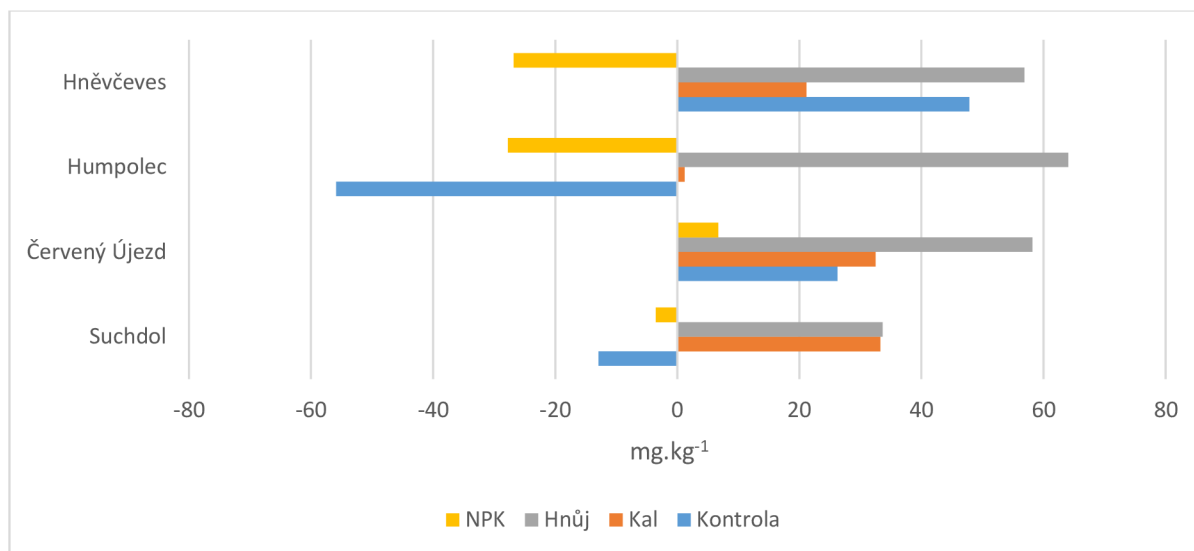
Na základě extrakce demineralizovanou vodou z let 1996 a 2017 byla vypočtena bilance okamžitě přístupného Mg. Tato bilance je výsledkem rozdílu stavu Mg mezi koncem pokusu v roce 2017 a jeho začátkem v roce 1996, a je uvedena v grafu č. 3. Z grafu je zřejmé, že nejvyšší hodnoty byly zjištěny na stanovišti Hněvčeves. Zde v půdě zůstalo nejvíce dostupného hořčíku u varianty hnůj a kal. Následovala kontrola a nakonec NPK, avšak stále v kladné bilanci. Oproti tomu na ostatních stanovištích docházelo u některých variant k negativní bilanci. Opakujícím se trendem u ostatních stanovišť je negativní bilance hořčíku v půdě u varianty NPK. Varianta hnůj měla pozitivní bilanci v Červeném Újezdu a Suchdole, negativní pak v Humpolci. Kal byl pro půdu spíše neutrální u všech stanovišť kromě Hněvčevse, kde bylo dosaženo výrazně kladné hodnoty. Nejnižší bilanci lze vidět na stanovišti Suchdol u nehojené kontroly.



Graf č. 3: Bilance obsahu hořčíku v půdě ve vodném výluhu od roku 1996 do roku 2017 (mg.kg⁻¹)

6.1.4 Bilance obsahu hořčíku (1996-2017) získaná pomocí metody Mehlich 3

V grafu č. 4 jsou výsledky bilance Mg získané metodou Mehlich 3, která ukazuje nejstabilnější hodnoty rostlinám potenciálně dostupného hořčíku. V grafu je vidět trend pozitivní bilance u varianty hnůj. Další kladná bilance hořčíku v půdě byla zjištěna u varianty kal na všech stanovištích kromě spíše neutrální bilance na stanovišti Humpolec. Po hnojení variantou NPK bylo na stanovištích Hněvčeves a Humpolec v půdě méně hořčíku než na začátku pokusu. V Červeném Újezdu a Suchdole byla zjištěna spíše neutrální bilance. Nejnižší bilance bylo vidět na stanovišti Humpolec u nehnojené varianty, podobně jako na stanovišti Suchdol. Jinak však na stanovišti Hněvčeves a Červený Újezd měla nehnojená varianta pozitivní bilanci.



Graf č. 4: Bilance obsahu hořčíku od roku 1996 do 2017 získaná pomocí metody Mehlich 3 (mg.kg⁻¹)

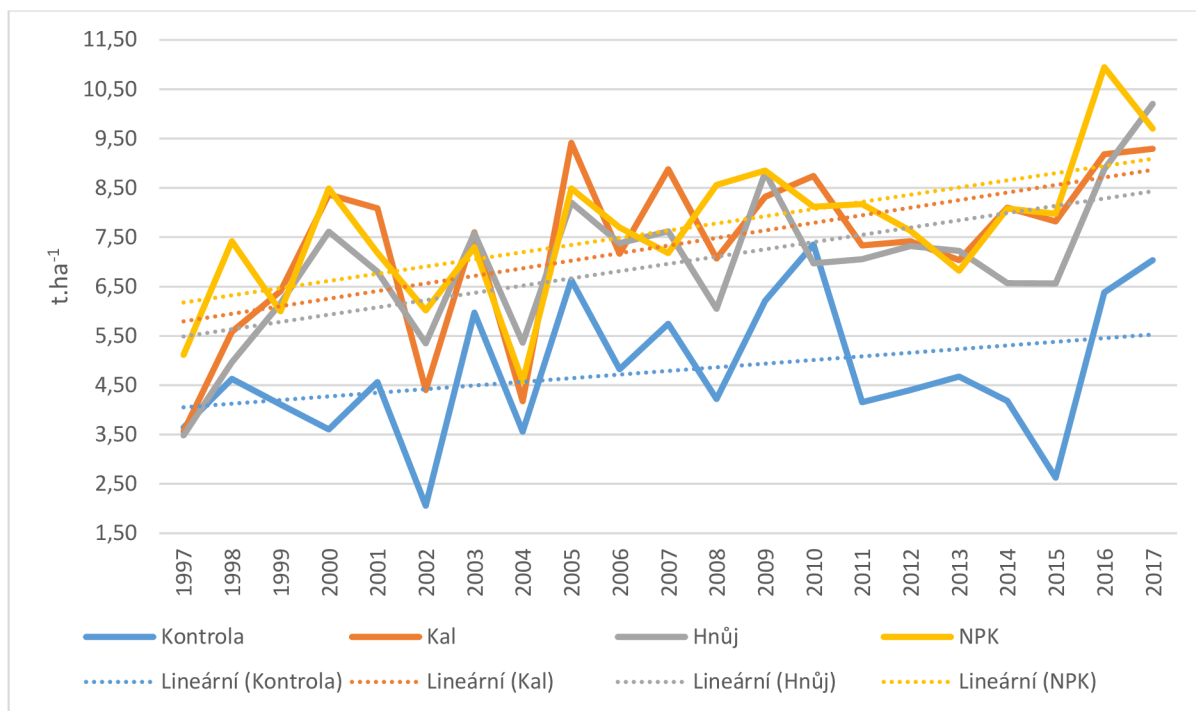
6.2 Výnosy zrna a slámy

6.2.1 Výnos zrna od roku 1997 do 2017 na stanovišti Hněvčeves

Na grafu č. 5 je znázorněn spojnicový graf výnosu zrna na stanici Hněvčeves od první sklizně v roce 1997 do roku 2017. Je možné zaznamenat zvyšující se trend u všech variant. Výkyvy v jednotlivých letech je možné vidět u všech hnojených variant. Nejvyšší podíl na variabilitě výnosů měl pravděpodobně vliv počasí a změny odrůd během pokusu. V tabulce č. 3 je pak procentuální změna mezi průměry z let 1997-1999 a 2015-2017 na stanici Hněvčeves. Data ukazují, že nejvyšší přírůstek měl hnůj, kal, následovalo NPK a nejnižší přírůstek nastal u nehnojené kontroly.

Tabulka č. 3: Změna výnosů zrna (Hněvčeves) mezi průměry z let 1997-1999 a 2015-2017

	Průměr výnosů mezi lety 1997-1999 (t.ha ⁻¹)	Průměr výnosů mezi lety 2015-2017 (t.ha ⁻¹)	Změna výnosů (%)
Kontrola	4,13	5,35	29,5
Kal	5,18	8,77	69,1
Hnůj	4,87	8,55	75,5
NPK	6,18	9,54	54,4



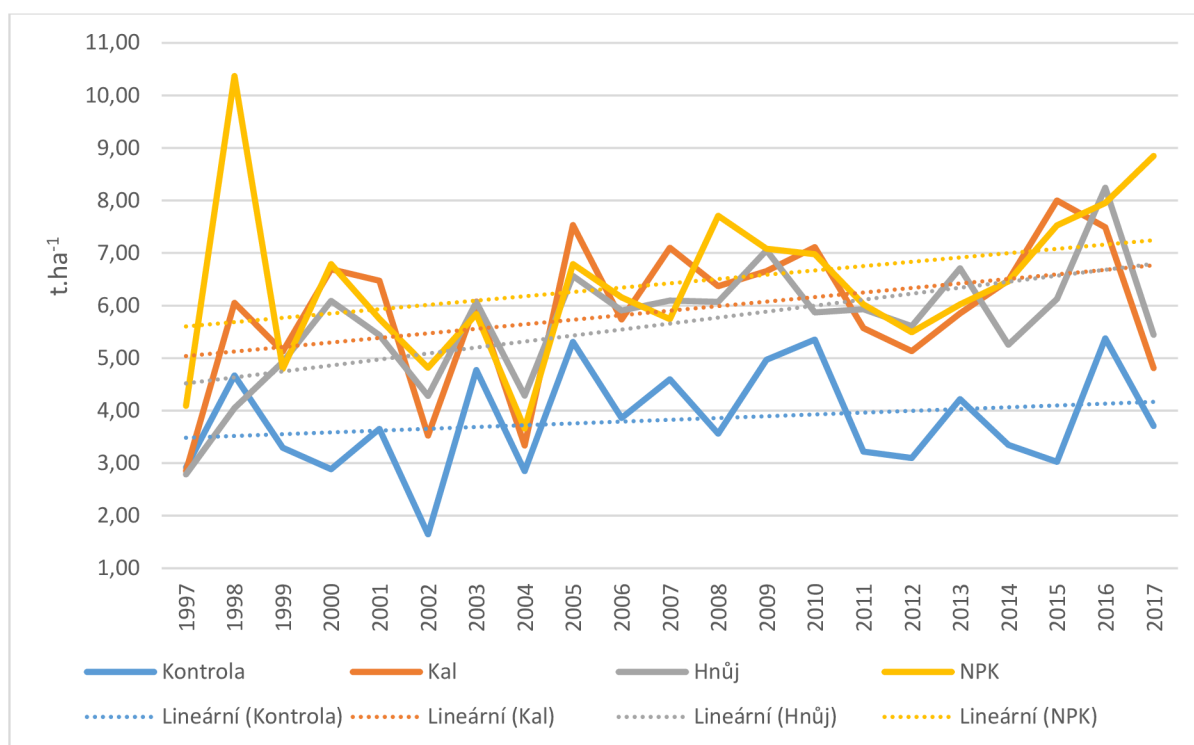
Graf č. 5: Výnos zrna Hněvčeves (t.ha⁻¹)

6.2.2 Výnos slámy od roku 1997 do 2017 na stanovišti Hněvčeves

Graf č. 6 ukazuje výnosy slámy od roku 1997 do roku 2017 na stanovišti Hněvčeves. Trend je podobně jako u výnosu zrna stoupající, jak je znázorněno lineárním proložením jednotlivých křivek. Kromě extrému v roce 1998 u varianty NPK je zvyšující se trend vidět u všech variant. V tabulce č. 4 jsou zaznamenány změny průměru výnosů z let 1997-1999 a 2015-2017. Nejvyšší nárůst výnosu nastal u varianty hnůj. Dále následoval kal, NPK a nejmenší nárůst výnosů byl sledován u kontroly.

Tabulka č. 4: Změna výnosů slámy (Hněvčeves) mezi průměry z let 1997-1999 a 2015-2017

	Průměr výnosů mezi lety 1997-1999 (t.ha ⁻¹)	Průměr výnosů mezi lety 2015-2017 (t.ha ⁻¹)	Změna výnosů (%)
Kontrola	3,63	4,04	11,3
Kal	4,68	6,77	44,7
Hnůj	3,92	6,60	68,4
NPK	6,42	8,11	26,3



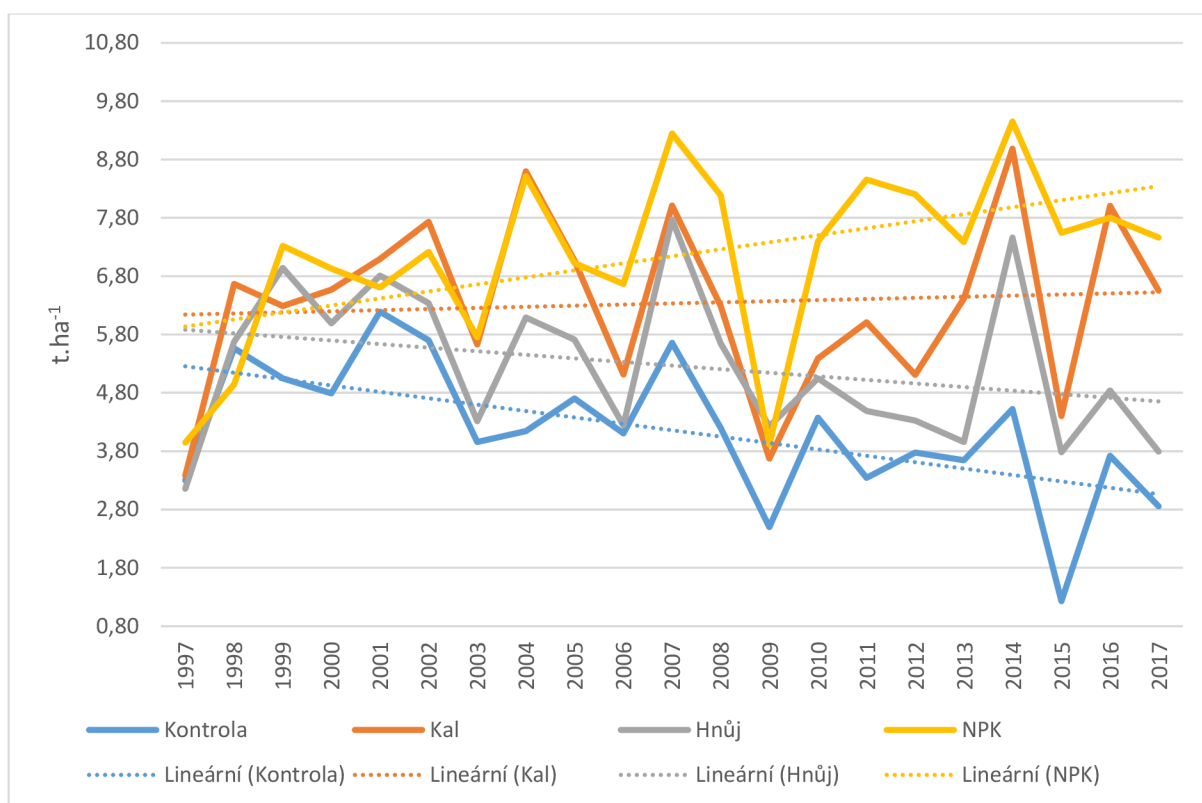
Graf č. 6: Výnos slámy Hněvčeves (t.ha⁻¹)

6.2.3 Výnos zrna od roku 1997 do 2017 na stanovišti Humpolec

Výnos znázorněný na grafu č. 7 má stoupající tendenci hlavně u NPK. Mírně rostoucí spojnicí grafu má varianta kal, naopak varianta hnůj a kontrola vykázala pokles. Z grafu je také vidět, že znovu dochází u všech variant k variabilitě výnosů. Co se týká změny výnosů zrna mezi lety 1997-1999 a 2015-2017, který je zanesen v tabulce č. 5, nastal nejvyšší nárůst u varianty NPK. Dále následovala varianta kal. K poklesu výnosů pak došlo u varianty hnůj a nejvyšší pokles byl změřen u kontroly.

Tabulka č. 5: Změna výnosů zrna (Humpolec) mezi průměry z let 1997-1999 a 2015-2017

	Průměr výnosů mezi lety 1997-1999 (t.ha ⁻¹)	Průměr výnosů mezi lety 2015-2017 (t.ha ⁻¹)	Změna výnosů (%)
Kontrola	4,64	2,60	-43,9
Kal	5,44	6,32	16,1
Hnůj	5,26	4,14	-21,3
NPK	5,40	7,60	40,7



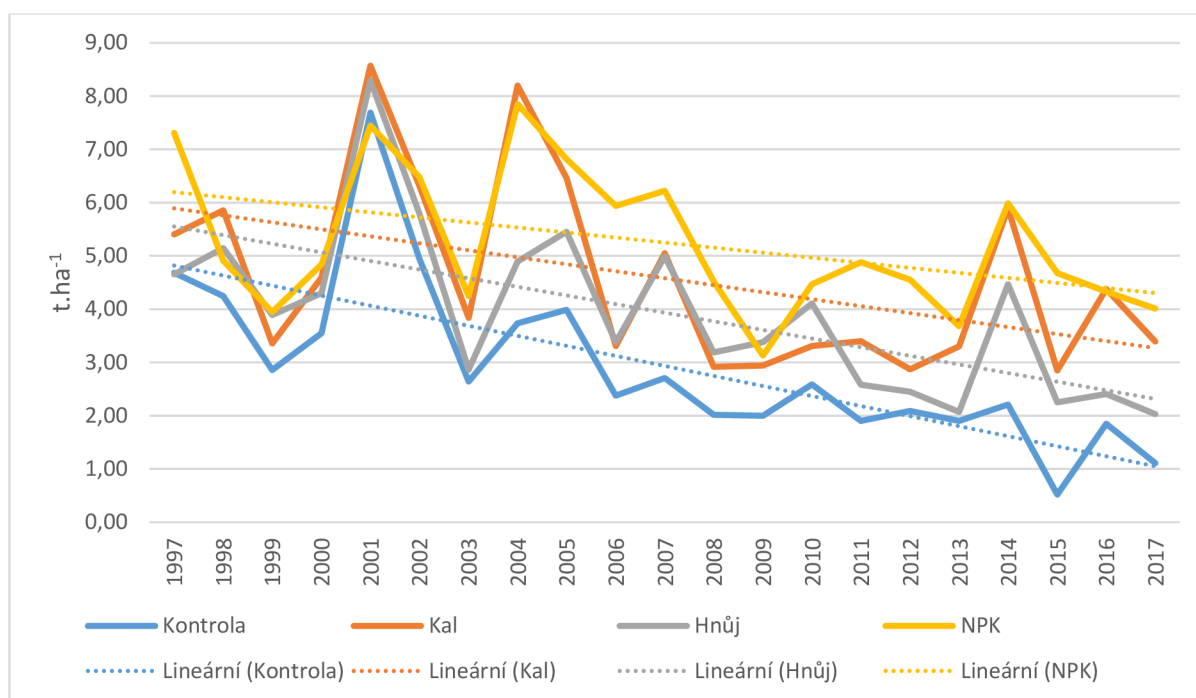
Graf č. 7: Výnos zrna Humpolec (t.ha⁻¹)

6.2.4 Výnos slámy od roku 1997 do 2017 na stanovišti Humpolec

Oproti spíše rostoucí tendenci výnosu zrna u varianty NPK a kal na stanovišti Humpolec, je na grafu č. 8 znázorněn pokles výnosů slámy u všech variant. Spojnice trendů dokazuje pokles u všech hnojených variant i kontroly. V tabulce č. 6 jsou hodnoty změny výnosů slámy mezi průměry let 1997-1999 a 2015-2017. K nejvyššímu procentuálnímu poklesu došlo u kontroly, následovala varianta hnůj, kal a NPK.

Tabulka č. 7: Změna výnosů slámy (Humpolec) mezi průměry z let 1997-1999 a 2015-2017

	Průměr výnosů mezi lety 1997-1999 (t.ha ⁻¹)	Průměr výnosů mezi lety 2015-2017 (t.ha ⁻¹)	Změna výnosů (%)
Kontrola	3,93	1,16	-70,5
Kal	4,87	3,54	-27,3
Hnůj	4,56	2,23	-51,1
NPK	5,39	4,34	-19,4



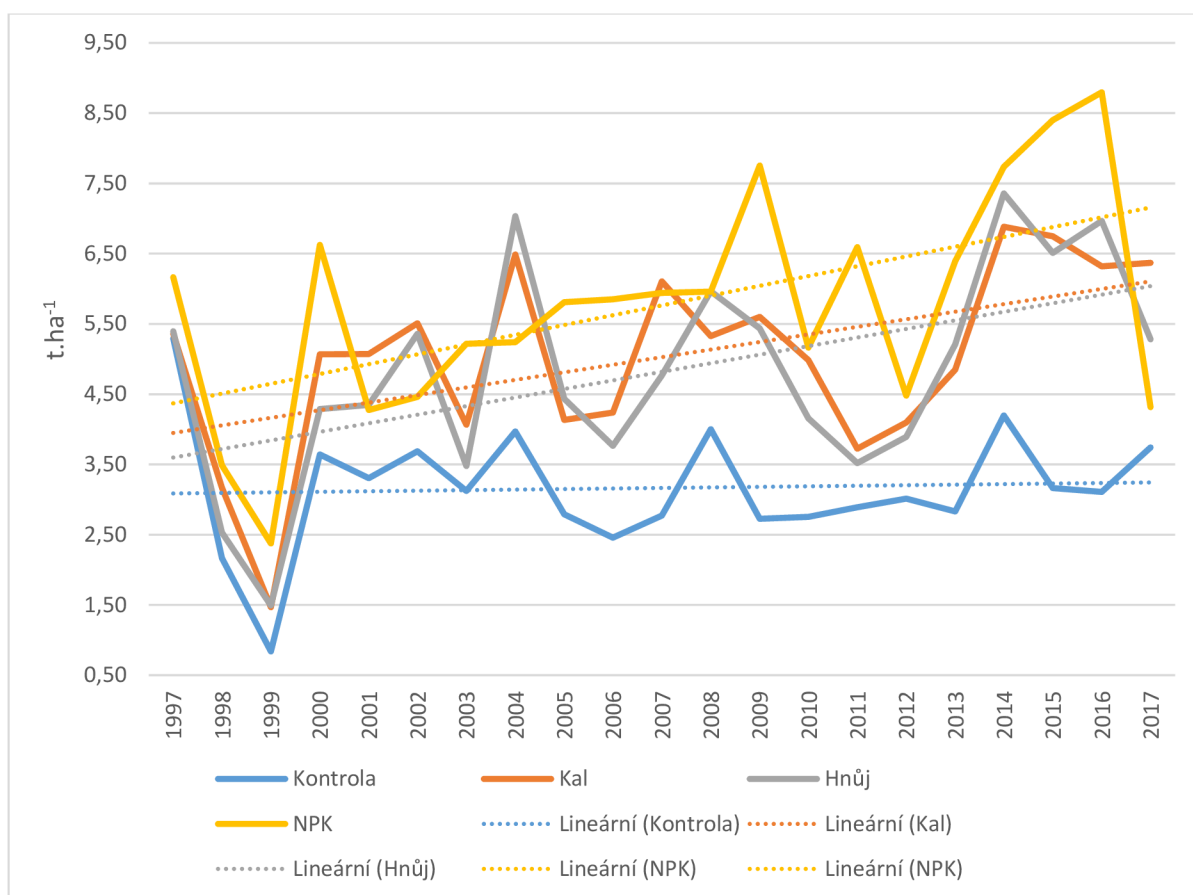
Graf č. 8: Výnos slámy Humpolec (t.ha⁻¹)

6.2.5 Výnos zrna od roku 1997 do 2017 na stanovišti Červený Újezd

Spojnice trendů výnosů zrna od roku 1997 do roku 2017 na stanovišti Červený Újezd ukazují na mírný růst u všech hnojených variant. Kontrola vykazuje spíše neutrální tendenci (graf č. 9). K poklesu a stagnaci u všech hnojených variant došlo až v posledních letech, a to hlavně u NPK, oproti tomu kontrola tento trend nekopírovala. Výkyvy se opakují u všech variant, jen NPK v některých případech měla vyšší extrémy než hnůj a kal. V tabulce č. 7 jsou změny výnosů zrna mezi průměry let 1997-1999 a 2015-2017. Nejvyšší procentuální nárůst je vidět u varianty hnůj, následuje kal, NPK. Nejnižší nárůst nastal u kontroly.

Tabulka č. 7: Změna výnosů zrna (Červený Újezd) mezi průměry z let 1997-1999 a 2015-2017

	Průměr výnosů mezi lety 1997-1999 (t.ha ⁻¹)	Průměr výnosů mezi lety 2015-2017 (t.ha ⁻¹)	Změna výnosů (%)
Kontrola	2,77	3,34	20,7
Kal	3,33	6,48	94,3
Hnůj	3,14	6,25	99,1
NPK	4,01	7,17	78,9



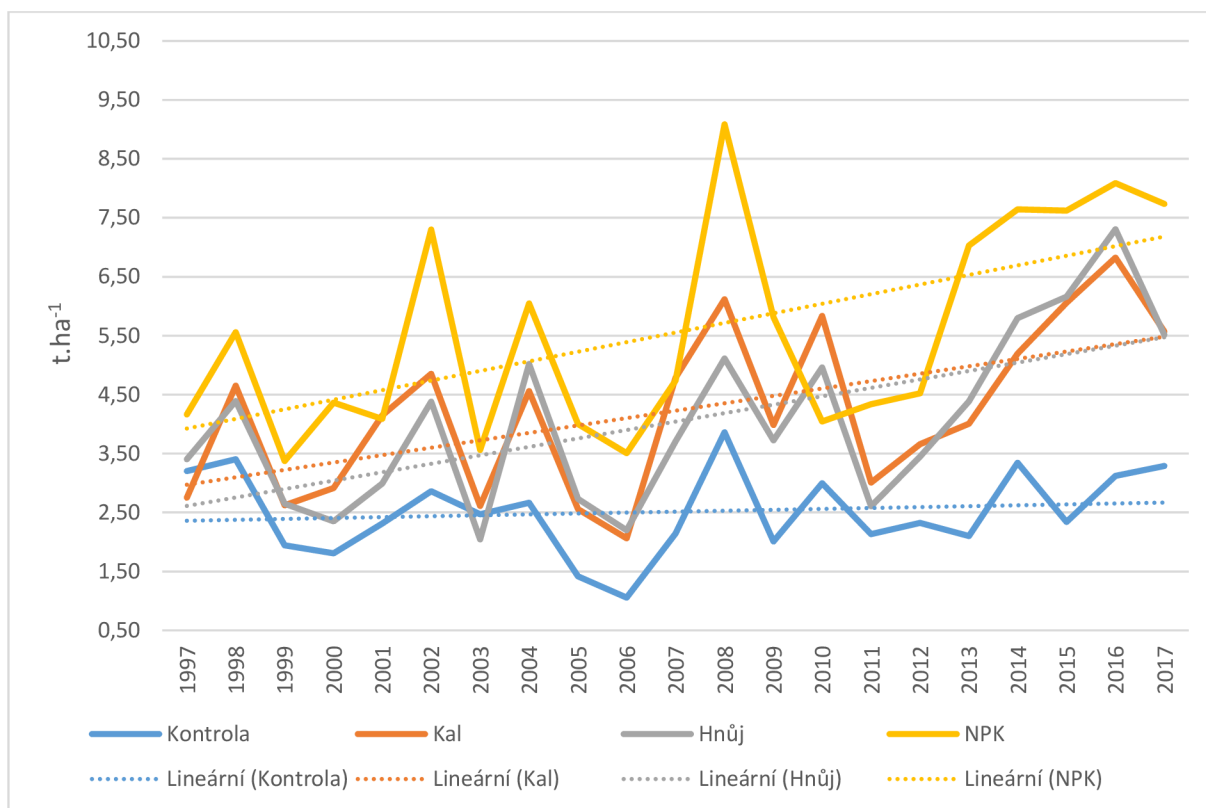
Graf č. 9: Výnos zrna Červený Újezd (t.ha⁻¹)

6.2.6 Výnos slámy od roku 1997 do 2017 na stanovišti Červený Újezd

Na grafu č. 10 je po proložení spojnicí trendů vidět rostoucí trend u hnojených variant, nehnojená kontrola zůstává neutrální. Nejvyšší nárůst je vidět u NPK, varianta kal a hnůj mají vzájemně velmi podobné křivky. Jednotlivé výkyvy výnosů jsou podobné napříč všemi variantami, podobně jako u zrna jsou u NPK vidět vyšší maxima. Při srovnání změny výnosů slámy mezi průměry let 1997-1999 a 2015-2017, což je vyznačeno v tabulce č. 8, došlo u všech variant k nárůstu. Nejvyšší nárůst byl zaznamenán u kalu, následoval hnůj a NPK. U kontroly došlo pouze k velmi nízkému přírůstku.

Tabulka č. 8: Změna výnosů slámy (Červený Újezd) mezi průměry z let 1997-1999 a 2015-2017

	Průměr výnosů mezi lety 1997-1999 (t.ha ⁻¹)	Průměr výnosů mezi lety 2015-2017 (t.ha ⁻¹)	Změna výnosů (%)
Kontrola	2,85	2,92	2,3
Kal	3,34	6,15	84,1
Hnůj	3,48	6,33	81,7
NPK	4,36	7,81	79,0



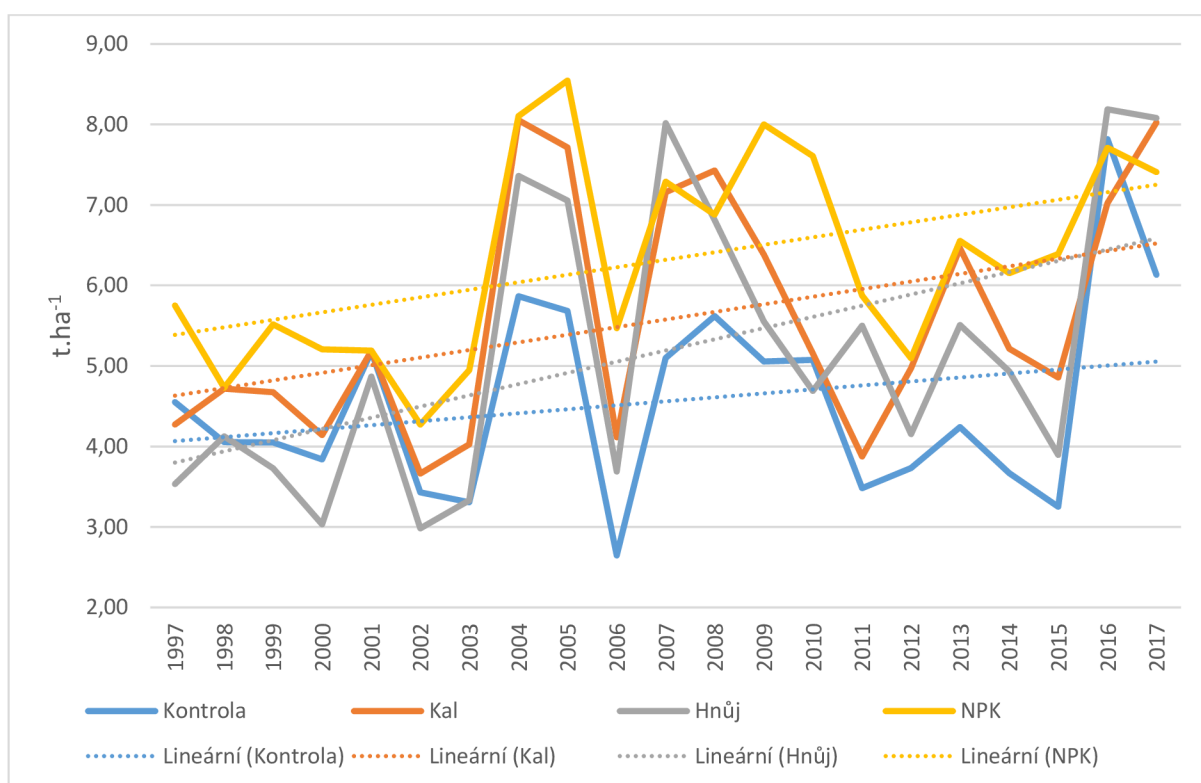
Graf č. 10: Výnos slámy Červený Újezd (t.ha⁻¹)

6.2.7 Výnos zrna od roku 1997 do 2017 na stanovišti Suchdol

Graf č. 11 znázorňuje růst výnosu zrna od roku 1997 do 2017 na stanovišti Suchdol. Nejvyšší nárůst nastal u NPK. Varianty kal a hnůj také vykazují značný růst. Spojnice trendu u kontroly dokazuje spíše mírný růst. Dále jsou v grafu vidět sezónní výkyvy, které se u všech variant v různé intenzitě opakují. V tabulce č. 9 můžeme z uvedené změny výnosů slámy při srovnání průměrů z let 1997-1999 a 2015-2017 vidět, že nejvyšší přírůstek byl zaznamenán u varianty hnůj, následoval kal. Nejnižší změna nastala u NPK podobně jako u kontroly.

Tabulka č. 9: Změna výnosů zrna (Suchdol) mezi průměry z let 1997-1999 a 2015-2017

	Průměr výnosů mezi lety 1997-1999 (t.ha ⁻¹)	Průměr výnosů mezi lety 2015-2017 (t.ha ⁻¹)	Změna výnosů (%)
Kontrola	4,22	5,73	36
Kal	4,56	6,64	45,7
Hnůj	3,79	6,72	77,1
NPK	5,33	7,17	34,4



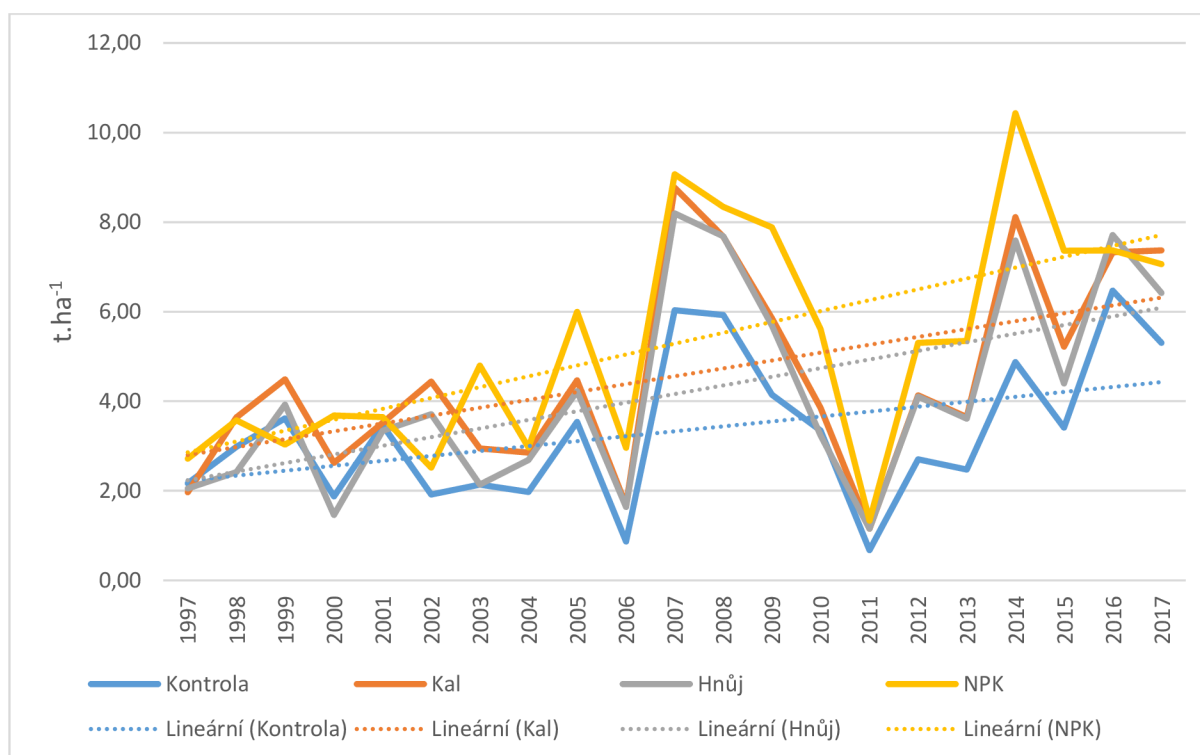
Graf č. 11: Výnos zrna Suchdol (t.ha⁻¹)

6.2.8 Výnos slámy od roku 1997 do 2017 na stanovišti Suchdol

Podobně jako u výnosu zrna, u výnosu slámy ukazuje spojnice trendu u všech variant růst od začátku pokusu (graf č. 12). Nejvyšší růst byl znovu zaznamenán u varianty NPK, následovala varianta kal, a nakonec mírný růst u kontroly. S ohledem na srovnání průměru výnosů mezi lety 1997-1999 a 2015-2017 uvedené v tabulce č. 10, došlo k přírůstku u všech variant. Nejvyšší přírůstek byl u varianty NPK, následoval hnůj a kal. Nejnižší nárůst byl sledován u kontroly.

Tabulka č. 10: Změna výnosů slámy (Suchdol) mezi průměry z let 1997-1999 a 2015-2017

	Průměr výnosů mezi lety 1997-1999 (t.ha ⁻¹)	Průměr výnosů mezi lety 2015-2017 (t.ha ⁻¹)	Změna výnosů (%)
Kontrola	2,92	5,06	73,3
Kal	3,36	6,64	97,2
Hnůj	2,80	6,17	120,7
NPK	3,11	7,26	133,7



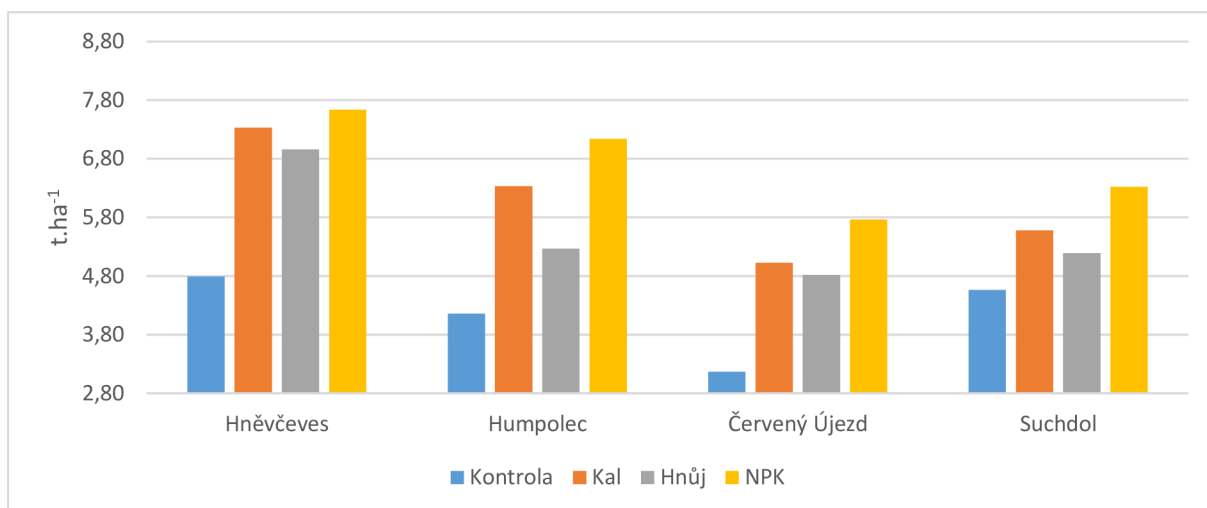
Graf č. 12: Výnos slámy Suchdol (t.ha⁻¹)

6.2.9 Průměrný roční výnos zrna

Jednotlivé hodnoty průměrných ročních výnosů zrna v t.ha⁻¹ jsou zapsány v tabulce č. 11. Na grafu č. 13 je zobrazeno srovnání průměrného ročního výnosu mezi jednotlivými stanovišti. Z grafu č. 13 lze vidět, že nejvyšší výnosy byly zaznamenány u varianty NPK, dále pokračoval kal, hnůj a nehnojená varianta. Výše výnosů se mezi jednotlivými stanovišti lišila, trend u hnojených variant však zůstává stejný. Pouze u stanoviště Suchdol je rozdíl mezi kontrolou a hnojenými variantami nižší než u ostatních stanovišť. Dále u stanoviště Humpolec byl u varianty hnůj vyšší rozdíl vůči kalu a NPK oproti ostatním stanovištím.

Tabulka č. 12: Průměrný roční výnos zrna ($t \cdot ha^{-1}$)

	Hněvčeves	Humpolec	Červený Újezd	Suchdol
Kontrola	4,79 ($\pm 1,4$)	4,16 ($\pm 1,1$)	3,17 ($\pm 0,9$)	4,56 ($\pm 1,2$)
Kal	7,33 ($\pm 1,6$)	6,33 ($\pm 1,5$)	5,03 ($\pm 1,3$)	5,58 ($\pm 1,45$)
Hnůj	6,96 ($\pm 1,4$)	5,27 ($\pm 1,3$)	4,82 ($\pm 1,5$)	5,19 ($\pm 1,7$)
NPK	7,63 ($\pm 1,4$)	7,14 ($\pm 1,5$)	5,76 ($\pm 1,6$)	6,32 ($\pm 1,23$)



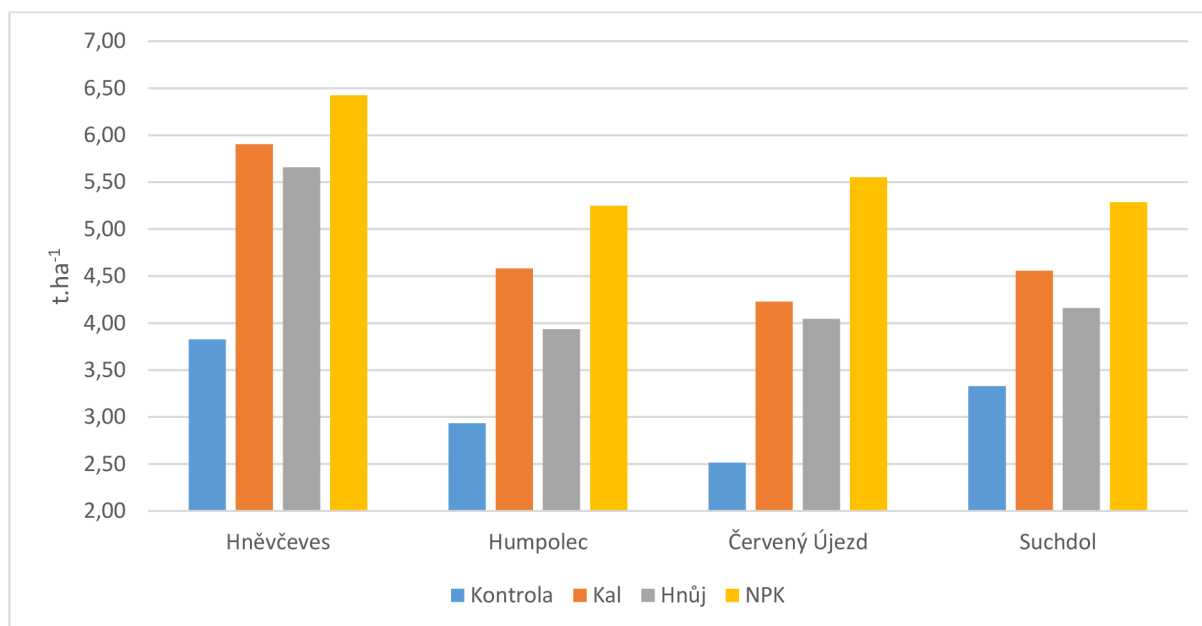
Graf č. 13: Průměrný roční výnos zrna na všech stanovištích ($t \cdot ha^{-1}$)

6.2.10 Průměrný roční výnos slámy

Hodnoty průměrných ročních výnosů slámy jsou zaznamenány v tabulce č. 12. Graf č. 14 znázorňuje srovnání průměrného ročního výnosu slámy pro každé stanoviště. Stejně jako u výnosu zrna je vidět trend, kdy došlo k vysokému výnosu u varianty NPK, následoval kal, hnůj a kontrola u všech stanovišť. Ve srovnání s rokem 1997 na začátku pokusu je výnos slámy vyšší kromě stanoviště Humpolec.

Tabulka č. 12: Průměrný roční výnos slámy (t.ha⁻¹)

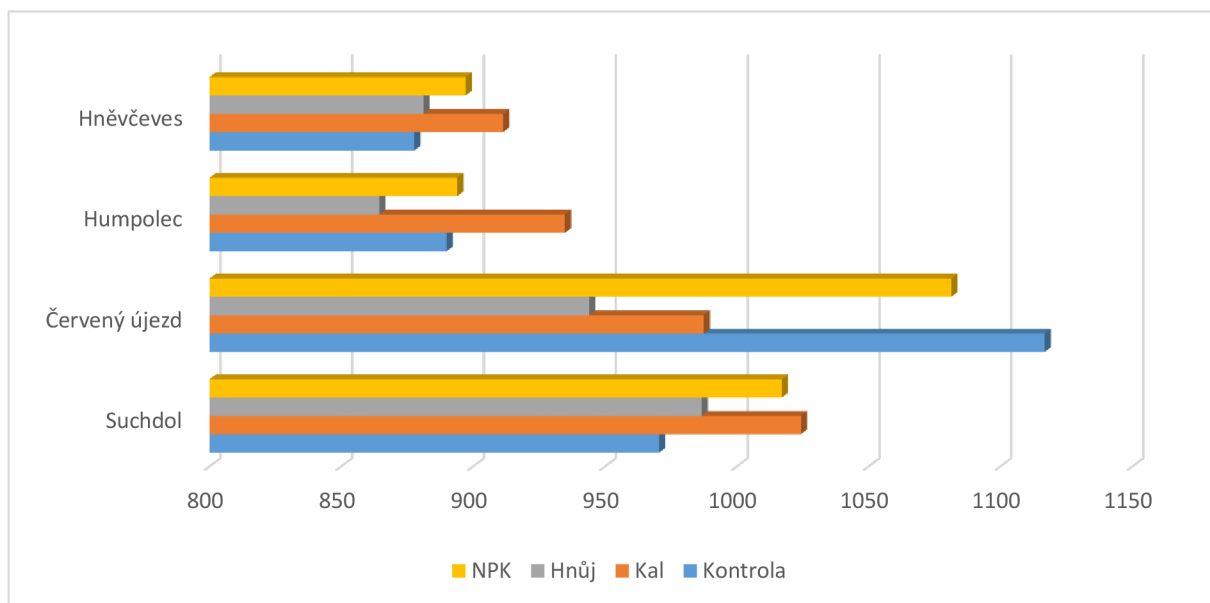
	Hněvčeves	Humpolec	Červený Újezd	Suchdol
Kontrola	3,83 (±1)	2,93 (±1,5)	2,51 (±0,7)	3,33 (±1,6)
Kal	5,90 (±1,4)	4,58 (±1,7)	4,23 (±1,4)	4,56 (±2,2)
Hnůj	5,66 (±1,1)	3,93 (±1,5)	4,04 (±1,4)	4,16 (±2,2)
NPK	6,42 (1,5)	5,25 (±1,3)	5,55 (±1,7)	5,29 (±2,4)



Graf č. 14: Průměrný roční výnos slámy v t.ha⁻¹ na všech stanovištích

6.3 Průměrný obsah hořčíku v zru pšenice ozimé

Z grafu č. 15 lze vidět, že nejvyšší obsahy hořčíku v zrně byly pozorovány na stanovišti Červený Újezd a Suchdol. Celkově vysoké hodnoty hořčíku v zru se však vyskytovaly (kromě stanoviště Červený újezd) hlavně u varianty kal. Na stanovištích Hněvčeves a Humpolec byl průměrný obsah hořčíku v zru po aplikaci jednotlivých variant vyrovnaný.



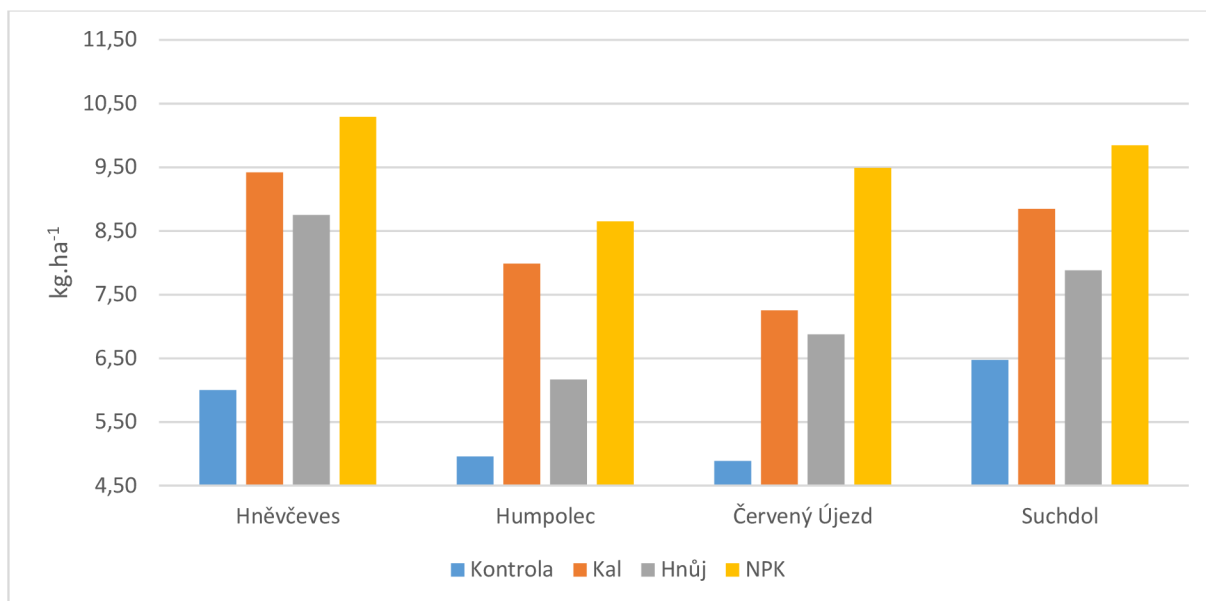
Graf č. 15: Průměrný obsah hořčíku v znu pšenice ozimé mg.kg⁻¹

6.4 Průměrný roční odběr hořčíku rostlinou

Odběr hořčíku byl vypočten na základě výnosu a obsahu Mg v znu a slámě. Tabulka č. 13 a graf č. 16 popisují průměrný roční odběr hořčíku z půdy zrnem a slámou. Nejvíce hořčíku odebrala varianta NPK, následoval kal, hnůj a nakonec kontrola. Z grafu č. 16 je vidět, že se podobný trend opakuje na všech stanovištích. Na stanovišti v Humpolci je však vidět větší rozdíl mezi kalem a hnojem, kdy se odběr hořčíku u varianty kal oproti ostatním stanovištím nejvíce blížil variantě NPK. Nejnižší odběr hořčíku byl u nehnojené varianty na všech stanovištích.

Tabulka č. 13: Průměrný roční odběr hořčíku zrnem a slámou (kg.ha⁻¹)

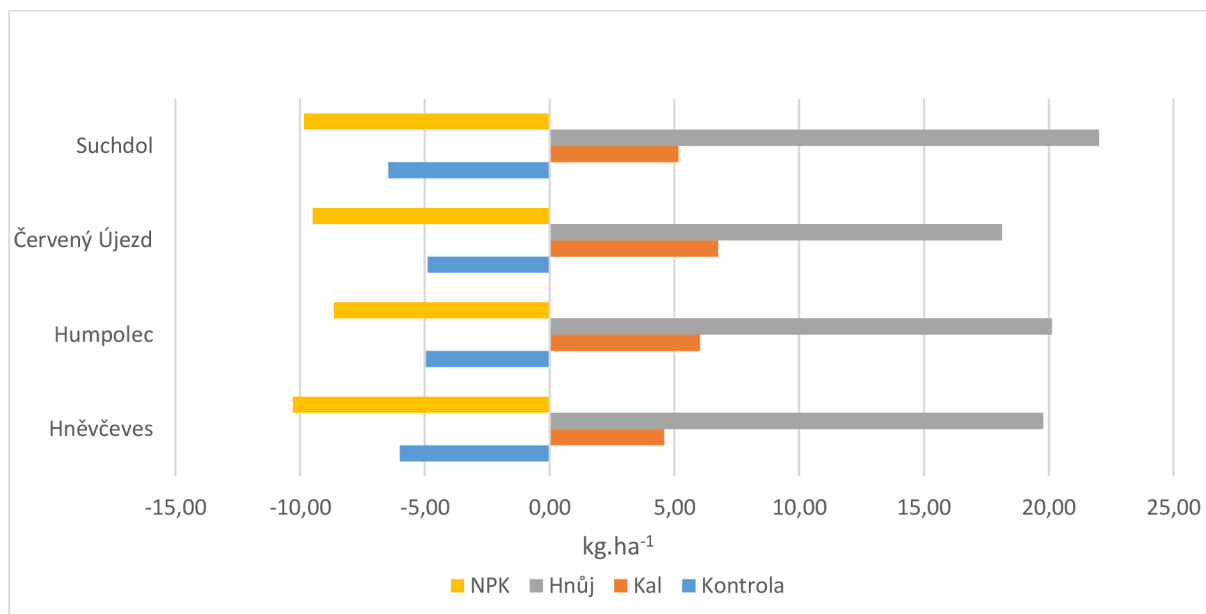
	Hněvčeves	Humpolec	Červený Újezd	Suchdol
Kontrola	6 (±2,05)	4,95 (±1,64)	4,89 (±2,1)	6,47 (±1,67)
Kal	9,42 (±2,84)	7,98 (±2,3)	7,25 (±2,3)	8,84 (±2,71)
Hnůj	8,75 (± 3,27)	6,17 (±2,13)	6,88 (±2,31)	7,88 (±2,6)
NPK	10,29 (±3,07)	8,65 (±1,89)	9,49 (±2,96)	9,84 (±2,27)



Graf č. 16: Průměrný roční odběr hořčíku zrnem a slámou ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

6.5 Roční bilance hořčíku

Na grafu č. 17 je vidět roční bilance mezi hořčíkem dodaným rostlině ve formě hnojení a hořčíkem, který pšenice odebrala. V grafu je vidět opakující se trend, kdy nejvíce hořčíku zůstalo po aplikaci hnoje a následně kalu. K negativní bilanci, a tak i vyčerpání hořčíku, došlo u nehnojené varianty a zejména u NPK.



Graf č. 17: Roční bilance hořčíku ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

7 Diskuze

7.1 Analýza půdy

V první řadě je nutné se podívat na výsledky analýzy půdy. Kolik hořčíku bude v půdě po pěstování sledované plodiny je velmi důležitá hodnota. Vzhledem k tomu, jak velký má vliv na celkový stav půdy, by se neměla přehlížet. V případě této práce byly ve vodném výluhu i Mehlich 3 naměřeny nejnižší hodnoty u varianty NPK. Kromě výjimky na stanovišti Humpolec, kde byly hodnoty srovnatelně nejnižší spolu s kontrolou. K podobným závěrům došli i ve studii Sienkiewicz et al. (2009), kteří sledovali, jaký vliv bude mít použití minerálních hnojiv, hnoje a jejich kombinace na parametry půdy po sklizni rotace cukrové řepy, jarního ječmene, kukuřice a jarní pšenice. V jejich výzkumu se ukázalo, že při kombinaci hnoje a minerálního hnojiva bylo v půdě 2,6krát více dostupného hořčíku než v půdě hnojené minerálním hnojivem. V našem případě sice nedošlo k tak razantním výsledkům, ale i tak je vidět, že jednostranné hnojení NPK bez dodání Mg vede k vyššímu odčerpání hořčíku z půdy než u nehnojené kontroly. Toto zjištění potvrzuje i studie Guo et al. (2016), která tvrdí, že nadměrné užívání minerálních hnojiv NPK má za následek nízkou koncentraci ostatních živin v půdě.

Koncentrace dostupného hořčíku po aplikaci hnoje vyšly napříč metodami jako nejvyšší. Tento fakt potvrzuje studie Hlisenkovský et al. (2019), podle které používání organických hnojiv zvyšuje dlouhodobě kvalitu půdy právě ve smyslu dostupných živin a ostatních půdních vlastností. Navíc Vasileva & Kostov (2015) ve své práci zmiňují vysoké množství kvalitních organických látek, které je při hnojení hnojem do půdy dodáváno. To je dalším pozitivním faktorem při užívání tohoto typu hnojení. Důležité je však zmínit, že zde při jedné z výsledných bilancí došlo k velmi rozdílným výsledkům u vodného výluhu a metody Mehlich 3, a to u stanoviště Humpolec. Metodou Mehlich 3 vyšla velmi kladná bilance, zato metoda vodným výluhem ukázala negativní hodnoty. V tomto případě se nejspíše jedná o nepřesnost metody, je tedy vhodné brát výsledek přesnější metody Mehlich 3. Z tohoto hlediska lze také zmínit velmi vysoké hodnoty bilance u stanice Hněvčevy, kdy je také nutné brát raději hodnoty měřené metodou Mehlich 3. Z výsledků metody Mehlich 3 byla vypočtena kladná bilance, zatímco metodou vodným výluhem bylo dosaženo negativních hodnot. Vodným výluhem jsou stanoveny obsahy okamžitě přístupných živin, které se mohou v rámci

jednotlivých sezón značně lišit. Metoda Mehlich 3 naopak stanoví i stabilnější formy Mg, a proto jsou její výsledky z hlediska výpočtů bilancí reprezentativnější.

Hnojení variantou kal vykazovalo dobré výsledky dostupného hořčíku v půdě po sklizni pšenice. Na většině stanovišť bylo dokonce srovnatelné s hnojem. Potvrzuje se tak tvrzení Hýblerová (2005), která říká, že kromě zvýšení dostupného dusíku došlo po aplikaci kalů také k navýšení ostatních živin jako je hořčík. Na jednom stanovišti Humpolec však byla u varianty kal vypočtena neutrální bilance Mg. To bylo pravděpodobně způsobeno lokálními podmínkami.

Na některých stanovištích ukázala pozitivní bilanci dostupného hořčíku nehnojená kontrola, to je zřejmě dáno vyšší kvalitou těchto půd (již na začátku pokusu obsahovaly více minerálů). Postupným zvětráváním minerálů tak pravděpodobně docházelo k uvolňování Mg do půdy. Další příčinou pozitivní bilance u kontroly může být fakt, že bez hnojení rostlina poskytne nižší výnosy a nevyužije většinu dostupného Mg.

7.2 Výnosy

Dle předpokladů došlo k nejvyšším výnosům u varianty NPK napříč všemi stanovišti. U výnosů zrna vykazuje průměrně nejvyšší hodnoty NPK i podle jiných zdrojů, například Hlisnikovský et al. (2019) nebo Černý et al. (2010). Zejména dusík je limitním faktorem výnosů, proto i hnojivo NPK zapříčinilo nejvyšší výnosy (Hřivna 2012). Druhé nejvyšší výnosy měla varianta kal a následoval hnůj. V podobném pořadí vyšly výnosy i například ve výzkumu Černý et al. (2010), avšak co se týká průměrných výnosů zrna, výsledky u variant kal a hnůj byly dle této studie výrazně lepší. Průměrné výnosy slámy dopadly podobně jako výnosy zrna, s rozdílem celkově nižších hodnot. Tyto nižší hodnoty byly zřejmě důsledkem vybraných odrůd pro vyšší výnos zrna. Dle Dai et al. (2016) existují odrůdy pro vyšší výnos slámy (například pro výrobu bioethanolu) nebo vyšší výnos zrna (pro potravinářské účely). Dalším možným vysvětlením tohoto úkazu je použití moderních odrůd, které na rozdíl od starších tvoří méně slámy a více zrna (Bruening & Lee 2013).

Výsledky ze spojnicových grafů na jednotlivých stanovištích od začátku pokusu do roku 2017 ukazují na růst u všech hnojených variant. Nejvyšší růst dosáhla varianta NPK, následuje kal a hnůj. Trend růstu výnosů zrna následuje stejný trend růstu výnosu slámy. Je tak možné počítat s tím, že mezi těmito veličinami existuje určitá spojitost, i když míra tvorby biomasy a

zrna je spíše připisována indexu zrno/sláma určenému pro různé odrůdy (Narasimhalu et al. 1998). Výjimka růstu výnosů je stanoviště Humpolec. Zde má u výnosu zrna klesající tendenci hnůj. Hnůj však zlepšuje vlastnosti hlavně na písčitých půdách, což platí i pro stanoviště Humpolec (Zeidan & Kramany 2001). Možné východisko je dlouhodobost účinku hnoje, kdy doba pokusu byla stále krátká na to, aby hnůj ovlivnil výnosovou křivku. Kromě toho zde také u výnosů slámy jako na jediném stanovišti došlo ke klesající tendenci všech výnosů. Vzhledem ke špatným vlastnostem půdy pšenice zřejmě dávala přednost tvorbě zrna před tvorbou slámy (Vaněk et al. 2016).

Výkyvy, které se vyskytují u všech variant, a to i u kontroly, jsou dány suchem nebo vyšším množstvím srážek v daných sezónách. Dle Zampieri et al. (2017) mají zásadní vliv na výnos pšenice. Rozdílná hodnota extrémů pak ukazuje, jak na vnější vlivy působí různé varianty hnojení.

7.3 Obsah hořčíku v pšenici

Na třech stanovištích kromě Červeného Újezdu byl nejvyšší obsah hořčíku v zrnu pšenice hnojené variantou kal. To znamená, že vzhledem k dobré koncentraci minerálů dokázala pšenice hořčík z kalu využít (Hýblerová 2005). Mimo to navíc kal obsahuje i organické sloučeniny, takže možná kombinace těchto dvou vlastností byla příčinou dobrých výsledků hořčíku v zrnu – kombinace minerálních a organických hnojiv v mnoha studiích vykazuje nejlepší výsledky (Sienkiewicz et al. 2009). Další výhodou je, že kal je odpad a tímto se v podstatě recykluje (Brandt et al. 2003). Nevýhodou však je možná kontaminace prostředí, vzhledem k velkému množství nebezpečných látek, které se v něm mohou vyskytovat (Fijalkowski et al. 2017). Proto je nutné dbát na kvalitní a přísně kontrolovaný kal.

V této analýze měla nejvyšší koncentraci napříč stanovišti varianta NPK. Fakt, že minerální hnojiva kladně působí na příjem dalších neaplikovaných živin, je podpořen například studií Kumar et al. (2009).

Je ale nutné podotknout, že celkově byly obsahy v zrnu vyrovnané. Proto je biofortifikace půdním hnojením považována za méně účinnou metodu, než biofortifikace genetická (Rawat et al. 2013). Vhodnější také může být biofortifikace pomocí foliárních hnojiv (Ramzan et al. 2020). Ve výzkumu Oury et al. 2006 se vyskytují hodnoty hořčíku mezi různými odrůdami mezi 894 mg.kg⁻¹ a 1406 mg.kg⁻¹ u pšenice seté. Celkově jsou obsahy spíše nižší, a

to hlavně z důvodu použití moderních odrůd pro výnos zrna. V moderních odrůdách se vyskytuje zhruba 1170 mg.kg^{-1} oproti původním odrůdám, kde bylo průměrně 1340 mg.kg^{-1} . V této práci byl průměrný obsah Mg u všech analýz a stanovišť 955 mg.kg^{-1} , což má za příčinu výběr odrůd pro vysoký výnos zrna a následné „naředění“ obsahu Mg výnosem (Rosanoff 2013).

7.4 Průměrný roční odběr a bilance hořčíku

Výsledky průměrného ročního odběru korespondují s tím, co vyšlo při analýze půdy a obsahu Mg v zrně a slámě. Nejvíce hořčíku bylo z půdy odebráno pšenicí hnojenou minerálním hnojivem NPK. Nejvíce hořčíku v půdě v roční bilanci zůstávalo u hnoje následovaného variantou kal, což jsou dvě varianty obsahující doplňující hořčík. Díky tomu lze očekávat, že půda hnojená těmito variantami zajistí z hlediska Mg dlouhodobě kvalitu produkce, a to i díky obsahu aplikované organické složky (Hlisnikovský et al. 2019).

8 Závěr

Cílem diplomové práce bylo sledování změn obsahů různých forem hořčíku v půdě dlouhodobě hnojené různými systémy hnojení (čistírenský kal, hnůj, NPK, nehnojená kontrola). Dalším cílem bylo vyhodnocení výnosů pšenice. Dále byl sledován vliv hnojení na vybraný kvalitativní parametr – obsah Mg v zrna a jeho odběr.

Obsahy okamžitě přístupného a potenciálně přístupného obsahu Mg v půdě vykazovaly na většině stanovišť tendence k vyšším hodnotám na variantách hnojených organickými hnojivy (kal, hnůj) ve srovnání s kontrolou a NPK. To se projevilo na bilancích Mg v půdě, kde byla u varianty NPK zjištěna častěji horší bilance Mg než u nehnojené kontroly.

Nejvyšší výnosy zrna i slámy v průběhu celého pokusu (bez ohledu na stanoviště) byly zaznamenány zpravidla u varianty NPK. Organicky hnojené varianty vykazovaly podobné výsledky, vždy vyšší než kontrola.

U všech variant hnojení byly průměrné hodnoty obsahů Mg v rostlině vyrovnané na všech stanovištích. Tendenci vyššího obsahu Mg na většině stanovišť měla varianta kal.

Nejvyšší průměrný odběr Mg rostlinou se napříč stanovišti opakoval u varianty NPK, naopak nejnižší odběr vykazovala nehnojená kontrola. Co se týká bilance Mg mezi hořčíkem rostlině dodaným a hořčíkem rostlinou odebraným, dosahovala organická hnojiva (hlavně varianta hnůj) kladných hodnot na všech sledovaných stanovištích. Oproti tomu u kontroly a NPK byla sledována negativní bilance, v případě NPK zdaleka nejnižší.

Aplikace NPK vedla sice k nejvyšším výnosům, avšak zároveň zde docházelo i k nejvyššímu odčerpání Mg z půdy, a to dokonce vyššímu než u nehnojené kontroly. Z dlouhodobého hlediska se tak jako udržitelnější jeví varianty kal a hnůj, kterými byl doplněn hořčík. I když dosahovala oproti variantě hnůj vyšších výnosů, může být varianta kal problematická z hlediska současného vstupu rizikových látek, a proto je třeba další výzkum. Obsahy Mg v zrna pšenice nebyly variantami hnojení výrazně ovlivněny. Proto je z pohledu případné biofortifikace třeba hledat jiné cesty.

9 Seznam literatury

- Bruening B, Lee Ch. 2013. Cereal Straw Production. Kentucky Cooperative Extension, Kentucky. Available from <https://www.uky.edu/ccd/sites/www.uky.edu.ccd/files/straw.pdf> (accessed April 2022)
- Borg S, Brown JKM, Holm PB, Menguer PK, Miller AJ, Podar D, Sanders D, Vincent T, Vincze E. 2018. Improving zinc accumulation in cereal endosperm using HvMTP1, a transition metal transporter. *Plant Biotechnology Journal* **16**:63–71 DOI: <https://doi.org/10.1111/pbi.12749>
- Bouis HE. 2000. Improving Human Nutrition through Agriculture: The Role of International Agricultural Research. Conference Summary and Recommendations. *Food and Nutrition Bulletin* **21**:351—576 DOI: <https://doi.org/10.1177/156482650002100441>
- Brandt KK, Grøn C, Henriksen K, Krogh PH, Mortensen GK, Madsen T, Petersen SO, Petersen J, Sørensen J. 2003. Recycling of sewage sludge and household compost to arable land: fate and effects of organic contaminants, and impact on soil fertility. *Soil and Tillage Research* **72**(2):139-152. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00084-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00084-9)
- Brinch-Pederson H, Olesen A, Rasmussen SK, Holm PB. 2000. Generation of transgenic wheat (*Triticum aestivum* L.) for constitutive accumulation of an *Aspergillus* phytase. *Molecular Breeding* **6**:195—206. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1009690730620>
- Broadley MR, White PJ. 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. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x>
- Cakmak I, Kirkby EA. 2008. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiologia Plantarum* **133**:692-704. DOI: [10.1111/j.1399-3054.2007.01042.x](https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.01042.x)
- Cakmak I. 2013. Magnesium in crop production, food quality and human health. *Plant and Soil* **368**:1-4. DOI: [10.1007/s11104-013-1781-2](https://doi.org/10.1007/s11104-013-1781-2)
- Carminati A, Vetterlein D. 2013. Plasticity of rhizosphere hydraulic properties as a key for efficient utilization of scarce resources. *Annals of Botany* **112**:277-290. DOI: [10.1093/aob/mcs262](https://doi.org/10.1093/aob/mcs262)

- Cobalchin F, Finotti L, Manni F, Modena A, Panozzo, A, Vameralli T, Volpato M. 2021. Biofortification of Common Wheat Grains with Combined Ca, Mg, and K through Foliar Fertilisation. *Agronomy* **11**:1718. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11091718>
- Colangelo EP, Guerinot ML. 2006: Put the metal to the petal: metal uptake and transport throughout plants. *Current Opinion in Plant Biology* **9**:322—330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2006.03.015>
- Černý J, Balík J, Kulhánek M, Čásová K, Nedvěd V. 2010. Mineral and organic fertilization efficiency in long-term stationary experiments. *Plant Soil Environ.* **56**:28-36. DOI: <https://doi.org/10.17221/200/2009-PSE>
- Černý J, Shejbalová Š, Kovařík J, Kulhánek M. 2014. Předseťové a podzimní hnojení pšenice ozimé. *agromanual.cz*, Praha. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/predsetove-a-podzimni-hnojeni-psenice-ozime> (accessed April 2022)
- Čížková S. 2009. Hořčík a jeho význam ve výživě [MSc. Thesis]. Masarykova univerzita, Brno
- Dai J, et al. 2016. Harvest index and straw yield of five classes of wheat. *Biomass and Bioenergy* **85**:223-227 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.023>
- Das S, Chaki AH, Hossain A. 2019. Breeding and agronomic approaches for biofortification of zinc in wheat (*Triticum aestivum* L.) to combat the zinc deficiency in millions: A Bangladesh perspective. *Acta Agrobot* **72**(2):1-13. DOI: <https://doi.org/10.5586/aa.1770>
- El-Nour E-ZAAA, Shaaban M. 2012. Response of Wheat Plants to Magnesium Sulphate Fertilization. *American Journal of Plant Nutrition and Fertilization Technology* **2**:56-63. DOI: [10.3923/ajpnft.2012.56.63](https://doi.org/10.3923/ajpnft.2012.56.63)
- El-Metwelly AE, Abdalla, FE, El-Saady AM, Safina S, Ei-sawy SS. 2010. Response of Wheat to Magnesium and Copper Foliar Feeding under Sandy Soil Condition. *Journal of American Science* **6**:818-823.
- EXCEL. Microsoft Office Excel 2007. Microsoft office Enterprise 2007. USA. release SP2
- Eichert T, Kurtz A, Steiner U, Goldbach HE. 2008. Size exclusion limits and lateral heterogeneity of the stomatal foliar uptake pathway for aqueous solutes and water-suspended nanoparticles. *Physiologia Plantarum* **134**:151-160. DOI: [10.1111/j.1399-3054.2008.01135.x](https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01135.x)
- FAO. 2002. Chapter 14. Magnesium. FAO/WHO, Rome. Available from <http://www.fao.org/3/Y2809E/y2809e0k.htm> (accessed April 2022)

- Fijalkowski K, Grobelak A, Kacprzak MJ, Rorat A. 2017. The presence of contaminations in sewage sludge – The current situation. *Journal Of Environmental Management* **203**(3):1126-1136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.068>
- Führs H, Gerendás J. 2013. The significance of magnesium for crop quality. *Plant and Soil* **368**:101-128. DOI: [10.1007/s11104-012-1555-2](https://doi.org/10.1007/s11104-012-1555-2)
- Gaj R, Górski D. 2013. Effects of different phosphorus and potassium fertilization on contents and uptake of macronutrients (N, P, K, Ca, Mg) in winter wheat. *Journal of Elementology* **18**:55-67. DOI: [10.5513/JCEA01/15.4.1528](https://doi.org/10.5513/JCEA01/15.4.1528)
- Garg M, Arora P, Chunduri V, Kapoor P, Kumar A, Sharma N, Sharma S. 2018. Biofortified Crops Generated by Breeding, Agronomy, and Transgenic Approaches Are Improving Lives of Millions of People around the World. *Frontiers in Nutrition* **5**. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00012>
- Gliński J, Horabik J, Lipiec J. 2011. *Encyclopedia of Agrophysics (Soil Phases)*, gao Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_151
- Gómez-Galera S, Rojas E, Sudhakar D, Zhu Ch, Pelacho AM, Capell T, Christou P. 2010. Critical evaluation of strategies for mineral fortification of staple food crops. *Transgenic Research* **19**:165–180. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11248-009-9311-y>
- 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. DOI: [10.1007/s11104-012-1567-y](https://doi.org/10.1007/s11104-012-1567-y)
- Guo W, Nazim H, Liang Z, Yang D. 2016. Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. *Crop Journal*, **4**:83-91. DOI: [10.1016/j.cj.2015.11.003](https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.11.003)
- Graham RD, Welch RM, Bouis HE. 2001. Addressing micronutrient malnutrition through enhancing the nutritional quality of staple foods: principles, perspectives and knowledge gaps. *Advances in Agronomy* **70**:77–142. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(01\)70004-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(01)70004-1)
- Haraminac E. 2012. Magnesium is essential to good health. Michigan State University, Michigan. Available from https://www.canr.msu.edu/news/magnesium_is_essential_to_good_health (accessed April 2022)

- Hell R, Stephan UW. 2003. Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants. *Planta* **216**:541–551 DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-002-0920-4>
- Hlisnikovský L, Čermák P, Kunzová E, Bartlóg P. 2019. The effect of application of potassium, magnesium and sulphur on wheat and barley grain yield and protein content. *Agronomy Research* **17**:1905-1917. DOI: [10.15159/ar.19.182](https://doi.org/10.15159/ar.19.182)
- Hřivna L. 2012. Výživa a hnojení porostů pšenice ozimé a kvalita produkce. Šlechtitelské listy, Brno. Available from http://farmseed2.druvod.cz/files/aktuality/vyziva_a_hnojeni_porostu_psenice_ozime_a_kvalita_produkce.pdf (accessed April 2022)
- Hussain A, Larsson H, Kuktaite R, Johansson E. Mineral Composition of Organically Grown Wheat Genotypes: Contribution to Daily Minerals Intake. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **7**:3442-3456 DOI: [10.3390/ijerph7093442](https://doi.org/10.3390/ijerph7093442)
- Hýblerová K. 2005. Hnojivé účinky čistírenských kalů pro topoly. České sdružení pro biomasu Available from <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/hnojive-ucinky-cistirenskych-kalu-pro-topoly> (accessed April 2022)
- Chattha MU, et al. 2017. Biofortification of Wheat Cultivars to Combat Zinc Deficiency. *Frontiers in Plant Science* **8**. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00281>
- Chwil S. 2014. Effects of foliar feeding under different soil fertilization conditions on the yield structure and quality of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta Agrobotanica* **67**:135-144. DOI: [10.5586/aa.2014.059](https://doi.org/10.5586/aa.2014.059)
- Kapanen A, Vikman M, Johanna Rajasärkkä J, Virta M, Itävaara M. 2013. Biotests for environmental quality assessment of composted sewage sludge. *Waste Management* **33**(6):1451-1460 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.02.022>
- Kobayashi H, Masaoka Y, Sato S. 2005. Effects of excess magnesium on the growth and mineral content of rice and *Echinochloa*. *Plant Production Science*, **8**:38-43. DOI: [10.1626/pps.8.38](https://doi.org/10.1626/pps.8.38)
- Kumar SA, Sarkar AK, Kumar A, Singh BP. 2009. Effect of Long-term Use of Mineral Fertilizers, Lime and Farmyard Manure on the Crop Yield, Available Plant Nutrient and Heavy Metal Status in Acidic Loam Soil. *Journal of the Indian Society of Soil Science* **57**(3): 362-365
- Lamastra L, Suciú NA, Trevisan M. Sewage sludge for sustainable agriculture: contaminants' contents and potential use as fertilizer. 2018. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* **5**: 10. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-018-0122-3>

- 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.
DOI: 10.1080/00103627909366991
- Malmborg J, Magnér J. 2015. Pharmaceutical residues in sewage sludge: Effect of sanitization and anaerobic digestion. *Journal of Environmental Management* **153**:1-10.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.041>
- Mayland HF, Wilkinson SR. 1989. Soil factors affecting magnesium availability in plant–animal systems: a review. *Journal of Animal Science* **67**:3437-3444.
DOI: 10.2527/jas1989.67123437x
- Mengutay M, Ceylan Y, Kutman UB, Cakmak I. 2013. Adequate magnesium nutrition mitigates adverse effects of heat stress on maize and wheat. *Plant and Soil* **368**:57-72.
DOI: 10.1007/s11104-013-1761-6
- Narasimhalu P, Kong D, Choo TM. Straw yields and nutrients of seventy-five Canadian barley cultivars. *Canadian Journal of Animal Science* **78**(1):127-134. DOI: <https://doi.org/10.4141/A97-020>
- Niyigaba E, Twizerimana A, Mugenzi I, Ngnadong WA, Ye, YP, Wu BM, Hai JB. 2019. Winter Wheat Grain Quality, Zinc and Iron Concentration Affected by a Combined Foliar Spray of Zinc and Iron Fertilizers. *Agronomy* **9**:250. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy9050250>
- Noori M, Mobasser H, Rigi K, Heidari M, Keykha A. 2014. Effects of mycorrhiza and nitrogen fertilizer on quantitative traits of wheat. *Journal of Novel Applied Sciences* **3**:295-297.
- Nozoye T, Nicolaus von Wirén, Sato Y, Higashiyama T, Nakanishi H, Nishizawa NK. 2019. Characterization of the Nicotianamine Exporter ENA1 in Rice. *Frontiers in Plant Science* **10**. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00502>
- Oury FX, Balfourier F, Duperrier B, Chanliaud E, Charmet G, Leenhardt F, Rémésy C. 2006. Genetic variability and stability of grain magnesium zinc and iron concentrations in bread wheat. *European Journal of Agronomy* **25**(1):177-185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.04.011>
- Ornstová M. 2008. Makroelementy ve výživě [BSc. Thesis]. Masarykova univerzita, Brno
- Parnes. 2013. Chapter 15: Magnesium. Northeast Organic Farming Association. Available from <https://www.nofa.org/soil/html/magnesium.php> (accessed April 2022)

- Pavlu L. 2018. Základy Pedologie a Ochrany Půdy. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Pataco IM, et al. 2017. Biofortification of durum wheat (*Triticum turgidum* L. ssp. durum (Desf.) Husnot) grains with nutrients. *Journal of Plant Interactions* **12**:526-532. DOI: <https://doi.org/10.1080/17429145.2016.1278049>
- Ramzan Y, Ahmad J, Batool S, Hafeez MB, Khan S, Nadeem M, Saleem-ur-Rahman. 2020. Biofortification with Zinc and Iron Improves the Grain Quality and Yield of Wheat Crop. *International Journal of Plant Production* **14**:501–510. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00100-w>
- Rawat N, Dhaliwal HS, Neelam K, Tiwari VK. 2013, Biofortification of cereals to overcome hidden hunger. *Plant Breed* **132**:437-445. DOI: <https://doi.org/10.1111/pbr.12040>
- Richter R. 2004. Význam makroelementů: HOŘČÍK. Ústav agrochemie a výživy rostlin, Brno. Available from http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/biogenni_prvky/a_index_biogen.htm (accessed April 2022)
- Rosanoff. 2013. Changing crop magnesium concentrations: impact on human health. *Plant and Soil* **368**:139–153. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1471-5>
- Hlušek J, Richter R, Fryščáková E, Ryant P. 1994. Výživa a hnojení rostlin. VŠZ, Brno
- Senbayram M, Gransee A, Wahle V, Thiel, H. 2015. Role of magnesium fertilisers in agriculture: Plant-soil continuum. *Crop and Pasture Science* **66**:1219-1229.
- Sienkiewicz S, Krzebietke SJ, Omilian M, Wojnowska T, Żarczyński P. 2009. Effect of long-term differentiated fertilization with farmyard manure and mineral fertilizers on the content of available forms of P, K and Mg in soil. *Journal of Elementology* **14**: 779-786. DOI: <https://doi.org/10.5601/jelem.14.4.779-786>
- Singh RP, Agrawal M. 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge, *Waste Management* **28**(2):347-358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.010>
- Šebánek J, Sladký Z, Procházka S. 1983. Experimentální morfologie rostlin. Academia, Praha
- Škarpa P, Ryant P, Antošovský J. 2016. Základní hnojení pšenice ozimé. [agromanual.cz](https://www.agromanual.cz), Praha. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/predsetove-a-podzimni-hnojeni-psenice-ozime> (accessed April 2022)

- Škarpa P, Čermák P, Lošák T, Hlušek J, Richter R. 2010. Hnojení polních plodin draslíkem a hořčíkem. K+S Gruppe. Available from http://www.ks-cz.com/cs-data/documents/broschures/cz-vegetables-field-A4-1010.pdf?fbclid=IwAR3dL_I3MJn5EYwYN0dRSKdxVF27ZGAXQrlxVIQ_HjKT4TVz-pzJ6syWuoM (accessed April 2022)
- Strobbe S, Van der Straeten. 2017. Folate biofortification in food crops. *Current Opinion in Biotechnology* **44**:202-211 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.12.003>
- Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2016. Výživa a hnojení polních plodin. Profi Press s.r.o., Praha
- Vasileva V, Kostov O. 2015. Effect of mineral and organic fertilization on alfalfa forage and soil fertility. *Emirates Journal of Food and Agriculture* **27**(9):678-686. DOI: [10.9755/ejfa.2015.05.288](https://doi.org/10.9755/ejfa.2015.05.288)
- Verlicchi P, Zambello E. 2015. Pharmaceuticals and personal care products in untreated and treated sewage sludge: Occurrence and environmental risk in the case of application on soil — A critical review. *Science of The Total Environment* **538**:750-767. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.108>
- Wang Z, Hassan MU, Nadeem F, Wu L, Zhang F, Li X. 2020. Magnesium Fertilization Improves Crop Yield in Most Production Systems: A Meta-Analysis. *Frontiers in Plant Science* **10**:1-10. DOI: [10.3389/fpls.2019.01727](https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01727)
- Zampieri M, Ceglár A, Dentener F, Toreti A. 2017. Wheat yield loss attributable to heat waves, drought and water excess at the global, national and subnational scales. *Environmental Research Letters* **12**:064008. DOI: [10.1088/1748-9326/aa723b](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa723b)
- Zeidan MS, El Kramany. 2005. Effect of organic manure and slow-release n-fertilizers on the productivity of wheat (*Triticum Aestivum L.*). *Acta Agronomica Hungarica*, **49**:379-385 DOI: [10.1556/AAgr.49.200](https://doi.org/10.1556/AAgr.49.200)