

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Využití čistírenských kalů jako potenciálního zdroje
hořčíku pro pšenici ozimou**

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Diana Štefaňáková

Obor studia: Ochrana a využívání přírodních zdrojů

Vedoucí práce: Ing. Martin Kulhánek Ph.D.

© 2020 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Využití čistírenských kalů jako potenciálního zdroje hořčíku pro pšenici ozimou" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 17.07.2020

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala především svému vedoucímu práce Ing. Martinu Kulhánkovi Ph.D. za odborné vedení, užitečné rady, pomoc a čas, který mi věnoval při zpracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat svému manželovi za podporu po celou dobu mého studia.

Využití čistírenských kalů jako potenciálního zdroje hořčíku pro pšenici ozimou

Souhrn

V teoretické části práce byla popsána důležitost hořčíku v půdě a v rostlinách společně s možnostmi hnojení hořčíkem. Hořčík je důležitý biogenní prvek uplatňující se ve výživě rostlin. Je možné jej do půdy dodávat prostřednictvím různých hnojiv a jednou z možností je aplikace čistírenského kalu. Čistírenské kaly představují vedlejší produkt vznikající v objektu čistíren odpadních vod a jeví se jako bohatý zdroj organických látek a živin včetně hořčíku. Mají rovněž pozitivní vliv na biologické, fyzikální a chemické vlastnosti zemědělských půd.

Cílem experimentální části práce bylo vyhodnocení výnosů pšenice ozimé a odběru hořčíku po dlouhodobé aplikaci čistírenských kalů ve srovnání s hnojením chlévským hnojem a minerálními hnojivy NPK. Zároveň byly porovnány jednotlivé varianty hnojení (vedle čistírenských kalů, chlévského hnoje a NPK také kontrolní nehnojená varianta) na obsah okamžitě přístupného, přístupného, potenciálně přístupného a reziduálního hořčíku v půdě.

Dlouhodobý pokus byl založen v roce 1996 na pokusných stanovištích Praha-Suchdol, Červený Újezd, Hněvčeves a Lukavec. Každé ze stanovišť se vyznačovalo odlišnými půdně-klimatickými podmínkami. Na stanovištích byly pěstovány v tříhonném osevním sledu brambory, ozimá pšenice a jarní ječmen. Organickými hnojivy bylo hnojeno pouze k první plodině v osevním sledu, proto bylo u ozimé pšenice sledováno následné působení aplikace organických hnojiv. Pro potřeby pokusu byly použity čistírenské kaly z Ústřední čistírny odpadních vod v Praze.

Nejvyšší průměrný výnos a současně nejvyšší odběr Mg byly u pšenice ozimé dosaženy po aplikaci minerálních hnojiv NPK. Čistírenský kal se s ohledem na výnos zrna pšenice ozimé projevil jako druhý nejlepší způsob hnojení.

Na obsah přístupného hořčíku v půdě měla pozitivní vliv aplikace čistírenských kalů ve srovnání s ostatními variantami hnojení, neboť byl po aplikaci kalů naměřen nejvyšší průměrný obsah přístupného hořčíku.

Čistírenské kaly se tak z hlediska hořčíku jeví jako vhodné hnojivo, avšak v navazujícím výzkumu je třeba brát ohled i na jejich negativní vlastnosti, jako je obsah rizikových prvků a organických polutantů.

Klíčová slova: hořčík; půda; čistírenské kaly; pšenice ozimá; hnojení

Using of sewage sludge as a potential magnesium source for winter wheat

Summary

The theoretical part of these thesis described the importance of the magnesium in the soil and in plants together with the possibilities of the magnesium fertilization. Magnesium is an important biogenic element needed in plant nutrition. It can be supplied in the soil through various fertilizers and one of the possibilities is the application of the sewage sludge. Sewage sludge are a by-product of the wastewater treatment and appears to be a rich source of organic matter and nutrients, including magnesium. It also have positive influence on the biological, physical and chemical properties of agricultural soils.

The aim of the experimental part of these thesis was to evaluate the yields of winter wheat and magnesium consumption after long-term application of sewage sludge in comparison with manure fertilization and NPK mineral fertilizers. At the same time the individual fertilization variants (in addition to sewage sludge, manure and NPK also the control unfertilized variant) were compared for the content of readily available, bioavailable, potentially available and residual magnesium in the soil.

The long-term experiment was established in 1996 at the experimental sites Praha-Suchdol, Červený Újezd, Hněvčeves a Lukavec. Each of the sites was characterized by different soil and climatic conditions. Potatoes, winter wheat and spring barley were cultivated in a three-crop rotation. Organic fertilizers were applied only to the first crop in crop rotation, therefore the subsequent effect of the application of organic fertilizers was monitored by winter wheat. For the needs of the experiment, sewage sludge from the Central Wastewater Treatment Plant in Prague was used.

The highest average yield and at the same time the highest Mg uptake were achieved for winter wheat after the application of NPK mineral fertilizers. With regard to the yield of winter wheat grain, sewage sludge proved to be the second best fertilization treatment.

The content of available magnesium in the soil was positively influenced by the application of sewage sludge in comparison with other fertilization variants, because the highest average content of available magnesium was measured after the application of sewage sludge.

Sewage sludge has good potential as a source of magnesium. On the other hand, following research should be focused on potential risks of this material application, such as input of trace elements and organic pollutants.

Keywords: magnesium; soil; sewage sludge; winter wheat; fertilization

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Vědecká hypotéza a cíle práce.....	2
3	Literární rešerše.....	3
3.1	Hořčík v půdě.....	3
3.1.1	Formy hořčíku v půdě.....	4
3.1.2	Obsah přístupného hořčíku v půdách České republiky.....	5
3.2	Příjem hořčíku rostlinami.....	6
3.3	Hořčík v rostlinách.....	6
3.3.1	Projevy nedostatku hořčíku.....	7
3.4	Hnojení hořčíkem.....	8
3.4.1	Hnojiva obsahující hořčík.....	9
3.5	Čistírenské kaly.....	11
3.5.1	Rozdělení čistírenských kalů.....	11
3.5.2	Úprava čistírenských kalů před použitím.....	12
3.5.3	Složení čistírenských kalů.....	12
3.5.4	Obsah živin v čistírenských kalech.....	13
3.5.5	Nežádoucí látky v čistírenských kalech.....	13
3.5.6	Kompostování čistírenských kalů.....	14
3.5.7	Aplikace kalů na zemědělskou půdu.....	15
3.5.8	Vliv na půdní vlastnosti.....	15
3.5.9	Čistírenský kal z hlediska legislativy.....	16
3.6	Pšenice ozimá.....	18
3.6.1	Základní charakteristika.....	18
3.6.2	Pěstování pšenice ozimé.....	18
3.6.3	Výživa a hnojení pšenice ozimé.....	20
4	Metodika.....	23
4.1	Analytická stanovení.....	24
	Extrakce demineralizovanou vodou.....	24
4.2	Statistické vyhodnocení.....	25
5	Výsledky.....	26
5.1	Obsah okamžitě přístupného hořčíku v půdě stanovený vodným výluhem.....	26

5.2	Obsah přístupného hořčíku v půdě stanovený CAD	27
5.3	Obsah potenciálně přístupného hořčíku v půdě stanovený metodou Mehlich 3	29
5.4	Obsah reziduálního hořčíku v půdě stanovený výluhem lučavkou královskou.....	30
5.5	Výnosy pšenice ozimé na jednotlivých stanovištích.....	32
5.5.1	Stanoviště Červený Újezd	32
5.5.2	Stanoviště Hněvčeves.....	32
5.5.3	Stanoviště Lukavec	33
5.5.4	Stanoviště Praha – Suchdol	34
5.5.5	Srovnání průměrných výnosů zrna pšenice ozimé na jednotlivých stanovištích	34
5.5.6	Průměrný roční odběr hořčíku zrnem pšenice ozimé.....	35
5.5.7	Bilance hořčíku na jednotlivých stanovištích	35
6	Diskuze	37
6.1	Výnos pšenice ozimé.....	39
7	Závěr.....	41
8	Seznam použité literatury	42

1 Úvod

Hořčík (lat. Magnesium, chemická značka Mg) patří mezi důležité biogenní prvky. Je 8. nejhojnějším minerálním prvkem na Zemi. Jeho latinský název Magnesium byl odvozen od okresu Thessaly zvaného Magnesia v severovýchodní oblasti Řecka (Maguire & Cowan 2002). Celkem se hořčík vyskytuje obsažený v zhruba 105 minerálech, nejvíce v křemičitanech, uhličitanech, síranech a chloridech. Přes poměrně značnou potřebu hořčíku rostlinami je význam hořčíku pro rostliny značně opomíjen. Ve srovnání s jinými živinami byla hořčíku v posledních desetiletích věnována malá pozornost. V literatuře je proto možné setkat se s pojmem „zapomenutý prvek“ (Cakmak & Yazici 2010).

Hořčík lze nalézt ve všech zelených rostlinách, neboť je důležitou součástí chlorofylu. Pro rostliny je nezbytný pro jejich růst a vývoj, uplatňuje se při mnoha fyziologických dějích probíhajících v rostlinách a zasahuje také do produkce řady organických sloučenin. Nedostatek hořčíku v rostlinách působí negativně nejen na fotosyntézu, ale i na další procesy probíhající v rostlinách. Z toho důvodu je potřeba optimalizovat hnojení hořčíkem, aby bylo zabráněno nedostatku této živiny v rostlinách.

Hnojení hořčíkem je možno uplatnit i ve výživě pšenice, která je nejrozšířenější obilninou v České republice. Kromě toho, že má hořčík přímý vliv na kvalitu a výnos zrna pšenice ozimé, ovlivňuje také obsah bílkovin v zru.

Do půdy může být hořčík doplňován celou řadou hnojiv. Kromě průmyslově vyráběných minerálních hnojiv a organických hnojiv lze také využít odpadní látky. Mezi ty řadíme čistírenské kaly, které představují vedlejší produkty vznikající v čistírnách odpadních vod. S narůstajícím počtem čistíren odpadních vod v České republice rovněž narůstá produkce kalů z těchto čistíren. Je tudíž na místě hledat vhodné způsoby, jak tyto kaly vhodným způsobem dále využít. Recyklace čistírenského kalu pro zemědělské účely se jeví jako velmi zajímavé řešení pro udržitelné hospodaření s kalem.

Čistírenské kaly jsou na jedné straně velmi cenným zdrojem jak z pohledu energetického, tak z pohledu obsahu živin jako jsou dusík, fosfor, hořčík a dalších látek, které mají pozitivní vliv na zemědělské půdy. Další jejich předností je vysoký obsah organické hmoty a pozitivní vliv na fyzikální a chemické vlastnosti půd. Na druhé straně však představují nebezpečný až toxický materiál, který obsahuje škodliviny, jako jsou těžké kovy. Z toho důvodu je používání čistírenských kalů na zemědělské půdě upraveno příslušnými zákony a vyhláškami. Po samotné aplikaci kalu na půdu je nutné provádět rozbory a monitoring půd a kontrolovat tak vliv kalů na obsah prvků v dané půdě.

2 Vědecká hypotéza a cíle práce

- I přes relativně nízký obsah hořčíku v čistírenských kalech je možno předpokládat patrné zvýšení obsahu Mg v půdě po jejich aplikaci
- Aplikace čistírenských kalů povede ke zvýšení výnosů pšenice ozimé a pravděpodobně i ke zvýšení odběru Mg ve vztahu k výnosu

Cíle práce jsou následující:

- Vyhodnotit účinnost dlouhodobé aplikace čistírenských kalů do půdy z hlediska změn obsahu přístupného hořčíku v půdě
- Hodnocení odběru Mg a výnosů pšenice ozimé po dlouhodobé aplikaci čistírenských kalů ve srovnání s chlévským hnojem a minerálním NPK

3 Literární rešerše

3.1 Hořčík v půdě

Průměrný obsah hořčíku v půdě se pohybuje mezi 0,4-0,6 % a je určen minerálním složením matečných hornin (Vaněk et al. 2012). Gransee & Führs (2013) uvádějí podobné hodnoty, a to 0,05-0,5 %. Hmotnostně vyjádřeno, je hodnota obsahu hořčíku v půdě 3-25 g/kg půdy v závislosti na půdním typu (Yan & Hou 2018). Mezi minerály, ve kterých se hořčík vyskytuje, patří např. serpentín, magnezit, dolomit a další (Richter 2007). Z celkového množství hořčíku v půdě se pouze jeho malá část nachází ve formách přístupných pro rostliny (Fecenko & Ložek 2000). Je to dáno tím, že většina půdního hořčíku (90-98 %) je začleněna do krystalové struktury minerálů a tudíž není přímo dostupná pro absorpci rostlinami (Senbayram et al. 2015). Změny v přístupnosti hořčíku jsou podmíněny působením vnějších a vnitřních sil. Obsah Mg v půdě je závislý na faktorech jako jsou hodnota pH, půdní druh a zvyšuje se se stoupající sorpční kapacitou půdy. Dynamika hořčíku v půdě je ovlivněna půdotvorným substrátem a půdotvornými procesy v půdě. Písčité půdy mají nižší obsah Mg, naopak pro půdy na spraši a sprašových hlínách je typický vyšší obsah hořčíku. V lesních půdách je obsah Mg nižší než na orných půdách (Fecenko & Ložek 2000). Z hlediska hodnoty pH půdy je obsah hořčíku vyšší u neutrálních půd ve srovnání s kyselými půdami. Na obsah Mg v půdě má také vliv obsah půdní organické hmoty, neboť půdy s vyšším obsahem organického materiálu vykazují vyšší obsah hořčíku oproti těm s nižším obsahem organické hmoty (Yan & Hou 2018).

Hlavní zásobu přijatelného Mg v půdě představuje kationt Mg^{2+} , výměně sorbovaný na pevné fázi půdy, který se uvolňuje zvětváním minerálů a hornin. Kationt Mg^{2+} je pohyblivý a dochází k jeho snadnému vyplavování (Matula 2007). Poměrně vysoká rozpustnost a slabší sorpce kationtů Mg^{2+} ovlivňují snadnější horizontální pohyb a tím zapříčiňují ztráty hořčíku z ornice. V některých půdách tudíž může nastat stav, kdy spodní horizonty vykazují vyšší obsah hořčíku než ornice (Vaněk et al. 2012). Ztráty hořčíku z půdy vyplavením jsou poměrně proměnlivé a jsou závislé na druhu půdy, půdní kyselosti, matečné hornině, podmínkách zvětvání a dávce průmyslových hnojiv (Richter 2007; Baumgärtel et al. 2003). Fecenko & Ložek (2000) uvádějí ztráty hořčíku vyplavením v množství 13-18 kg.ha⁻¹. Zásobení půdy hořčíkem má bezprostřední vztah ke kvalitě spodních vod a jejich minerálnímu složení (Matula 2007). Hořčík v půdě rovněž snižuje průsak vody a zpomaluje kapilární zdvih vody a tím ovlivňuje hydrologické poměry půd (Fecenko & Ložek 2000). Další funkcí hořčíku, vztaženo ke hnojení, je vyrovnávání půdní reakce tak, aby byla v optimálním fyziologickém rozpětí (Hawkesford et al. 2012).

Vysoký obsah hořčíku v půdě ovšem může mít i negativní vliv na půdní strukturu (Oster & Jayawardane 1998). Je to dáno vyplavováním hořečnatého kationtu Mg^{2+} z horní vrstvy půdy, což následně vede ke zhoršení struktury a infiltrační schopnosti půdy. Zmíněný kationt Mg^{2+} působí současně také na koagulaci koloidů a zabraňuje tak rozplavení půdních agregátů (Klír et al. 2018). Nadbytek hořčíku bývá spojován s půdami na serpentinitech a dolomitech (Matula 2007).

3.1.1 Formy hořčíku v půdě

Hořčík se v půdě nachází v různých formách, mezi kterými nastává rovnovážný stav. Tento stav se však v průběhu roku mění hnojením, vápněním, vymýváním či samotným odběrem hořčíku rostlinami během vegetace (Fecenko & Ložek 2000).

Vaněk et al. (2012) popisuje následující formy hořčíku v půdě včetně jejich zastoupení:

- celkový obsah Mg: 0,4-10 %
- výměnný: do 5 % celkového Mg
- vodorozpustný: 1-10 % výměnného Mg

Fecenko & Ložek (2000) k výše uvedenému rozdělení ještě navíc doplňují organicky vázaný hořčík.

Celkový hořčík

Celkový hořčík představuje všechny formy hořčíku v půdě a jeho obsah je do značné míry závislý na složení mateřské horniny. Zhruba 90-95 % tvoří hořčík zastoupený v křemičitanech, pyroxenech, serpentinu, biotitu a montmorillonitu. Hořčík obsažený v křemičitanech se velmi těžko rozpouští ve vodě, a tudíž jeho využití rostlinami je nízké. Značnou část hořčíku obsahují také uhličitany magnezit a dolomit a hořčík takto vázaný je pro rostliny lépe přístupnější než hořčík vázaný v křemičitanech (Fecenko & Ložek 2000). Hořčík obsažený v primárních a sekundárních minerálech je velmi důležitý pro výživu rostlin (Mikkelsen 2010).

Výměnný hořčík

Nejvýznamnější část přijatého hořčíku tvoří pro rostliny výměnný hořčík, který je zároveň nejdůležitější formou z hlediska výživy rostlin. V půdách je obsažený v rozmezí 5-10 % v závislosti na typu a struktuře půdy, sorpční kapacitě, obsahu organických látek a jiných faktorů. Výměnný hořčík přijímá rostlina kontaktní výměnou, případně jeho doplňováním na základě rovnovážného stavu mezi výměnným a vodorozpustným hořčíkem (Richter 2007; Fecenko & Ložek 2000).

Vodorozpustný hořčík

Tato forma představuje hořčík, který se do půdního roztoku dostává uvolněním z rozložených zbytků rostlin a živočichů nebo z anorganických částí půdy. Vyskytuje se ve formě síranů, chloridů a uhličitánů, vyskytujících se v půdním roztoku. Jeho množství je závislé na obsahu výměnného hořčíku v půdě a dalších faktorech jako např. obsahu vody v půdě, typu jílových minerálů a koncentraci jiných kationtů. Faktory, které ovlivňují obsah vodorozpustného Mg, rovněž podmiňují i jeho vyplavování a ztráty z půdy (Fecenko & Ložek 2000). Obdobně jako například draslík může hořčík přecházet do krystalové mřížky některých minerálů a stát se tak pro rostliny nepřijatelným. Přijatelnost Mg je rovněž ovlivněna antagonistickým působením jiných iontů jako K^+ , NH_4^+ , Na^+ , Ca^{2+} (Richter 2007).

Mezi hořčíkem v půdním roztoku a výměnně sorbovaným hořčíkem v sorpčním komplexu dochází k dynamické rovnováze. Pokud je dostatek sorbovaného hořčíku, dochází k doplňování odčerpaného Mg do půdního roztoku a tím vzniká předpoklad zajištění výživy rostliny danou živinou (Vaněk et al. 2012). Za vhodnou dolní koncentraci hořčíku ve formě kationtu Mg^{2+} v půdním roztoku se považuje 10-40 mg/l, v závislosti na aktivitě ostatních kationtů (Matula 2007).

Organicky vázaný hořčík

Hořčík, který je vázán půdními mikroorganismy v posklizňových zbytcích a jiných organických látkách představuje organicky vázaný hořčík. Rostliny tuto formu Mg mohou přijímat až po jejich odumření a rozkladu. Jeho obsah je v půdách poměrně nízký, např. na písčitých půdách je to 1-2 % z celkového obsahu Mg v půdě (Fecenko & Ložek 2000).

3.1.2 Obsah přístupného hořčíku v půdách České republiky

Průměrný obsah přístupného hořčíku na orné půdě v České republice činí podle Smatanové (2019) 196 mg/kg. Podíl orných půd s vysokým a velmi vysokým obsahem představuje 17,8 % výměry, s nízkým obsahem pak 13,75 %. V jednotlivých krajích vykazují největší podíl půd s vysokou a velmi vysokou zásobou hořčíku kraje Jihomoravský (55,28 %) a Ústecký (40,02 %), naopak nízký obsah hořčíku mají kraje Středočeský (22,30 %) a Pardubický (20,94 %). Obsahy přístupného hořčíku v půdách jednotlivých krajů České republiky uvádí následující tabulka č. 1.

Tabulka č. 1: Obsah přístupného Mg v půdách ČR (Smatanová 2019)

Kraj	Vážený průměr Mg (mg/kg)	Podíl půd - % výměry (vážené průměry)	
		Nízký obsah	Vysoký a velmi vysoký obsah
Praha – hl. město	168	10,93	3,89
Středočeský	158	22,13	6,90
Jihočeský	173	14,95	14,98
Plzeňský	193	10,47	26,41
Karlovarský	246	9,28	43,72
Ústecký	308	12,12	43,19
Liberecký	176	17,65	23,76
Královéhradecký	199	6,93	17,53
Pardubický	152	20,21	6,58
Vysočina	164	16,80	12,39
Jihomoravský	298	3,89	53,91
Olomoucký	199	9,20	17,42
Moravskoslezský	162	9,67	9,61
Zlínský	253	2,83	33,62
Česká republika	201	13,10	21,55

Za dostatečný obsah hořčíku v půdě se považují hodnoty obsahů u lehkých půd 135 mg/kg, u středních půd nad 160 mg/kg a u těžkých půd nad 220 mg/kg půdy (Vach & Javůrek 2009).

3.2 Příjem hořčíku rostlinami

Rostlinami je hořčík přijímán jako kationt Mg^{2+} převážně pasivně na základě elektrochemického gradientu, kdy uvnitř buňky převládá záporný elektrický náboj a rostlina se snaží dosáhnout jeho vyrovnání pomocí kationtů. Příjem Mg je značně ovlivněn koncentrací jednotlivých iontů v půdním roztoku. Jeho příjem omezují draselný a amonný kationt, naopak dusičnanový aniont příjem hořčíku podporuje. V kyselém prostředí je příjem Mg omezen vyšší koncentrací H^+ , a rovněž koncentrací kationtů hliníku (Al), železa (Fe) a manganu (Mn), které se v kyselé oblasti pH snadněji dostávají do roztoku (Vaněk et al. 2012).

Z hlediska pH je pro příjem hořčíku nejlepší neutrální nebo mírně alkalická reakce půdního roztoku, neboť v kyselém prostředí se jeho příjem zpomaluje (Richter 2007). Dominantním mechanismem přívodu hořčíku do rhizosféry kořenů je tok půdního roztoku, který se aktivuje transpirací vody porosty. Na půdách s vyšší zásobou výměnného draslíku a rovněž na půdách intenzivně hnojených draslíkem a amoniakální formou dusíku dochází k depresi příjmu hořčíku. Důležitým předpokladem bezproblémové výživy rostlin hořčíkem na konkrétním stanovišti je tudíž výše zásoby výměnného draslíku v půdě a patričná saturace sorpčního komplexu hořčíkem (Matula 2007).

Příjem hořčíku rostlinami je v průběhu vegetace rovnoměrný a vrcholu dosahuje těsně před zralostí a sklizní. Nejvyšší odběr mají v našich podmínkách cukrovka a jetel, obilniny pak odčerpávají méně hořčíku, a to zhruba 10-15 kg Mg/ha/rok. Transport Mg v rostlině je spolu s reutilizací, tj. opětovným využitím již uloženého Mg ze sloučenin dobrý. To dokazuje projev nedostatku Mg až na starších listech rostlin, kdy je jednak ztížen transport Mg do starších orgánů a zároveň jsou odbourávány sloučeniny a hořčík z nich je využit v mladších orgánech. U semenných kultur je Mg ke konci vegetace transportován do semen, kde je následně ukládán ve fyтину. Pokud dojde ke snížení příjmu Mg, sníží se nejprve obsah Mg ve slámě, a teprve poté dojde ke snížení v zrna (Vaněk et al. 2012). Kritická hodnota obsahu hořčíku u obilnin v sušině nadzemní hmoty se v období vegetativního růstu pohybuje kolem 0,13 %. Slabé příznaky nedostatku Mg u obilnin však nemusí vždy znamenat redukci výnosu, naopak dochází k efektivnějšímu využití Mg rostlinou a jeho transportu do zrna (Matula 2007).

3.3 Hořčík v rostlinách

V rostlinách je hořčík přítomen ve sloučeninách jako součást chlorofylu, fyтину, oxalátů, chelátů apod. Jeho obsah v rostlinách je ovlivněn druhem rostliny, orgánem a jeho stářím (Vaněk et al. 2012) a pohybuje se od 0,15 % do 0,35 % sušiny (Marschner 1995).

Hořčík je zabudovaný v jádru molekuly chlorofylu a je nezbytný v procesu fotosyntézy (Fecenko & Ložek 2000). Chlorofyl, jehož centrálním atomem je hořčík, je obsažen v komplexu chloroplastů, které absorbují světlo a přispívají k fotosyntetické fixaci oxidu

uhličitého (Cakmak & Yazici 2010). V chlorofylu je vázáno zhruba 13-18 % z celkového množství hořčíku v rostlině. Daleko vyšší množství Mg je zastoupeno v dalších částech rostlin, především v semenech rostlin (Fecenko & Ložek 2000). Kromě toho je hořčík součástí různých makromolekul včetně proteinů, buněčných stěn a buněčných membrán. Další důležitou roli hraje Mg při transportu sacharidů z listů, aktivaci enzymů a syntéze ATP (Cowan 2002; Marschner 1995). Je běžným aktivátorem enzymů spojených s energetickým metabolismem, které se podílejí na fosforylacích (Matula 2007). Hořčík má velký význam ve fotosyntéze, jednak jako součást chlorofylu a zároveň je významný jeho vliv na enzymové reakce fotosyntézy (Vaněk et al. 2012). Klíčovým enzymem ve fotosyntéze, který hořčík aktivuje, je tzv. enzym RuBisCO (Cakmak & Yazici 2010). V Calvinově cyklu se Mg účastní cyklu fixace oxidu uhličitého a tvorby dalších sacharidů, rovněž slouží ve fotorespiraci k opětovnému uvolnění oxidu uhličitého. Tím, že hořčík zasahuje do produkce řady organických sloučenin, působí na kvalitu produkce a obsah významných složek, pro které jsou rostliny pěstovány (Vaněk et al. 2012). Pro rostliny je Mg nezbytný pro jejich růst a vývoj. Další důležitou roli hraje hořčík v obranných mechanismech rostlin při abiotických a biotických stresových situacích (Senbayram et al. 2015).

Rostliny mají rozdílné nároky na hořčík, obecně větší potřebu hořčíku mají rostliny dvouděložné oproti jednoděložným (Matula 2007). Optimální koncentrace hořčíku ve vegetativních částech rostlin se pohybuje od 1,5-3,5 g/kg (Marschner 1995).

3.3.1 Projevy nedostatku hořčíku

Při omezeném příjmu Mg rostlina nejprve využije své rezervy, především z organických látek, a teprve až po výraznějším a dlouhodobějším deficitu se začnou projevovat zjevné příznaky nedostatku této živiny. Na výskyt nedostatku hořčíku mají rozhodující vliv obsah přijatelného Mg v půdě, pH půdy a obsah přijatelného K (Vaněk et al. 2012).

Nedostatek hořčíku ohrožuje průběh fotosyntézy, tvorbu bílkovin a rovněž negativně ovlivňuje procesy energetického metabolismu rostlin (Hawkesford et al. 2012). Mezi další projevy nedostatku Mg patří snížení koncentrace chlorofylu, snížení rychlosti fotosyntézy a redukce aktivity nitrátoreduktázy v listech (Ding et al. 2006). Deficience hořčíku má vliv také na velikost, strukturu a funkci chloroplastů (Marschner 1995).

Typickým vizuálním projevem nedostatku hořčíku je chloróza, která se vyznačuje světle zeleným zabarvením a nerovnoměrným rozložením chlorofylu na starších listech (Vaněk et al. 2012). Před samotnou chlorózou nejprve dochází k degradaci chlorofylu (Marschner 1995). Dále projevům chlorózy může rovněž předcházet hluboký metabolický rozvrat, který je často doprovázen nekrotizací pletiv v podobě koráلكové mozaiky nebo pruhovitosti (Richter 2004). Specifickou chlorózou je tzv. intervenální chloróza, kdy dochází ke žloutnutí pouze části listu mezi žilnatinou, a to především na starších listech. Výskyt symptomů nedostatku hořčíku rovněž ovlivňuje intenzita světla, neboť vysoká intenzita světla urychluje intervenální chlorózu (Cakmak & Yazici 2010). Při trvajícím nedostatku hořčíku mohou chlorotické části rostliny i odumírat (Vaněk et al. 2012). Hraniční koncentrace hořčíku obsaženého v rostlině před nástupem chlorózy se udává 1-2 mg/g suché hmotnosti rostliny (Ding et al. 2006). Viditelná chloróza u pšenice ozimé způsobená nedostatkem Mg je zobrazena na obrázku č. 1. Defekty při tvorbě chlorofylu, spojené s nedostatkem hořčíku, mohou být také často

provázeny červeným zbarvením listů (Vaněk et al. 2012). Chloróza je projevem akutního nedostatku hořčíku, mnohem častější je u rostlin latentní nedostatek této živiny, který negativně ovlivňuje výnosy. Latentní nedostatek hořčíku bohužel nemá viditelné příznaky, a tudíž je i obtížně diagnostikovatelný (Cakmak & Yazici 2010). Nedostatek hořčíku, který je krátkodobého charakteru, obvykle rostliny překonají, neboť růstem svých kořenů mohou později využívat i Mg z podorničních horizontů. Při silném nedostatku hořčíku dochází ke zpomalení růstu rostlin, k oddalování jednotlivých vývojových fází a k pozdnímu zrání. Vyšší nedostatek Mg může kromě snížení kvality vést i k poklesu výnosů. V našich podmínkách se vyskytuje nedostatek Mg u obilnin, ačkoli paradoxně nemají vysoké nároky na Mg (Vaněk et al. 2012; Fecenko & Ložek 2000).

Nedostatek hořčíku v půdě má za následek i jeho nižší obsah v rostlinách. To se může dále nepříznivě projevit i na zdraví a užitkovosti zvířat, pro které slouží rostliny jako potrava. U skotu vede nedostatek hořčíku k pastevní tetanii (Richter 2004; Fecenko & Ložek 2000). Deficit hořčíku se může objevit i u člověka. Lékařské studie dokládají jasné souvislosti nedostatku Mg ve výživě lidí se vzrůstem cévních a srdečních chorob, dále neurologických a psychických obtíží, výskytem alergií, odolností ke stresovým situacím či syndromem zvýšené únavy (Matula 2007).



Obrázek č. 1: Chloróza u pšenice ozimé (Ryant 2004)

3.4 Hnojení hořčíkem

Množství hořčíku uvolňované z půdních minerálů je ve srovnání s množstvím potřebným k udržení dostatečné kvality plodin a stabilních výnosů poměrně malé. Navíc faktory jako nízké pH půdy, sucho a zvýšený obsah kationtů K^+ , NH_4^+ a Ca^{2+} mohou snížit dostupnost hořčíku pro rostliny. A to i v případě, že je koncentrace hořčíku v půdním roztoku vysoká. Z toho důvodu je důležité do půdy dodávat hořčík ve formě hořečnatých hnojiv, a to obzvláště na půdách s omezeným množstvím hořčíku. Před použitím hnojiv je potřeba nejprve provést analýzu půdy a zohlednit specifické požadavky pěstovaných plodin (Senbayram et al. 2015). Hnojení hořčíkem je vhodné na půdy s nízkou zásobou Mg a k plodinám, které jsou na hořčík náročné a dobře na něj reagují (Klír et al. 2007). Při hnojení hořčíkem se uplatňuje zásada hnojení půdy, kdy jsou dávky živin určovány podle zásoby živin v půdě a podle

výnosové úrovni. Hnojením dojde k vytvoření a udržení vyhovujícího obsahu přijatelných živin, které zajišťují optimální a stabilní výnos. Při nízkém obsahu živiny v půdě jsou dávky hnojiva vyšší s cílem postupně zvýšit obsah živiny v půdě. Naopak při vysokém obsahu živiny v půdě se hnojí menší dávkou, než je odběr, případně se nehnojí vůbec a rostliny čerpají živiny z půdních zásob. V případě, že je obsah živin v půdě vyhovující, je doporučeným hnojením nahrazován odběr živin sklizní (Vaněk et al. 2007).

Na půdách, které mají tendenci k promývání, se nedoporučuje aplikovat jednorázově vysoké dávky dobře rozpustných hořečnatých hnojiv z toho důvodu, aby nedocházelo k vysokým ztrátám Mg vyplavením. Jako účinná kombinace se jeví kombinace draselno-hořečnatých hnojiv, případně hořečnatých hnojiv s pomalu rozpustným mletým dolomitickým vápencem. Při hnojení hořečnatými hnojivy je potřeba počítat s tím, že využití hořčíku omezuje kyselá půdní reakce (Vach & Javůrek 2009). Snížení deficitu hořčíku lze docílit vhodnou úpravou půdních podmínek, např. vápněním u kyselých půd. Při vápnění se využívají vápenatá hnojiva, která obsahují Mg, jako jsou dolomity, dolomitické vápence a strusky. Tato hnojiva nejenže obohatí půdu o potřebný Mg, ale zároveň zajistí potřebný efekt z hlediska pH půdy. Pro optimalizaci a vlastní hnojení hořčíkem se využívají výsledky rozborů rostlin a půd. Pro samotné hodnocení zásobenosti půdy hořčíkem se v současné době využívá metoda podle Mehlich (1984) (Vaněk et al. 2012).

Matula (2007) uvádí, že minimálně 70 % našich půd vyžaduje bezprostřední a cílené hnojení hořčíkem, aby bylo dosaženo minima vhodné zásoby hořčíku v půdě. K deficitu hořčíku podstatně přispěly dřívější praktiky jednorázově aplikovaných vysokých dávek draselných hnojiv chloridového typu, které zapříčinily neefektivní ztráty hořčíku z půdy vyplavením. Potřeba hnojení vychází ze stavu aktuální zásoby výměnného Mg^{2+} v půdě. Výše maximální jednorázové dávky hnojiva je limitována sorpčními schopnostmi půdy a stavem aktuální zásoby draslíku v půdě. Nežádoucím jevem je vyplavování hořčíku z povrchové vrstvy půdy, které může často podporovat používání zvýšených dávek draselných a dusičnanových hnojiv (Klír et al. 2018).

3.4.1 Hnojiva obsahující hořčík

Hořečnatá hnojiva řadíme do minerálních (průmyslových) hnojiv, která jsou vyráběna v chemickém průmyslu z přírodních surovin a vyznačují se vyšším obsahem živin (Vaněk et al. 2007). Hořčík je v hnojivech přítomen v různých sloučeninách jako jsou síran hořečnatý ($MgSO_4$), uhličitán hořečnatý ($MgCO_3$) a chlorid hořečnatý ($MgCl_2$), kde je Mg nejčastěji účinnou složkou. V kombinaci dusík-hořčík jsou vyráběna dvousložková hnojiva v pevné nebo kapalné formě, jako jsou např. Damag, Dumag, Folimag a Campofort, která jsou doporučována k mimokořenné aplikaci (Vaněk et al. 2012).

Minerální hnojiva obsahující hořčík se dále dělí dle rozpustnosti ve vodě na rozpustná a částečně rozpustná (Mikkelsen 2010). Rozpustnost daného hořečnatého hnojiva ovlivňuje jeho dostupnost pro rostliny (Härdter et al. 2005). Zároveň má rozpustnost hnojiva ve vodě (společně s fyzikálně-chemickým složením a velikostí granulí příslušného minerálního hnojiva) vliv na rychlost uvolňování dostupného hořčíku do půdního roztoku (Senbayram et al. 2015). Vach & Javůrek (2009) uvádějí, že z vodorozpustných forem hořečnatých hnojiv dokáží rostliny přijmout v roce aplikace hnojiv zhruba 50-60 % Mg.

Pokud nedojde k vyplavení živin, lze předpokládat, že v průběhu dalších let dojde k plnému využití hořčíku rostlinami.

Kieserit (KS)

Hnojivo Kieserit představuje síran hořečnatý s příměsí chloridu draselného a obsahuje zhruba 15-16 % Mg. Je dodáván v krystalické, případně granulované formě a je určen k základnímu hnojení půdy i přihnojování během vegetace. Účinnost hnojení je značně závislá na vlhkosti, kdy je ideální kombinace se závlahou, a na půdních vlastnostech. Kieserit se používá na půdách s neutrální a zásaditou půdní reakcí, a také na půdách s dobrou zásobou draslíku a s malou zásobou hořčíku. Na silně kyselých půdách a na půdách s vysokým obsahem draslíku nelze předpokládat výrazný efekt hnojení Kieseritem. Na lehkých písčitých půdách, kde je riziko ztrát vyplavením, je potřeba provést aplikaci tohoto hnojiva na jaře při přípravě půdy před setím. V případě, že je zjištěn nedostatek hořčíku v průběhu vegetace, je možné toto hnojivo použít i na list (Vaněk et al. 2012; Fecenko & Ložek 2000). Pomalé uvolňování hořčíku obsaženém z Kieseritu může vést k větší adsorpci Mg v půdě a tím ke snížení vyluhovacího potenciálu (Härdter et al. 2005).

Hořká sůl (HS)

Hnojivo hořká sůl obsahuje 10 % Mg a její hlavní složkou je síran hořečnatý. Jedná se o krystalickou látku dobře rozpustnou ve vodě. Toto hnojivo je vhodné téměř na všechny plodiny a vzhledem ke své dobré rozpustnosti se hodí k mimokořenové výživě postřikem. V případě vysokého nedostatku Mg lze v průběhu vegetace postřik několikrát opakovat (Vaněk et al. 2012).

Organická hnojiva

Významným zdrojem živin jsou rovněž organická (statková) hnojiva, která vznikají přímo v zemědělských podnicích. Mezi organická hnojiva se řadí chlévský hnůj, močůvka, kejda, sláma, kompost a také digestát, který vzniká jako vedlejší produkt při produkci bioplynu na bioplynových stanicích (Klír et al. 2007; Vaněk et al. 2007). Obsah živin v organických hnojivech závisí na druhu chovaných zvířat, způsobu jejich ustájení a krmení a v neposlední řadě na způsobu uložení hnojiva před jeho použitím (Neuberg 1998).

Koncentrace hořčíku v organických hnojivech je ve srovnání s minerálními hnojivy nižší. Nicméně vyššími aplikačními dávkami organických hnojiv může být do půdy dodáno významné množství Mg. Navíc hořčík obsažený v organických hnojivech je pro rostliny velmi dobře přístupný (Mikkelsen 2010).

Aplikací organických hnojiv jsou do půdy dodávány rostlinné živiny, organické látky, mikroorganismy a stimulační látky. Půdy, na které se aplikují organická hnojiva jsou úrodnější, neboť vykazují lepší fyzikální vlastnosti, lépe přijímají vodu, lépe zadržují živiny a jsou odolnější k výkyvům pH (Vaněk et al. 2007). Organická hnojiva se vyznačují pozvolným a dlouhodobým působením v půdě. K uvolňování živin z organických forem dochází procesem mineralizace. Organická hnojiva nahradí každoročně zhruba 40 % mineralizovaných organických látek. Aplikují se na podzim těsně před hlubokým

zpracováním půdy a je vhodné je zapravit do celého orničního profilu. Podzimní aplikací se docílí dřívějšího začátku mineralizace a část živin se již v prvním vegetačním období po aplikaci hnojiv stane přijatelnými (Fecenko & Ložek 2000; Neuberger 1998).

I přes pokles stavu hospodářských zvířat v ČR je ve statkových hnojivech živočišného původu aplikováno zhruba 0,5 t organických látek v průměru na 1 hektar zemědělské půdy (Klír et al. 2007). V průměru obohatí organické hnojivo jeden hektar půdy o 7 kg hořčiku ve formě MgO (Fecenko & Ložek 2000).

3.5 Čistírenské kaly

Čistírenské kaly představují vedlejší produkt, který vzniká při procesu čištění odpadní vody v čistírně odpadních vod (ČOV). Představují zhruba 1-2 % objemu čištěných vod a je v nich zkoncentrováno 50-80 % původního znečištění (Dohányos 2004). Odpadní voda, která přitéká na ČOV je během procesu čištěna a na odtoku z objektu ČOV je obsah znečišťujících látek podstatně snížen. Nežádoucí složky obsažené ve vodě se následně koncentrují do vzniklého kalu (Raclavská 2007).

Z chemického hlediska čistírenské kaly představují suspenzi pevných a agregovaných koloidních látek, které byly původně přítomny v odpadní vodě a vznikly v průběhu procesu čištění odpadní vody. Složení a obsah sušiny kalu jsou závislé na charakteru znečištění odpadních vod a rovněž na čistírenských procesech, kterými byla odpadní voda podrobena (Dohányos 2006). Hodnota pH čistírenského kalu je neutrální nebo mírně zásaditá (Singh & Agrawal 2008). Dusza et al. (2009) uvádí jako ideální hodnoty pH rozmezí 5,6-7.

V zemědělství je možné čistírenské kaly materiálově využít jako organické hnojivo jejich přímou aplikací na zemědělskou půdu či ve formě kompostu. Lze je také využít při rekultivacích (Dohányos 2004).

3.5.1 Rozdělení čistírenských kalů

Během procesu čištění odpadní vody vznikají různé druhy čistírenských kalů v závislosti na místě vzniku a procesu, při kterém kal vznikl. Podle místa vzniku rozlišujeme:

- Primární kal
- Sekundární kal
- Terciární kal

Nejprve vzniká při mechanickém čištění tzv. primární kal, který představuje suspendované látky zachycené v usazovací nádrži. Složení primárního kalu je především určeno složením přitékající odpadní vody na ČOV a poměry ve stokové síti. V dalším stupni, během procesu biologického čištění vzniká sekundární kal, též označovaný jako přebytečný aktivovaný kal. Sekundární kal obsahuje přebytečnou biomasu a jeho složení je ovlivněno jak složením surové odpadní vody, tak i samotnou technologií čištění. Oba typy kalů mají různé složení i vlastnosti a dále mohou být zpracovávány odděleně nebo společně. Tam, kde je možné využít kal pouze z jednoho stupně čištění, je obvykle zavedeno oddělené zpracování kalu. Během terciárního čištění vzniká jako produkt srážecích reakcí chemický neboli

terciární kal. Kal, který ještě nebyl stabilizován, označujeme jako surový kal (Dohányos et al. 2007; Raclavská 2007).

3.5.2 Úprava čistírenských kalů před použitím

Úprava a zpracování kalů si kladou za cíl využít obsažené prospěšné složky a energii a současně zabránit nepříznivým dopadům na životní prostředí. Koncentrace prospěšných i znečišťujících látek v čistírenském kalu závisí na počáteční kvalitě odpadní vody a na úrovni použité technologie čistírenského procesu (Dohányos 2004). Před samotným použitím kalů je nutné jejich zpracování. Především se používají technologie, které sníží obsah vody a patogenů v kalu a v neposlední řadě také odstraní z kalu znečišťující látky, jako jsou např. těžké kovy. Ve většině případů je proto již na ČOV aplikována taková technologie úpravy a zpracování kalu, která promění surový kal ve stabilizovaný (Dohányos 2006).

Ke stabilizaci a hygienizaci kalu se na ČOV využívá procesu anaerobní stabilizace, během které dochází k rozkladu biologicky rozložitelné organické hmoty směsnou kulturou mikroorganismů za anaerobních podmínek. Výslednými produkty tohoto rozkladu je stabilizovaný kal a současně bioplyn tvořený převážně methanem a oxidem uhličitým (Raclavská 2007). Při anaerobní stabilizaci kalu zároveň dochází k hmotnostnímu a objemovému úbytku organické hmoty. V surovém kalu z městských ČOV je poměr organických látek k anorganickým látkám obsažených v sušině zhruba 2:1. Po anaerobní stabilizaci surového kalu klesne obsah organické sušiny o 45-65 % a poměr organických látek k anorganickým je 1:1 (Dohányos et al. 2007). Použitá technologie stabilizace čistírenského kalu má výrazný vliv na fyzikálně-chemické a biologické parametry kalu. Nejvyšší úroveň stabilizace čistírenského kalu je dosaženo na technologiích provozovaných při termofilní teplotě anaerobní stabilizace kalu (Anonym 2015). Účinnost anaerobní stabilizace kalů je hodnocena podle skutečného úbytku organické sušiny v kalu. Za dobře stabilizovaný kal lze považovat kal, ve kterém byl obsah organických látek snížen pod 50 %. Dobře stabilizovaný kal je nepáchnoucí, z hygienického hlediska nezávadný a dobře odvodnitelný. Z fyzikálního hlediska se jedná o tmavou amorfni neplastickou homogenní směs suspendovaných a koloidních látek (Dohányos et al. 2007).

Mezi další metody hygienizace kalů se řadí chemické metody, zahrnující reakce s chemickými činidly a dále fyzikální metody, které zahrnují působení teploty, radiace či ultrazvuku. Stabilizovaný kal je pro další využití nutné odvodnit, aby byl obsah sušiny co nejvyšší. K tomu se na ČOV využívají pásové lisy, odstředivky nebo kalolisy (Raclavská 2007).

3.5.3 Složení čistírenských kalů

V kalech jsou obsaženy následující látky:

- Netoxické organické látky (tuky, sacharidy, bílkoviny, huminové látky) a sloučeniny dusíku a fosforu
- Toxické látky
 - Těžké kovy – Zn, Pb, Cu, Cr, Ni, Cd, Hg, As

- Polychlorované bifenyly (PCB), polyaromatické uhlovodíky (PAU), dioxiny (PCDD/F), uhlovodíky C₁₀-C₄₀, pesticidy a polyfenoly
- Mikroorganismy z čistírenského procesu (včetně patogenních mikroorganismů)
- Voda
- Anorganické sloučeniny – minerály křemen, kalcit, vivianit a živce (Raclavská 2007)

3.5.4 Obsah živin v čistírenských kalech

Hnojivý účinek kalů je dán především obsahem organické hmoty, makroprvků (N, P, K, Mg, Ca), obsahem stopových prvků a biologicky aktivních látek. Surový kal obsahuje zhruba 70 % organických látek v sušině (Dohányos 2006; Černý et al. 2009). Pravidelné používání čistírenských kalů v systému hnojení zajišťuje návratnost uhlíkatých látek do půdy (Nerudová 1984). Černý et al. (2009) uvádí následující procentuální obsah živin v čistírenských kalech (přepočtený na sušinu kalu): N (3,7), Ca (3,0), P (2,2), Mg (0,8), K (0,6).

3.5.5 Nežádoucí látky v čistírenských kalech

Hlavním limitujícím faktorem využití čistírenských kalů v zemědělství je obsah cizorodých látek a výskyt patogenních mikroorganismů. Z cizorodých látek se v kalech mohou vyskytovat těžké kovy, organické chlorované látky jako jsou dioxiny, polychlorované bifenyly (PCB) nebo polycyklické aromatické uhlovodíky (Černý et al. 2009). Čistírenské kaly mohou obsahovat i různé toxické organické látky a odpadní látky z průmyslových provozů, které byly zachycené při čištění odpadní vody (Singh & Agrawal 2008).

Těžké kovy, polycyklické aromatické uhlovodíky a některé fenoly mohou způsobit negativní změny flóry a fauny, které mohou vést ke snížení půdní úrodnosti a dalších parametrů (Cieslík et al. 2015). Pro těžké kovy navíc platí, že jsou ve vyšších koncentracích toxické a fytotoxické a hrozí u nich riziko zanesení do potravních řetězců. Mohou se dále akumulovat v tukové tkáni a časem může dojít až k otravě organismu (Nerudová 1984). Těžké kovy se mohou chovat odlišně v různých typech půd a v závislosti na půdních podmínkách se může měnit jejich mobilita a rozpustnost (Fytili & Zabaniotou 2008). Na jejich uvolnění do půdy mají významný vliv půdní pH, obsah organické hmoty, kationtová výměnná kapacita a také záleží na samotné mobilitě daného kovu. Při nadměrné aplikaci kalů na zemědělskou půdu může dojít ke zvýšené biologické dostupnosti těžkých kovů. Schopnost absorbovat těžké kovy z půdy hnojené čistírenskými kaly se u jednotlivých rostlin výrazně liší (Singh & Agrawal 2008). Na místech hnojených čistírenskými kaly může docházet ke snížení půdního pH, což vede k následnému zvýšení rozpustnosti těžkých kovů a jejich absorpci plodinami. Některé těžké kovy jako např. chrom a olovo, obsažené v čistírenských kalech mají schopnost nabalovat se na kořeny rostlin, a tím mohou výrazně omezit přenos živin do dalších částí rostliny – listů, plodů a semen. Dle schopnosti rizikových prvků vnikat do rostlin je lze seřadit následovně: Pb, Cr, Hg > Cu > Ni, Zn, Cd > Mo, Tl (McBride 2003).

Kaly z čistíren odpadních vod mohou obsahovat i malé koncentrace mikropolutantů jako jsou farmaka a rezidua kosmetických přípravků, které mohou být nebezpečné z hlediska své toxicity, perzistence a schopnosti bioakumulace (Clarke & Cummins 2015). Farmaka

a prostředky osobní péče představují skupinu látek, jejichž výskyt v životním prostředí dosud není dostatečně zmapován. Z farmak se například často užívají antibiotika, které lidské tělo špatně metabolizuje, dostávají do odpadních vod. Jejich poločas rozpadu trvá roky a následně se mohou akumulovat v půdě (Julen et al. 2019; Anonym 2015).

Z patogenních organismů mohou být v kalech přítomny bakterie, viry nebo prvoci. Pro hodnocení kvality kalů se sledují např. bakterie *Escherichia coli*, bakterie rodu *Enterococcus*, *Clostridium* nebo *Salmonella*. Tyto patogenní a podmíněně patogenní organismy přinášejí nebezpečí pro lidskou populaci, zvířata a také pro ostatní složky životního prostředí (Raclavská 2007).

3.5.6 Kompostování čistírenských kalů

Kompostování představuje možnost úpravy čistírenských kalů před samotnou aplikací na zemědělskou půdu. Jedná se o kontrolovaný biologický rozklad pevné organické hmoty za aerobních podmínek, kdy je biologicky rozložitelný odpad činností bakterií, hub a dalších organismů transformován do půdních složek. Během kompostování dochází k hygienizaci čistírenských kalů a současně k rozkladu nežádoucích organických látek a redukci zápachu (Hubálek 2007).

Optimální teplota pro kompostování je v rozmezí 20-30 °C. Za hygienizovaný lze považovat kompost tehdy, když v průběhu kompostovacího procesu dojde k nárůstu teploty nad 55 °C po dobu 21 dní (Cimados et al. 2006). Během zrání je důležité komposty ošetřovat a přehazovat, aby došlo k urychlení průběhu humifikace. Aby byl proces kompostování efektivní, je zapotřebí zajistit dostatečné provzdušňování kompostovaného materiálu, neboť přívod vzduchu je základní podmínkou aerobního procesu. Výslednou kvalitu kompostů je možné zlepšit minerálními hnojivy (Raclavská 2007). Jako efektivní se osvědčilo míchání čistírenských kalů s dřevní štěpkou, slámou a pilinami (Hubálek 2007).

Důležitým kritériem při použití čistírenských kalů k výrobě kompostu je obsah těžkých kovů v sušině. Pro kompostování se používají pouze kaly, které musí splňovat kritéria na fyzikální, chemické a mikrobiologické vlastnosti. Měly by být bez nepříjemného zápachu, po vizuální stránce přijatelné a rovněž by měly obsahovat dostatečné množství organické složky a živin. Aby došlo k účinné biodegradaci, měl by být ideální obsah organické složky vyšší než 70 %. U kalů je také sledována jejich vlhkost, schopnost aerace a vhodnost podmínek pro existenci mikroorganismů. Například kaly s vysokým obsahem vody nejsou pro růst mikroorganismů vhodné, ideální obsah vody je okolo 55 %. Na činnost bakterií mají také vliv pH a poměr mezi uhlíkem a dusíkem v substrátu, který by měl být v rozmezí 25-30:1. Vzniklé komposty se používají u plodin, které mají vysoké nároky na organické látky. Jejich používáním rovněž dochází k vyrovnání bilance organických látek v půdě. Komposty lze aplikovat samostatně nebo společně se slámou, zeleným hnojením a kejdou či močůvkou. Přímá účinnost kompostu se uvádí 35-45 %. Komposty se aplikují především na podzim a doporučuje se je zapravit do půdy orbou, aby nedocházelo ke ztrátám organických látek a živin, na jaře se aplikují pouze povrchovou kultivací (Raclavská 2007).

3.5.7 Aplikace kalů na zemědělskou půdu

V současné době je vzrůstající tendence upřednostňovat přímou aplikaci čistírenských kalů na zemědělskou půdu před dalšími způsoby likvidace kalů. Z důvodu heterogenní povahy čistírenských kalů je však nutné znát chemické složení kalu před jeho aplikací na zemědělskou půdu. Zároveň je při aplikaci důležitá znalost plodiny, která má být hnojena. V úvahu je potřeba vzít rovněž potenciál přenosu rizikových prvků do sklizené části rostliny (McBride 2003; Singh & Agrawal 2008).

Riziko uvolnění těžkých kovů do půdy není tak vysoké, pokud budou na zemědělskou půdu aplikovány správně ošetřené čistírenské kaly. Taktéž se doporučuje aplikace kalů na půdy s vyšším pH (Zufiaurrea et al. 1998). Pro vlastní aplikaci kalu je rovněž důležitým parametrem obsah sušiny kalu. Po stabilizaci a odvodnění je konzistence kalu podobná zemině a obsah sušiny je 20-50 % (Raclavská 2007). Čím je obsah sušiny kalu vyšší, tím lépe se s kalem manipuluje, je zapotřebí menšího uskladňovacího prostoru a zároveň náklady na dopravu jsou nižší. U kalu obsahujícího vyšší podíl sušiny dochází rovněž ke snadnější aplikaci kalu na zemědělskou půdu rozmetadly a přímo úměrně se snižuje potřeba pojezdu a utužování půdy (Anonym 2015).

Technický problém představuje sezónní využití kalu, neboť k produkci kalu dochází po celý rok, zatímco aplikace na půdu se provádí jednou či dvakrát do roka. Proto je někdy nutné kal delší dobu skladovat (Fytli & Zabaniotou 2008).

Warman & Termeer (2005) upozorňují na to, že nadměrná aplikace čistírenských kalů na zemědělskou půdu v podzimním nebo zimním období může mít za následek kontaminaci podzemních a povrchových vod dusičnany.

3.5.8 Vliv na půdní vlastnosti

Organická hmota, která je do půdy dodána čistírenskými kaly má pozitivní vliv na stabilitu půdních agregátů, objemovou hmotnost, kationtovou výměnnou kapacitu a také zlepšuje pórovitost a schopnost půdy zadržovat vodu (Singh & Agrawal 2008). Černý et al. (2009) uvádějí pozitivní vliv aplikace kalů na zvýšení retenční kapacity půdy, dále zvýšení aerace, propustnosti a infiltrace půdy. Poměrně vysoký obsah živin a vyšší dostupnost biomasy v čistírenských kalech se podílí na zvyšování půdní mikrobiální aktivity a posilování biologických a fyzikálně-chemických vlastností půdy (Julen et al. 2019). Özyazici (2013) popisuje čistírenský kal jako výborný půdní kondicionér, který zlepšuje fyzikální vlastnosti půdy. Čistírenský kal dle Dohányos et al. (2007) rovněž podporuje tvorbu humusu v půdě a upravuje strukturu půdy.

Hnojivé účinky odvodněného čistírenského kalu jsou srovnatelné s hnojivými účinky hnoje, a tudíž se hnojení čistírenskými kaly doporučuje pro plodiny, které se obvykle hnojí statkovými hnojivy. Ideální je kombinovat hnojení kaly s hnojením statkovými hnojivy, hnojení pouze kaly se nedoporučuje (Nerudová 1984). Jednorázové hnojení čistírenskými kaly nemá výraznější vliv na výnos plodin. Vyšších výnosů je dosaženo až následně po dlouhodobější opakované aplikaci kalů. S ohledem na obsah uhlíku a dusíku v čistírenských kalech je důležitá stabilita organických látek obsažených v kalu. Organické látky obsažené v čistírenských kalech jsou ve srovnání s organickými látkami obsaženými v chlévském hnoji

méně stabilní. Stejně tak v porovnání s chlévským hnojem vykazují čistírenské kaly užší poměr C/N, a to 4,7 oproti hnoji, který má 8,4. Dále ve srovnání s hnojem dosahují čistírenské kaly nižšího stupně humifikace a nižšího obsahu uhlíku v huminových kyselinách. Živiny obsažené v kalech jsou však rostlinám rychle přístupné (Černý et al. 2009).

3.5.9 Čistírenský kal z hlediska legislativy

Při manipulaci s čistírenskými kaly musí být dodržována určitá pravidla, která jsou pevně zakotvena v legislativě České republiky i Evropské Unie. Těmito zákonnými předpisy se musí řídit každá organizace a podnikající subjekt, kteří s čistírenskými kaly dále nakládají.

Právní předpisy České republiky týkající se problematiky čistírenských kalů

Povinnosti při nakládání s čistírenskými kaly jsou stanoveny v zákoně o odpadech č. 185/2001 Sb., jehož nejnovější schválenou novelou je **zákon č. 184/2014 Sb.**

Tento zákon definuje kal následovně:

- 1. kal z čistíren odpadních vod zpracovávajících městské odpadní vody nebo odpadní vody z domácností a z jiných čistíren odpadních vod, které zpracovávají odpadní vody stejného složení jako městské odpadní vody a odpadní vody z domácností,*
- 2. kal ze septiků a jiných podobných zařízení,*
- 3. kal z čistíren odpadních vod výše neuvedených,*

Upravený kal definuje zákon č. 185/2001 Sb. jako kal, který byl podroben biologické, chemické nebo tepelné úpravě, dlouhodobému skladování nebo jakémukoliv jinému vhodnému procesu tak, že se významně sníží obsah patogenních organismů v kalech, a tím zdravotní riziko spojené s jeho aplikací. Zákon o odpadech rovněž stanovuje povinnosti při používání kalů a definuje oblasti, kde je použití kalů zakázáno.

Další významným právním dokumentem v české legislativě je vyhláška č. 437/2016 Sb. o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. Tato vyhláška stanovuje podmínky použití upravených kalů na zemědělské půdě a povinnosti pro osoby, které s čistírenskými kaly nakládají. Vyhláška definuje dvě kategorie kalů I a II:

Kategorie I – kaly, které je možno obecně aplikovat na půdy využívané v zemědělství při dodržení ostatních ustanovení této vyhlášky.

Kategorie II – kaly, které je možno aplikovat na zemědělské půdy určené k pěstování technických plodin, a na půdy, na kterých se nejméně 3 roky po použití čistírenských kalů nebude pěstovat polní zelenina a intenzivně plodící ovocná výsadba, a při dodržení zásad ochrany zdraví při práci a ostatních ustanovení vyhlášky.

Vyhláška dále také stanovuje, že kaly musí být zapraveny do půdy nejpozději do 48 hodin od jejich rozprostření na půdní blok. Dále se zde uvádí mezní koncentrace vybraných rizikových látek a prvků v kalech a mikrobiologická kritéria pro použití kalů na

zemědělské půdě. Součástí vyhlášky jsou dále také postupy analýzy kalů a půdy včetně metod odebírání vzorků. Mezi těžké kovy, jejichž maximální přípustnou koncentraci v kalu vyhláška stanovuje, patří prvky arzen, kadmium, chrom, měď, rtuť, nikl, olovo a zinek. Maximální přípustné koncentrace těchto těžkých kovů obsažených v čistírenských kálech uvádí dle uvedené vyhlášky tabulka č. 2.

Tabulka č. 2: Maximální přípustné koncentrace těžkých kovů v kálech z ČOV dle vyhlášky č. 437/2016 Sb.

Riziková látka	Mezní (maximální) hodnoty koncentrací v
As - arzen	30
Cd – kadmium	5
Cr – chrom	200
Cu – měď	500
Hg – rtuť	4
Ni – nikl	100
Pb - olovo	200
Zn – zinek	2500
AOX – halogenové organické sloučeniny	500
PCB – polychlorované bifenyly	0,6
PAU (suma antracenu, benzo(a) antracenu, benzo(b) fluoranthenu, benzo(k) fluoranthenu, benzo(a) pyrenu, benzo(ghi) perylenu, fenantrenu, fluoranthenu, chrysenu, indeno(1,2,3 -cd)pyrenu, naftalenu a pyrenu)	10

Další ze zákonů, který se týká problematiky kompostování a výroby organického hnojiva z čistírenských kalů je zákon č. 61/2017 Sb. o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd. Tento zákon určuje povinnost právnickým a fyzickým osobám, které používají upravené čistírenské kaly na zemědělské půdě o této skutečnosti informovat Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský (ÚKZÚZ).

Požadavky na kompost upravuje vyhláška č. 341/2008 Sb., která současně také definuje limitní koncentrace vybraných rizikových látek a prvků. V příloze vyhlášky č. 341/2008 Sb. jsou čistírenské kaly, jako biologicky rozložitelný odpad označeny číslem 1 02 02 04 – Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku.

Právní předpisy Evropské unie týkající se problematiky čistírenských kalů

V rámci legislativy Evropské unie se čistírenskými kaly zabývá Směrnice Rady 86/278/EHS, o ochraně životního prostředí a ochraně půdního fondu při používání čistírenských kalů v zemědělství. Tato směrnice reguluje používání kalů v zemědělství

s cílem zabránit potenciálním škodlivým vlivům na půdu, vegetaci, osoby a zvířata. Mimo jiné jsou zde stanoveny limity pro obsah těžkých kovů v aplikovaném kalu. Tato směrnice je závazná pro všechny členské země Evropské unie s tím, že každá z členských zemí může vydat přísnější opatření, než jsou dána směrnicí.

Další ze směrnic, která se zabývá čistírenským kalem a jeho využitím je směrnice č. 91/271/EHS o čištění městských odpadních vod. Tato směrnice zmiňuje nutnost omezování vypouštění kalů do povrchových vod s ohledem na opětovné použití kalů. Podle této směrnice musí rovněž každá obec nad 2000 obyvatel zajistit čištění odpadních vod před jejich vypouštěním.

3.6 Pšenice ozimá

3.6.1 Základní charakteristika

Pšenice je nejrozšířenější obilninou a přizpůsobí se nejrůznějším přírodním podmínkám. V České republice se pšenice pěstuje nejen v nejúrodnějších oblastech, ale rovněž také v těch méně příznivých, kde však vyžaduje dobré hnojení. Nejvyšší kvality potravinářské pšenice je dosaženo v teplých oblastech (Vaněk et al. 2007).

Pšenice ozimá se řadí do čeledi lipnicovitých. Má nelámavý klas, osinatý i bezosinný, který bývá různě hustý. Klas je složený z vícekvětých klásků umístěných na jednotlivých článcích klasového větene. Během svého životního cyklu pšenice prochází vegetativním obdobím, které zahrnuje klíčení, vzcházení, odnožování a generativním obdobím, do kterého se řadí sloupkování, metání, kvetení a zrání (Zimolka et al. 2005).

3.6.2 Pěstování pšenice ozimé

Pšenice ozimá vyžaduje mírné, teplejší podnebí nížinných a podhorských oblastí. Nejvíce se jí daří na těžších, dostatečně hlubokých hlinito-jílovitých půdách se slabě kyselou až neutrální reakcí (pH 6-7,2). Za nejvhodnější půdy jsou považovány černozemě a hnědozemě, které mají dobré biologické, fyzikální a chemické vlastnosti a jsou schopné hromadit a udržovat živiny a vodu. Nejméně vhodné jsou pro pšenici ozimou lehké a písčité půdy.

Nároky na teplotu má pšenice ozimá v průběhu vegetačního období poměrně rozdílné. Zatímco v období vzcházení a odnožování jsou zapotřebí teploty okolo 12-14 °C, na přechodu mezi podzimem a zimou nejlépe působí denní teploty mezi 10-12 °C, které však mohou klesnout na 0 °C a méně. Takovýto průběh teploty působí kladně na otužování pšenice ozimé. Na jaře jsou vyžadovány teploty nad 10 °C, v období kvetení pak teploty mezi 18-20 °C. Teplota by ale neměla překročit hranici 25 °C. Vyšší teploty jsou nepříznivé ještě více v kombinaci s nedostatkem vody v půdě. Stejně tak nepůsobí příznivě prudké střídání vyšších denních a nízkých nočních teplot. Ve fázi dozrávání se považují za optimální teploty okolo 22-25 °C. Velmi vysoké teploty nad 35 °C působí nepříznivě na proces konečného formování zrna a způsobují nejen snížení úrody, ale také snížení semenářských kvalit a biologické hodnoty osiva. Kromě vhodné teploty je samozřejmě také důležitý dostatek slunečního světla a vody (Fecenko & Ložek 2000).

Pšenice ozimá začíná svůj vývoj již v obilce při klíčení, kde působením enzymatické činnosti dochází k rozkladu složitějších organických látek na látky jednoduché. Tyto jednoduché látky využívá zárodek pro svůj růst. Na chemickém složení obilky následně závisí stavba kořenového systému. Každé osivo by mělo být kvalitní, bohaté na zásobní látky a zároveň by se mělo vyznačovat vysokou enzymatickou aktivitou. Uvedené faktory se následně odrazí v klíčivosti osiva. Důležitou roli hraje termín setí pšenice ozimé, který limituje délku podzimní vegetace. Brzké výsevy přispívají při optimálních povětrnostních podmínkách k vyšší tvorbě sušiny během podzimu a tím přispívají k vyšší vitalitě rostlin a jejich schopnosti přečkat zimu. Časné výsevy však přináší i rizika spojená například s vyšším výskytem virových chorob (Hřivna 2012). V tabulce č. 3 jsou uvedeny hodnoty optimálních zásob živin v půdě pro pěstování pšenice ozimé.

Tabulka č. 3: Optimální zásoba živin v půdě pro pěstování pšenice ozimé (mg/kg) (Hřivna 2012)

Dobrá zásoba	Půdní druh		
	Lehká	Střední	Těžká
P	81 - 115		
K	161 - 275	171 - 310	261 - 350
Ca	1801 - 2800	2001 - 3300	3001 - 4200
Mg	136 - 200	161 - 265	221 - 330

Rozhodujícími faktory vytvářející předpoklady dobrých a kvalitních sklizní pšenice ozimé jsou vysoká půdní úrodnost, vhodná předplodina a správná výživa rostliny. Vhodná předplodina a následně i její zbytky pozitivně ovlivňují půdní vlastnosti jako jsou půdní struktura, biologická aktivita či fyzikální poměry v půdě a také jsou důležité pro růst pšenice a kvalitu zrna. Jako předplodiny pšenice jsou v podmínkách s dostatečným množstvím srážek vhodné vojtěška, luskoviny a jetel. Například bobovité rostliny zanechávají v půdě velké množství posklizňových zbytků a redistribuují tak živiny jako hořčík, fosfor, draslík a vápník z hlubších půdních vrstev do ornice. Kořenový systém pšenice dosahuje na půdách hloubky 70-100 cm, největší část se pak rozkládá v orniční vrstvě do 40 cm. Výhodou ozimých forem pšenice oproti těm jarním je lepší zakořenění a částečné odnožení, které probíhá již na podzim či časně na jaře (Vaněk et al. 2007; Zimolka et al. 2005).

Velký význam má obsah bílkovin v pšeničném zrně, který se pohybuje průměrně okolo 10-16 %. Kvalita bílkovin je určena skladbou aminokyselin. O jakosti pšeničné mouky pak rozhoduje obsah a kvalita lepku, na kterých závisí kvalita pečárenských výrobků. Chemický obsah zrna ovlivňují kromě výživy rostlin pšenice také klimatické a půdní podmínky a agrotechnika (Fecenko & Ložek 2000).

Pšenici ozimou je možné pěstovat po obilninách, luskovinách, jetelovinách, okopaninách, řepce nebo kukuřici (Vach & Javůrek 2009). Zimolka et al. (2005) naopak pěstování pšenice ozimé po obilninách nedoporučuje z důvodu nebezpečí vyššího výskytu chorob a škůdců a zhoršení výnosové stability. Opakované pěstování pšenice ozimé za sebou se podobně jako u ostatních obilnin nedoporučuje, neboť tím dochází ke zhoršení půdních podmínek a rostlinám hrozí napadení chorobami a škůdci (Kuchtík et al. 2005).

3.6.3 Výživa a hnojení pšenice ozimé

Hnojení pšenice má přímý vliv na výnos a kvalitu zrna a nepřímo se podílí na obnově půdní úrodnosti dodáním živin, které byly sklizní odebrány. Přímý vliv hnojení na produkci pšenice ozimé se více projevuje na půdách s nižší úrodností ve srovnání s úrodnými půdami. Vlastní hnojení by mělo vycházet z půdní úrodnosti, biologických zvláštností odrůd, stavu porostu a průběhu povětrnosti. Pšenice ozimá se řadí mezi plodiny se střední potřebou živin. Na 1 tunu zrna a odpovídající množství slámy a kořenů odčerpá pšenice ozimá v průměru 25 kg dusíku, 20 kg draslíku, 5 kg fosforu, 4 kg síry a 2,4 kg hořčíku. Průměrné odběry živin pšenicí ozimou jsou uvedeny v tabulce č. 4. Pro optimální růst a vývoj pšenice je důležitý dostatek přístupných živin i v podzimním období (Vaněk et al. 2007; Zimolka et al. 2005). Dostatečným příjmem živin na podzim si rostliny vytvoří dostatečné energetické zásoby pro zimní období, neboť v zimě se příjem živin zcela zastavuje. Stejně tak je příjem živin během podzimní vegetace důležitý z hlediska kvalitního přezimování porostů pšenice ozimé (Hřivna, 2012).

Tabulka č. 4: Průměrný odběr živin pšenice ozimé (Klír et al. 2007)

Plodina	Produkt	Odběr živin (kg/t)		
		N	P	K
Pšenice ozimá (12% bílkovin)	zrno	17,9	3,3	3,7
	sláma	5,2	0,9	10,0
	celkem	22,1	4,0	11,7
Pšenice ozimá (14 % bílkovin)	zrno	20,9	3,3	3,7
	sláma	4,3	0,9	10,0
	celkem	24,3	4,0	11,7

V případě, že rostlina nemá dostatek živin, dochází k omezování metabolických procesů, rostlina slábne, špatně odnožuje a nevytváří dostatečný kořenový systém, při silnějších zimách může i ojediněle vymrzat. Nedostatečné zásobení živin ovlivňuje i řadu parametrů jako je počet klasů na jednotce plochy, počet zrn v klasu a hmotnost tisíce zrn (Zimolka et al. 2005). Pšenice je citlivá na nízkou hodnotu pH půdy a z důvodu, že obvykle následuje po předplodinách, které se vápní, není nutné ji přímo vápnit (Vaněk et al. 2007).

Hřivna (2012) uvádí, že stanovení dávky hnojiva je dáno součinem odběrového normativu na 1 tunu produkce zrna a plánovaného výnosu. Konečný výsledek je možné následně upravit odpočtem živin, které se navrací do půdy v posklizňových zbytcích. Pokud je zásoba živin v půdě nízká, měla by být vypočtená dávka živin navýšena o 25-50 %. Naopak v případě, že je zásoba živin vysoká, je proveden odečet od vypočteného součinu. Dle Fecenka & Ložka (2000) musí správná a vědecky podložená aplikace hnojiv bezprostředně vycházet ze znalostí významu a funkce jednotlivých procesů příjmu, transportu, akumulace a využití živin.

Jedním z nejvýznamnějších opatření, které u pšenice ozimé ovlivňuje utváření výnosových prvků, společně se samotným výnosem a kvalitou zrna, je výživa dusíkem. Je tedy velmi důležité zajistit rostlinám pšenice ozimé dostatek dusíku v půdě v období jeho

potřeby. Pro zajištění kvalitního výnosu a rentability produkce je potřeba po zohlednění všech podmínek stanovit celkovou dávku dusíku v minerálních hnojivech a současně období aplikace hnojiv (Vaněk et al. 2007). Dusík přijímá pšenice ozimá od počátku růstu až do jeho ukončení. Proto je důležité při hnojení dusíkem aplikovat ho podle fáze vývoje, ve které se obilnina nachází, nikoli najednou (Hřivna 2012). Zároveň také značná pohyblivost minerálních forem dusíku v půdě neumožňuje jednorázové hnojení dusíkatými hnojivy, a to je další důvod, proč je nutné časové rozdělení hnojení. Převážnou část dusíku v minerálních hnojivech je potřeba aplikovat na počátku jarní vegetace a to z toho důvodu, aby rostliny měly dostatečné množství dusíku v období svého intenzivního růstu. Dodaný dusík by měl společně s půdním minerálním dusíkem krýt potřebu rostlin (Vaněk et al. 2007). Hnojení dusíkem se pohybuje v rozmezí 40-120 kg na hektar a rozděluje se na základní (předset'ové) hnojení na podzim, dále regenerační hnojení na jaře, produkční přihnojení a pozdní přihnojení (Kuchtík et al. 2005). Dělené dávky dusíku jsou efektivní rovněž z ekonomického hlediska, neboť je jimi dosaženo vyššího využití N rostlinou, což vede k výraznějším vlivům na výnosové prvky (Zimolka et al. 2005).

Doporučené dávky fosforu a draslíku se aplikují v celé dávce na podzim před set'ovou orbou a dávku se podle zásoby fosforu a draslíku v půdě, obvykle se pohybují v rozmezí od 20-40 kg fosforu na hektar a 50-170 kg draslíku na hektar (Kuchtík et al. 2005).

Organické hnojení se u pšenice ozimé provádí pouze na méně kvalitních půdách a po horší předplodině (Kuchtík et al. 2005). Vaněk et al. (2007) doporučují při dostatku organických hnojiv jejich aplikaci v podnicích s vysokým zastoupením obilnin a uvádějí dávku do výše 20 t hnoje na hektar. Barzegar et al. (2002) uvádějí pozitivní vliv organických hnojiv na výnosy pšenice ozimé.

Hnojení pšenice ozimé hořčíkem

Základní hnojení hořčíkem by mělo být provedeno při předset'ové přípravě podobně jako u hnojení fosforem a draslíkem. Dávka hořečnatého hnojiva se odvíjí od plánovaného výnosu zrna (Hřivna 2012). Vhodným obdobím ke hnojení je podzim, a to nejpozději při předset'ové přípravě (Vaněk et al. 2007). Chwil (2009) uvádí, že aplikace hořčíku ještě před samotným setím vede k vyšším výnosům pšenice ozimé. Při hnojení pšenice ozimé hořčíkem je rozhodujícím parametrem obsah Mg, který je přístupný v půdě. Do obsahu Mg nebývá zahrnut hořčík obsažený v posklizňových zbytcích. Aplikace hořečnatých hnojiv (např. Kieseritu nebo hořké soli) se obvykle provádí samostatně nebo v rámci vápnění dolomitickým vápencem. Kromě hořečnatých hnojiv je hořčík obsažen také v draselných či dusíkatých hnojivech (Zimolka et al. 2005). Kuchtík et al. (2005) doporučují aplikaci hořčíku během vegetace na list. Dle Vaňka et al. (2007) je přihnojování během vegetace účelné pouze při nedostatku hořčíku. Podle Fecenka & Ložka (2000) bylo nejlepších výsledků dosaženo při aplikaci hořčíku brzy na jaře.

Hořčík má přímý vliv na kvalitu a výnos zrna pšenice ozimé (Senbayram et al. 2015). Zároveň také ovlivňuje obsah bílkovin v zru (Chwil 2009). Při nedostatku hořčíku ve výživě pšenice ozimé se snižuje výkon fotosyntézy, klesá intenzita proteosyntézy a zvyšuje se obsah aminokyselin a amidů, což následně vede ke snížení kvality ozimé pšenice. Deficit hořčíku má u pšenice také negativní vliv na mrazuvzdornost rostliny (Hřivna 2012). Na půdách

s nedostatkem hořčíku je rovněž negativně ovlivněn jeden z důležitých parametrů hodnocení kvality pšeničných zrn, a to hmotnost tisíce zrn (Marschner 1995).

Gransee & Führs (2013) ve své práci uvádějí, že absorpci Mg u pšenice ovlivňuje i dodávaná forma dusíku. Například zvýšená dávka dusičnanů následně zvýšila příjem hořčíku. Stupňovitými dávkami dusíkatých hnojiv je možné částečně podpořit příjem ostatních živin (Hřivna 2012).

4 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 (Lukavec, Červený Újezd, Hněvčeves a Praha-Suchdol). Půdně-klimatické charakteristiky jsou patrné z tabulky č. 5. Na parcelkách jsou pěstovány v tříhonném osevním sledu tyto plodiny: brambory (kukuřice na stanovišti Červený Újezd), 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. 5: Základní charakteristika pokusných stanovišť

Stanoviště	Červený Újezd	Hněvčeves	Lukavec	Praha-Suchdol
Lokalizace	50°4'22"N, 14°10'19"E	50°18'46"N, 15°43'3"E	49°33'23"N, 14°58'39"E	50°7'40"N, 14°22'33"E
Nadmořská výška (m n. m.)	398	265	610	286
Průměrná roční teplota (°C)	7,7	8,2	7,7	9,1
Průměrné roční srážky (mm)	493	573	666	495
Půdní typ	Hnědozem	Hnědozem	Kambizem	Černozem
Půdní subtyp	<i>modální</i>	<i>modální</i>	<i>oglejená</i>	<i>modální</i>
Půdní druh ¹⁾	prachovitá hlína	prachovitá hlína	písčité hlína	prachovitá hlína
pH ²⁾	6,74 (±0,2)	6,20 (±0,2)	5,25 (±0,17)	7,5 (±0,10)
P ³⁾	140 (±29)	96 (±12)	183 (±15)	79 (±10)
K ³⁾	196 (±14)	203 (±37)	245 (±28)	236 (± 23)
Ca ³⁾	2720 (±212)	2079 (±251)	1220 (±119)	7531 (±1710)
Mg ³⁾	89 (±11)	125 (±23)	74 (±13)	167 (±20)

¹⁾ dle NRSC USDA

²⁾ Stanoveno 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 bylo 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 hořčíku v hnojivech u jednotlivých variant jsou uvedeny v tabulce č. 6. Pro potřeby pokusu jsou používány čistírenské kaly z Ústřední čistírny odpadních vod Praha Trója. Živiny z průmyslových hnojiv jsou dodávány v ledku amonném s vápencem – LAV (27,5 %), trojitým superfosfátu (21 % P) a 60 % draselné soli (50 % K).

Celý systém (kromě nehnojené kontroly) byl 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.

Tabulka č. 6: 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 70 kg Mg	0	0
hnůj	330 kg N 30 kg Mg	0	0
NPK ¹⁾	120 kg N	140 kg N	70 kg N
	30 kg P	30 kg P	30 kg P
	100 kg K	100 kg K	100 kg K

¹⁾ U varianty NPK byly živiny dodávány v minerální formě

Odběr vzorků ornice (0-30 cm) byl prováděn každoročně po sklizni plodin. 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 ukončení cyklu osevního postupu, tj. roku 2017.

4.1 Analytická stanovení

Extrakce demineralizovanou vodou

Extrakt pro stanovení okamžitě přístupného hořčíku byly zhotoveny dle Luscombe et al. (1979). K 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.

Extrakce CaCl₂/DTPA (CAD)

Obsah mobilních forem hořčíku byl stanoven dle evropské normy EN 13651. Tato norma popisuje extrakční metodu 0,01 mol/l CaCl₂ a 0,002 mol/l Diethylentriaminpentaové kyseliny (DTPA) v poměru (pevná látka / kapalina) 1:10. Po 1 hodině třepání byly vzorky zfiltrány a v získaných extraktech byl měřen hořčík.

Obsah hořčíku stanovený metodou Mehlich 3

Ke stanovení obsahu potenciálně přístupného hořčíku byl použit extrakční roztok Mehlich 3 (Mehlich, 1984) složený z CH₃COOH (0,2 mol/l), NH₄F (c=0,015 mol/l), HNO₃ (c=0,013 mol/l), NH₄NO₃ (c=0,25 mol/l) a EDTA (c=0,001 mol/l). Poměr zeminy a vyluhovadla činil 1:10 (10 g zeminy, 100 ml vyluhovadla). Třepání na třepače VWR®Advanced 15000 Orbital Shaker probíhalo po dobu 10 minut. Získaný roztok byl filtrován za použití filtračních papírů č. 388. Pro vyloučení chyby měření byly extrakty

zhotoveny ve dvou opakováních.

Stanovení obsahu reziduálního hořčíku lučavkou královskou

Postup byl proveden dle normy ISO 11466:1995. 1 g vzorku byl extrahován 10 ml roztoku lučavky královské (konc. HCl a konc. HNO₃ v poměru 3:1) za pomoci nízkotlakého mikrovlnného rozkladu po dobu 40 minut.

Měření obsahu hořčíku 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)

Výnosy rostlin

Na všech stanovištích byly průběžně monitorovány výnosy sušiny zrna pšenice ozimé. Podle odběrových normativů uváděných dle Klíra et al. (2007), tj. 1,3 kg Mg na 1 t výnosu zrna tak bylo možné orientačně dopočítat odběr hořčíku hlavním produktem.

4.2 Statistické vyhodnocení

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

5 Výsledky

V této části diplomové práce budou prezentovány dílčí výsledky, které byly naměřeny na stanovištích Červený Újezd, Hněvčeves, Lukavec a Praha-Suchdol. Hodnocen je okamžitě přístupný hořčík stanovený vodným výluhem, přístupný hořčík stanovený extrakcí $\text{CaCl}_2/\text{DTPA}$ (CAD), potenciálně přístupný hořčík stanovený metodou Mehlich 3 a jako poslední reziduální hořčík stanovený výluhem lučavkou královskou. Mezi sebou jsou porovnávány výsledky z roku 1996, tedy před založením samotného pokusu a rokem 2017.

5.1 Obsah okamžitě přístupného hořčíku v půdě stanovený vodným výluhem

V tabulce č. 7 jsou uvedeny vstupní naměřené hodnoty okamžitě přístupného hořčíku z roku 1996 společně s průměrnými hodnotami obsahů a směrodatných odchylek v rámci jednotlivých stanovišť. Nejvyšší hodnota obsahu (20,3 mg Mg/kg) a stejně tak nejvyšší průměrná hodnota obsahu (16,9 mg Mg/kg) byla dosažena na stanovišti Červený Újezd. Následovalo stanoviště Praha-Suchdol s průměrným obsahem okamžitě přístupného Mg 14,7 mg Mg/kg. Stanoviště Hněvčeves dosahovalo průměrné hodnoty obsahu 13,2 mg Mg/kg a jednoznačně nejnižší průměrný obsah s hodnotou 6,40 mg Mg/kg vykazovalo stanoviště Lukavec. Největší variabilita hodnot obsahů okamžitě přístupného hořčíku byla zaznamenána na stanovištích Červený Újezd a Praha-Suchdol. Naopak nejnižší variabilitu hodnot bylo možné sledovat na stanovišti Lukavec.

Z hlediska následně založených jednotlivých variant hnojení byl nejvyšší průměrný obsah okamžitě přístupného hořčíku na nehnojené kontrolní variantě, a to 15,5 mg Mg/kg. Varianty, kde měl být později aplikován kal a NPK dosahovaly velmi podobných hodnot obsahů, a to v případě kalu 12,4 mg Mg/kg a v případě NPK 12,1 mg Mg/kg. Nejnižší průměrný obsah (11,3 mg Mg/kg) byl dosažen na variantě, kde následovala aplikace hnoje. Vzhledem k malým směrodatným odchylkám však lze stanoviště z hlediska Mg považovat za vyrovnané a tak i vhodné k založení pokusu.

Tabulka č. 7: Obsah okamžitě přístupného Mg na jednotlivých stanovištích v roce 1996 (mg/kg)

Hnojivo	Červený Újezd	Hněvčeves	Lukavec	Praha-Suchdol
Kontrola	20,3	15,9	6,80	18,8
Kal	17,8	11,9	5,60	14,3
Hnůj	13,3	12,1	6,50	13,4
NPK	16,3	12,9	6,70	12,3
Průměr	16,9	13,2	6,40	14,7
Směrodatná odchylka	2,50	1,60	0,47	2,47

Hodnoty okamžitě přístupného hořčíku naměřené v roce 2017, tedy více než 20 let od založení pokusu, zobrazuje tabulka č. 8. V uvedeném roce byla nejvyšší hodnota okamžitě přístupného hořčíku (24,2 mg Mg/kg) naměřena na stanovišti Hněvčeves na variantě, kde byl

aplikován hnůj. Naopak nejnížší obsah byl stejně jako v roce 1996 naměřen na stanovišti Lukavec, a to 3,50 mg Mg/kg na variantě hnojené NPK. Z hlediska průměrných hodnot byla nejvyšší průměrná hodnota obsahu Mg 16,3 mg Mg/kg, a to na variantě hnojené hnojem. Průměrný obsah Mg po hnojení kalem byl na jednotlivých stanovištích jen nepatrně nižší a dosahoval hodnoty 15,9 mg Mg/kg. Nejnížší průměrná hodnota obsahu Mg byla zjištěna na variantě hnojené NPK, a to 12,4 mg Mg/kg.

Z uvedeného vyplývá, že obsah okamžitě přístupného hořčíku dosahuje po aplikaci hnoje a kalu srovnatelných hodnot.

Tabulka č. 8: Obsah okamžitě přístupného Mg na jednotlivých stanovištích v roce 2017 (mg/kg)

Hnojivo	Červený Újezd	Hněvčeves	Lukavec	Praha-Suchdol
Kontrola	19,7	23,2	5,20	15,3
Kal	18,0	23,7	7,30	14,7
Hnůj	17,8	24,2	6,60	15,9
NPK	15,4	18,5	3,50	12,2

Rozdíly zjištěných obsahů okamžitě přístupného hořčíku mezi lety 1996 a 2017 zobrazuje tabulka č. 9. K nejvyššímu nárůstu obsahu došlo na stanovišti Hněvčeves, a to v případě varianty hnojené hnojem o 12,1 mg, následované pak variantou hnojenou kalem, kde nárůst obsahu činil na stejném stanovišti 11,8 mg Mg/kg. I na ostatních stanovištích došlo po aplikaci kalu ke zvýšení obsahu okamžitě přístupného hořčíku, avšak nárůst už nebyl tak vysoký, jako v případě stanoviště Hněvčeves a pohyboval se od 0,20-1,70 mg Mg/kg. Na nehnojené variantě a stejně tak po aplikaci NPK došlo na všech stanovištích, kromě stanoviště Hněvčeves, ke snížení obsahu Mg.

Tabulka č. 9: Rozdíl obsahu okamžitě přístupného Mg v mg/kg na jednotlivých stanovištích mezi lety 1996-2017 (mg/kg)

Hnojivo	Červený Újezd	Hněvčeves	Lukavec	Praha-Suchdol
Kontrola	-0,60	7,30	-1,60	-3,50
Kal	0,20	11,8	1,70	0,40
Hnůj	4,50	12,1	0,10	2,50
NPK	-0,90	5,60	-3,20	-0,10

5.2 Obsah přístupného hořčíku v půdě stanovený CAD

Jako další byl na pokusných stanovištích stanovován obsah přístupného hořčíku stanovený extrakcí $\text{CaCl}_2/\text{DTPA}$ (CAD). Naměřené vstupní hodnoty obsahu Mg v mg/kg z roku 1996 s průměrnými obsahy a směrodatnými odchylkami jednotlivých stanovišť uvádí tabulka č. 10. Nejvyšší obsah přístupného Mg byl naměřen na stanovišti Hněvčeves, a to 132 mg Mg/kg. Na tomtéž stanovišti bylo rovněž dosaženo nejvyšší průměrné hodnoty obsahu přístupného hořčíku (113 mg Mg/kg). Na stanovišti Červený Újezd dosahoval

průměrný obsah Mg hodnoty 98 mg Mg/g, následovalo stanoviště Praha-Suchdol s průměrným obsahem 95,9 mg Mg/kg. Nejnižší průměrný obsah, hodnotu 76,1 mg Mg/kg vykazovalo stanoviště Lukavec. Na stejném stanovišti byl zjištěn i absolutně nejnižší obsah přístupného Mg, který dosahoval hodnoty 56,2 mg Mg/kg. Největší variabilitu hodnot obsahů přístupného hořčíku bylo možné sledovat na stanovišti Lukavec, nejnižší variabilitu hodnot obsahů pak na stanovišti Praha-Suchdol.

Podle jednotlivých variant hnojení byl nejvyšší průměrný obsah Mg zjištěn na kontrolní variantě – 107 mg Mg/kg, následovala varianta, kde byl aplikován hnůj s obsahem 95,9 mg Mg/kg. O něco nižší průměrný obsah přístupného hořčíku (94,2 mg Mg/kg) byl dosažen na variantě hnojené NPK a nejnižší průměrná hodnota obsahu přístupného Mg (86,3 mg Mg/kg) byla zjištěna na variantě, kde byl aplikován kal. Podobně jako u výsledků vodného výluhu lze stanoviště díky nízkým směrodatným odchylkám považovat za vyrovnané.

Tabulka č. 10: Obsah přístupného Mg na jednotlivých stanovištích v roce 1996 (mg/kg)

Hnojivo	Červený Újezd	Hněvčeves	Lukavec	Praha-Suchdol
Kontrola	108	132	90,1	96,0
Kal	86,7	109	56,2	93,1
Hnůj	99,9	103	76,2	104
NPK	97,6	107	81,9	90,7
Průměr	98,0	113	76,1	95,9
Směrodatná odchylka	7,54	11,5	12,5	4,97

Hodnoty přístupného hořčíku naměřené v roce 2017 jsou uvedeny v tabulce č. 11. Nejvyšší hodnota přístupného hořčíku (149 mg Mg/kg) byla naměřena na stanovišti Hněvčeves na variantě, kde byl aplikován hnůj. Z hlediska průměrných hodnot však bylo dosaženo nejlepších výsledků po aplikaci kalu, neboť nejvyšší průměrná hodnota na jednotlivých stanovištích činila 117 mg Mg/kg. Nejnižší průměrný obsah přístupného hořčíku byl zjištěn u varianty NPK, přičemž absolutně nejnižší hodnota byla naměřena rovněž u této varianty na stanovišti Lukavec.

Tabulka č. 11: Obsah přístupného Mg na jednotlivých stanovištích v roce 2017 (mg/kg)

Hnojivo	Červený Újezd	Hněvčeves	Lukavec	Praha-Suchdol
Kontrola	95,1	132	81,9	114
Kal	92,1	135	96,2	146
Hnůj	124	149	85,2	107
NPK	89,7	109	64,5	106

Rozdíl obsahu přístupného Mg mezi roky 1996 a 2017 uvádí tabulka č. 12. Nejvyšší nárůst byl zjištěn po aplikaci kalu na stanovišti Praha-Suchdol, a to o 53,3 mg Mg/kg. Takto vysoký nárůst nebyl zaznamenán na žádném ze stanovišť ani po aplikaci hnoje. Stejně tak na stanovištích Lukavec a Hněvčeves byl na variantách hnojených kalem zaznamenán vysoký

nárůst obsahu přístupného Mg, pouze na stanovišti Červený Újezd byl nárůst obsahu o něco nižší, a to o 5,40 mg Mg/kg.

Tabulka č. 12: Rozdíl obsahu přístupného Mg na jednotlivých stanovištích mezi lety 1996-2017 (mg/kg)

Hnojivo	Červený Újezd	Hněvčeves	Lukavec	Praha-Suchdol
Kontrola	-12,6	-0,40	-8,22	17,7
Kal	5,40	25,4	40,0	53,3
Hněj	23,80	45,4	9,00	3,00
NPK	-7,90	2,30	-17,4	15,0

5.3 Obsah potenciálně přístupného hořčíku v půdě stanovený metodou Mehlich 3

Jako další byl stanovován potenciálně přístupný hořčík. Jeho vstupní hodnoty naměřené v roce 1996 jsou společně s průměry hodnot obsahů a směrodatnými odchylkami jednotlivých stanovišť uvedeny v tabulce č. 13. Absolutně nejvyšší obsah potenciálně přístupného hořčíku, hodnotu 180 mg Mg/kg, vykazovalo stanoviště Praha-Suchdol. Na stejném stanovišti byl současně naměřen i nejvyšší průměrný obsah, který byl 154 mg Mg/kg. Další stanoviště, Hněvčeves, dosahovalo hodnoty průměrného obsahu potenciálně přístupného Mg 121 mg Mg/kg. Druhý nejnižší průměrný obsah (82,5 mg Mg/kg) byl stanoven na stanovišti Červený Újezd a zcela nejnižší průměrnou hodnotu obsahu vykazovalo stanoviště Lukavec s obsahem 65,8 mg Mg/kg. Uvedené stanoviště lze s ohledem na nízké směrodatné odchylky považovat za vyrovnané a podobně jako u předchozích výsledků rovněž vhodné k založení pokusu.

Tabulka č. 13: Obsah potenciálně přístupného Mg na jednotlivých stanovištích v roce 1996 (mg/kg)

Hnojivo	Červený Újezd	Hněvčeves	Lukavec	Praha-Suchdol
Kontrola	85,0	108	62,4	180
Kal	83,0	128	56,4	146
Hněj	67,0	109	63,1	148
NPK	95,0	139	81,1	143
Průměr	82,5	121	65,8	154
Směrodatná odchylka	10,0	13,1	9,24	14,8

Hodnoty potenciálně přístupného hořčíku z roku 2017 uvádí tabulka č. 14. Nejvyšší hodnota byla zjištěna 181 mg Mg/kg na stanovišti Praha-Suchdol na variantě, kde byl aplikován hnůj. Z hlediska průměrných hodnot obsahů na jednotlivých stanovištích byla nejvyšší průměrná hodnota 142 mg Mg/kg stanovena rovněž na stanovištích, kde byl aplikován hnůj. Aplikace kalu dosahovala oproti hnoji jen nepatrně nižší průměrné hodnoty,

a to 134 mg Mg/kg. Nejnižší průměrný obsah potenciálně přístupného Mg (98,5 mg Mg/kg) byl zjištěn na variantách stanovišť, kde proběhla aplikace NPK. Stejně tak absolutně nejnižšího obsahu (68,1 mg Mg/kg) bylo dosaženo po aplikaci NPK na stanovišti Lukavec.

Tabulka č. 14: Obsah potencionálně přístupného Mg na jednotlivých stanovištích v roce 2017 (mg/kg)

Hnojivo	Červený Újezd	Hněvčeves	Lukavec	Praha-Suchdol
Kontrola	111	116	68,1	167
Kal	115	149	93,4	179
Hnůj	126	166	94,3	181
NPK	102	112	56,9	123

Rozdíly v obsahu potenciálně přístupného hořčíku mezi lety 1996 a 2017 uvádí tabulka č. 15. Nejvyšší nárůst – o 58 mg Mg/kg byl zaznamenán na stanovišti Červený Újezd, a to na variantě, kde byl aplikován hnůj. Po aplikaci kalu se obsah potenciálně přístupného hořčíku rovněž zvýšil, nicméně ve srovnání s hnojem většinou podstatně méně. Pouze na stanovišti Lukavec byl zaznamenán vyšší nárůst obsahu Mg u varianty hnojené kalem oproti variantě, kde byl aplikován hnůj.

Tabulka č. 15: Rozdíl obsahu potenciálně přístupného Mg na jednotlivých stanovištích mezi lety 1996-2017 (mg/kg)

Hnojivo	Červený Újezd	Hněvčeves	Lukavec	Praha-Suchdol
Kontrola	26,0	8,00	6,00	-13,0
Kal	32,0	21,0	37,0	33,0
Hnůj	58,0	57,0	31,0	34,0
NPK	7,00	-27,0	-24,0	-20,0

5.4 Obsah reziduálního hořčíku v půdě stanovený výluhem lučavkou královskou

Jako poslední byl stanovován obsah reziduálního hořčíku. Vstupní hodnoty obsahu z roku 1996 spolu s průměrnými hodnotami obsahů a směrodatnými odchylkami dílčích stanovišť uvádí tabulka č. 16. Nejvyššího průměrného obsahu, hodnoty 6423 mg Mg/kg bylo dosaženo na stanovišti Lukavec. Následovalo stanoviště Praha-Suchdol s průměrným obsahem 6141 mg Mg/kg. Druhý nejnižší průměrný obsah reziduálního hořčíku byl zjištěn na stanovišti Červený Újezd a jeho hodnota byla 5401 mg Mg/kg. Stanoviště Hněvčeves vykazovalo nejnižší průměrný obsah reziduálního Mg, který byl roven 4616 mg Mg/kg. Největší variabilitu hodnot obsahů reziduálního hořčíku bylo možné sledovat na stanovišti Červený Újezd. Nejnižší variabilita hodnot obsahů byla patrná na stanovišti Lukavec. I toto

stanoviště bylo díky nižším směrodatným odchylkám vyrovnané a vhodné k založení pokusu.

Tabulka č. 16: Obsah reziduálního Mg na jednotlivých stanovištích v roce 1996 (mg/kg)

Hnojivo	Červený Újezd	Hněvčeves	Lukavec	Praha-Suchdol
Kontrola	5766	4863	6209	5731
Kal	5095	4590	6446	6431
Hnůj	4425	4697	6319	6099
NPK	6316	4314	6718	6303
Průměr	5401	4616	6423	6141
Směrodatná odchylka	710	199	189	264

Obsahy reziduálního hořčíku z roku 2017 jsou uvedeny v tabulce č. 17. Zde byla nejvyšší hodnota naměřena na stanovišti Lukavec na variantě, kde byl aplikován hnůj. Naopak nejnižší obsah reziduálního Mg byl zjištěn na stanovišti Hněvčeves (4062 mg Mg/kg), a to po aplikaci NPK. Nejvyšší průměrná hodnota naměřená na jednotlivých stanovištích byla zjištěna po aplikaci hnoje, a to 5638 mg Mg/kg. Průměrná hodnota po aplikaci kalu byla jen o 1 mg nižší, proto lze konstatovat, že aplikací hnoje a kalu je dosaženo téměř stejného obsahu reziduálního hořčíku v půdě.

Tabulka č. 17: Obsah reziduálního Mg na jednotlivých stanovištích v roce 2017 (mg/kg)

Hnojivo	Červený Újezd	Hněvčeves	Lukavec	Praha-Suchdol
Kontrola	5381	4586	6189	5647
Kal	5245	4525	6391	6386
Hnůj	4691	4646	7048	6167
NPK	4327	4062	6335	5937

Jednotlivé rozdíly v obsahu reziduálního hořčíku mezi lety 2017 a 1996 jsou uvedeny v tabulce č. 18. K nejzřetelnějšímu navýšení obsahu Mg došlo na stanovišti Lukavec po aplikaci hnoje, a to o 729 mg Mg/kg. Při aplikaci kalu došlo na 3 stanovištích k poklesu obsahu reziduálního hořčíku, pouze na stanovišti Červený Újezd byl zaznamenán nárůst o 150 mg Mg/kg. To ukazuje na fakt, že hnůj je ve srovnání s kalem zdrojem stabilnější formy Mg.

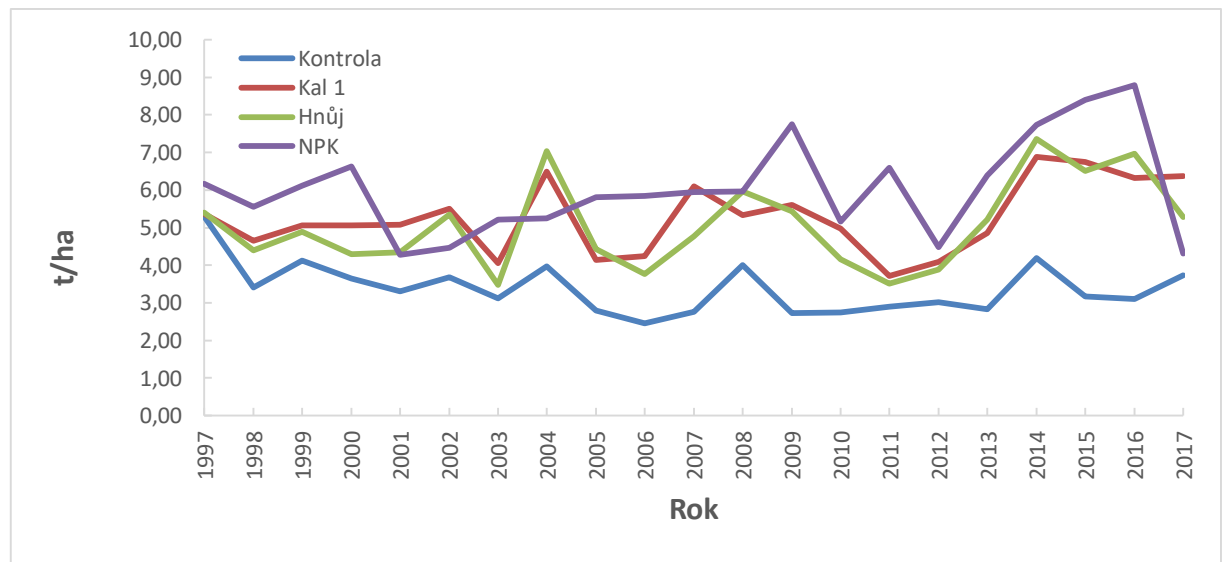
Tabulka č. 18: Rozdíl obsahu reziduálního Mg na jednotlivých stanovištích mezi lety 1996-2017 (mg/kg)

Hnojivo	Červený Újezd	Hněvčeves	Lukavec	Praha-Suchdol
Kontrola	-385	-278	-19,8	-84,3
Kal	150	-65,1	-55,7	-44,6
Hnůj	266	-51,1	729	68,0
NPK	-1989	-252	-383	-366

5.5 Výnosy pšenice ozimé na jednotlivých stanovištích

5.5.1 Stanoviště Červený Újezd

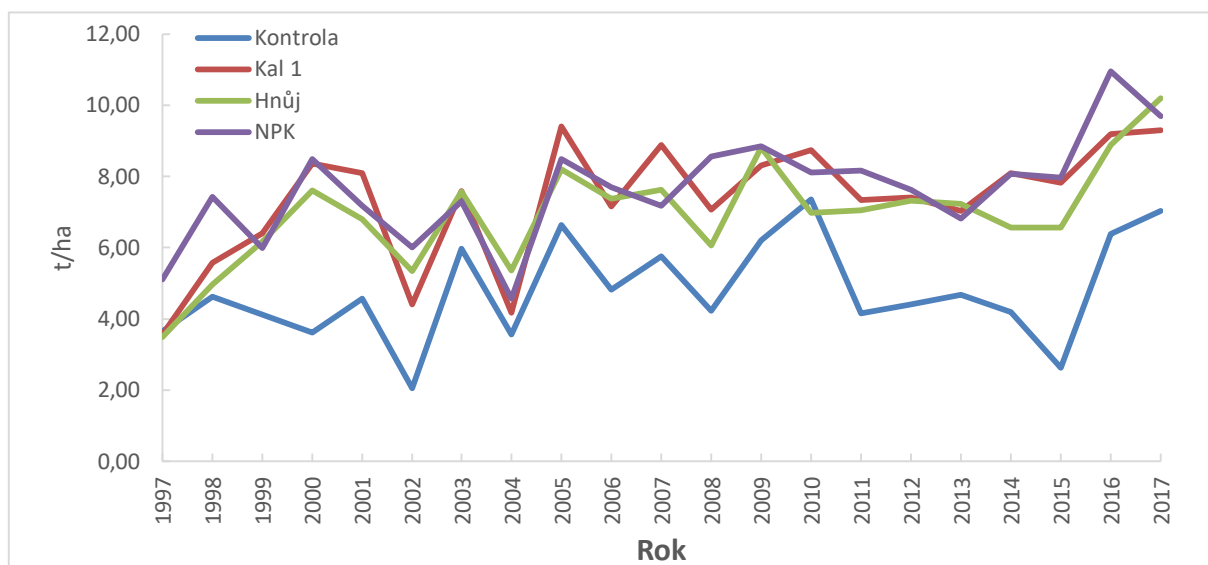
Výnos zrna pšenice ozimé (přepočtený na sušinu) za období let 1997-2017 na stanovišti Červený Újezd udává graf č. 1. Nejvyšší absolutní výnos byl zjištěn v roce 2016 po aplikaci NPK a jeho hodnota byla 8,80 t zrna/ha. Naopak nejnižšího výnosu, hodnoty 2,46 t zrna/ha bylo dosaženo v roce 2006 na kontrolní nehnojené variantě. Z hlediska dlouhodobého průměru hodnot výnosů za roky 1997-2017 bylo dosaženo nejvyššího průměrného výnosu 6,06 t zrna/ha po hnojení NPK. Druhý nejvyšší průměrný výnos dosahovala varianta hnojená kalem, a to 5,30 t zrna/ha. O něco nižších průměrných výnosů zrna (5,09 t/ha) bylo dosaženo aplikací hnoje. Zcela nejnižšího průměrného výnosu 3,28 t zrna/ha bylo stejně jako v případě absolutně nejnižšího výnosu zrna zjištěno na kontrolní nehnojené variantě.



Graf č. 1: Výnos zrna ozimé pšenice na stanovišti Červený Újezd

5.5.2 Stanoviště Hněvčeves

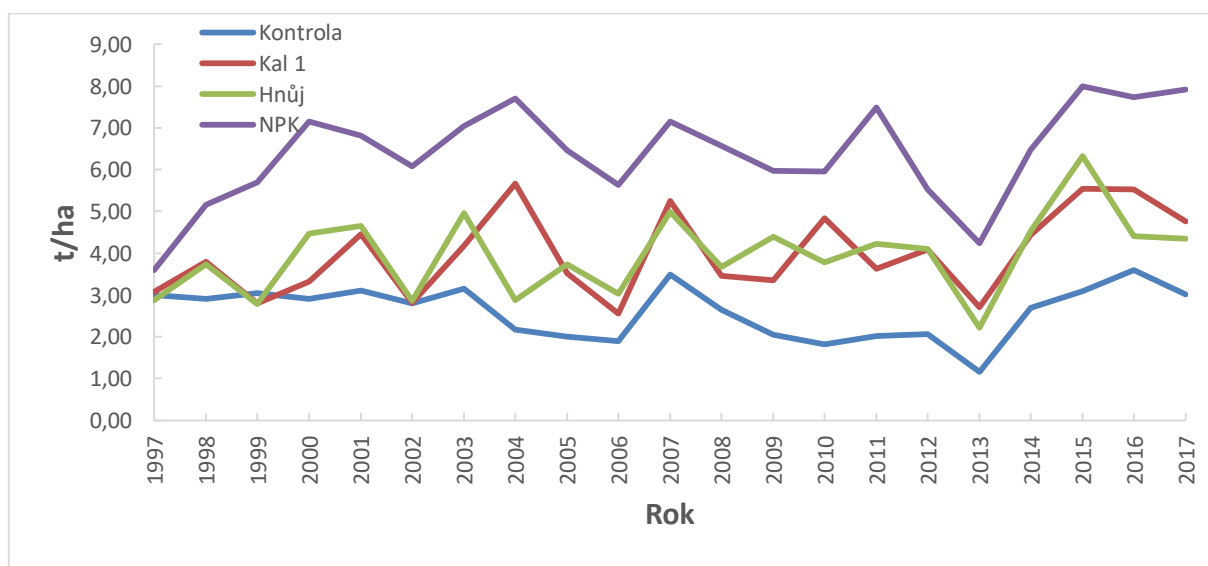
Výnosy zrna ozimé pšenice (přepočtené na sušinu) na stanovišti Hněvčeves za roky 1997-2017 zobrazuje graf č. 2. Na uvedeném stanovišti bylo dosaženo absolutně nejvyššího výnosu, hodnoty 10,95 t/ha v roce 2016 po aplikaci NPK. Nejnižší výnos – 2,06 t/ha byl zaznamenán v roce 2002 na kontrolní nehnojené variantě. Podle dosažených průměrných výnosů vykazovala nejvyššího průměrného výnosu 7,78 t/ha varianta stanoviště, kde proběhla aplikace NPK. Aplikace kalu vedla ke druhému nejvyššímu průměrnému výnosu, hodnotě 7,62 t/ha. Průměrného výnosu 7,25 t/ha bylo dosaženo aplikací hnoje a nejnižší průměrný výnos 4,86 t/ha vykazovala nehnojená kontrolní varianta.



Graf č. 2: Výnos zrna ozimé pšenice na stanovišti Hněvčevy

5.5.3 Stanoviště Lukavec

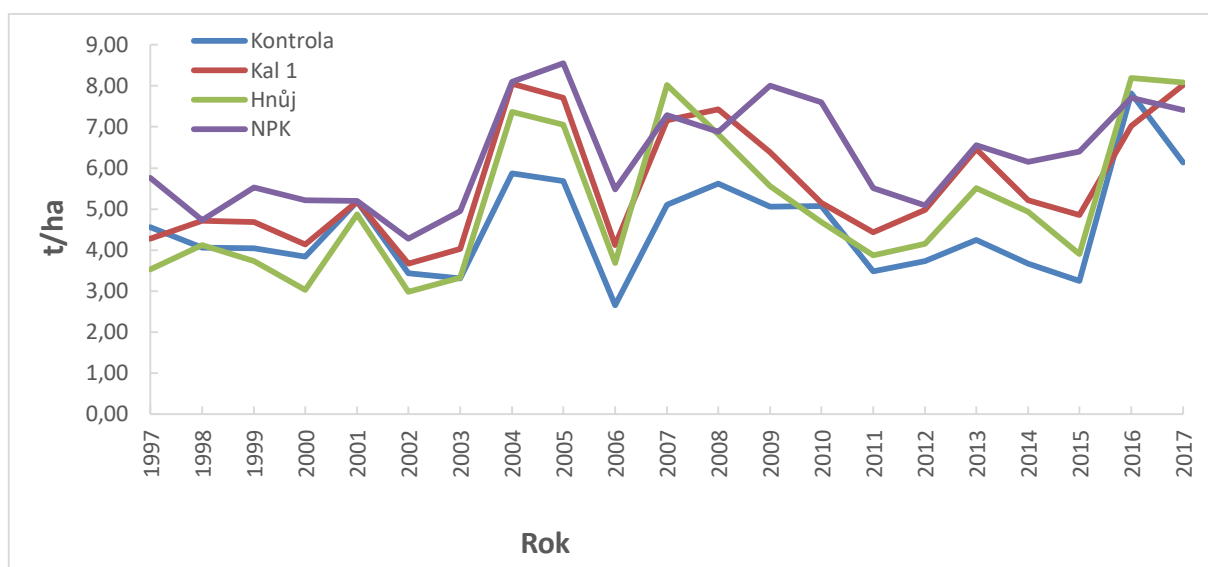
V následujícím grafu č. 3 jsou zobrazeny výnosy zrna ozimé pšenice (po přepočtení na sušinu) na stanovišti Lukavec za období 1997-2017. Absolutně nejvyššího výnosu zrna, celkově 8 t/ha bylo dosaženo v roce 2015 po aplikaci NPK. Současně po aplikaci NPK byl zaznamenán nejvyšší průměrný výnos – 6,61 t/ha. Na variantě stanoviště Lukavec, kde byl aplikován kal, byl dosažen druhý nejvyšší průměrný výnos, a to 4,05 t/ha. Po aplikaci hnoje byl ve srovnání s kalem jen zanedbatelně nižší průměrný výnos zrna (4,02 t/ha). Nejnižší průměrný výnos (2,56 t/ha) a současně absolutně nejnižší výnos (1,15 t/ha) vykazovala nehnojená kontrolní varianta.



Graf č. 3: Výnos zrna ozimé pšenice na stanovišti Lukavec

5.5.4 Stanoviště Praha – Suchdol

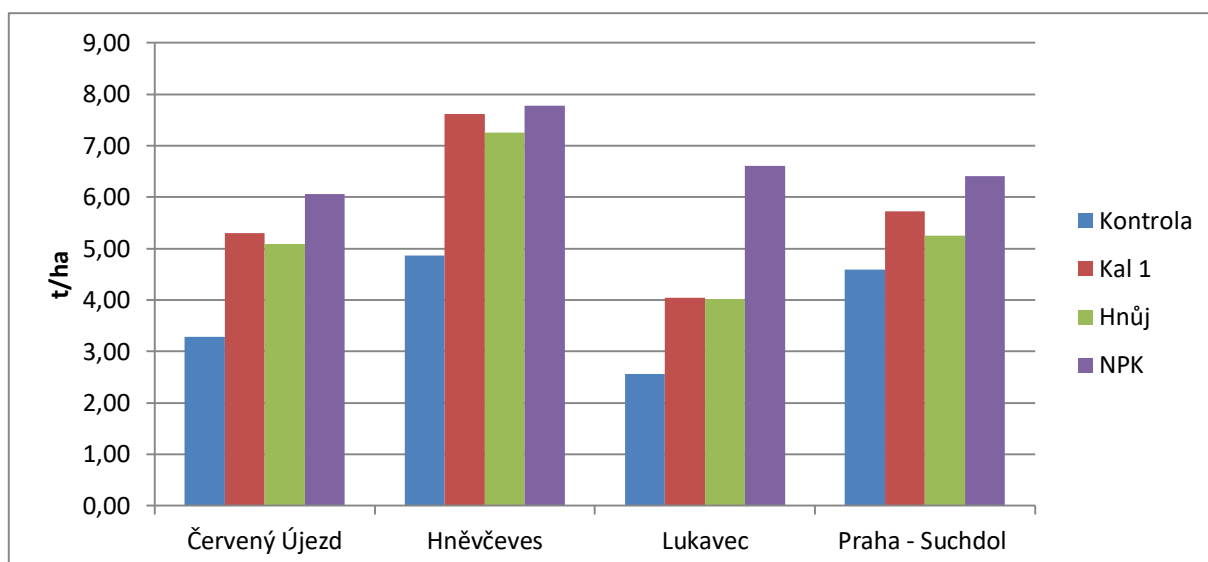
Výnos zrna pšenice ozimé (po přepočtu na sušinu) na stanovišti Praha-Suchdol v letech 1997-2017 uvádí graf č. 4. Absolutně nejvyšší výnos zrna – 8,55 t/ha byl zjištěn v roce 2005 po aplikaci NPK. Stejně tak nejvyššího průměrného výnosu (6,41 t/ha) bylo dosaženo na variantě, kde bylo hnojeno NPK. Následovala varianta hnojená kalem, kde by zaznamenán druhý nejvyšší průměrný výnos zrna pšenice ozimé, a to 5,72 t/ha. Po aplikaci hnoje bylo dosaženo průměrného výnosu 5,25 t/ha, a k nejnižšímu průměrnému výnosu (4,59 t/ha) zrna došlo na nehnojené kontrolní variantě.



Graf č. 4: Výnos zrna ozimé pšenice na stanovišti Praha-Suchdol

5.5.5 Srovnání průměrných výnosů zrna pšenice ozimé na jednotlivých stanovištích

Následující graf č. 5 zobrazuje dosažené průměrné výnosy na jednotlivých 4 stanovištích s různými variantami hnojení. Nejvyšší průměrné výnosy zrna byly dosaženy na stanovišti Hněvčeves, a to v případě všech 4 uvedených variant hnojení. Následovalo stanoviště Praha-Suchdol, dále Červený Újezd a zcela nejnižší průměrné výnosy byly sledovány na stanovišti Lukavec. Jednoznačně k nejvyšším výnosům zrna pšenice ozimé vedla na všech 4 stanovištích aplikace NPK. Stanoviště, kde byl aplikován kal, vykazovala druhé nejvyšší průměrné výnosy zrna. Na stanovišti Hněvčeves byly výnosy zrna po aplikaci NPK a po aplikaci kalu velmi vyrovnané. Druhé nejnižší průměrné výnosy byly zjištěny po aplikaci hnoje, a to na všech uvedených stanovištích bez výjimky. Podle předpokladů nejnižších průměrných výnosů bylo dosaženo na kontrolní nehnojené variantě.



Graf č. 5: Průměrný výnos zrna pšenice ozimé na jednotlivých stanovištích

5.5.6 Průměrný roční odběr hořčíku zrnem pšenice ozimé

Průměrné odběry hořčíku zrnem pšenice ozimé v období let 1997-2017 pro jednotlivé typy hnojení jsou uvedeny v následující tabulce č. 19. Nejvyšší průměrné odběry byly zjištěny po aplikaci NPK, a pohybovaly se od 7,88 kg/ha na stanovišti Červený Újezd do hodnoty 10,1 kg/ha na stanovišti Hněvčeves. Naopak nejnižšího odběru Mg dosahovala při porovnání s ostatními variantami hnojení kontrolní nehnojená varianta, kde se hodnoty odběru hořčíku vyskytovaly v rozmezí hodnot od 3,33 kg/ha na stanovišti Lukavec do 6,32 kg/ha na stanovišti Hněvčeves. Hodnoty průměrného odběru hořčíku pro variantu, kde byl aplikován kal, se pohybovaly od 5,26 kg/ha na stanovišti Lukavec do 9,91 kg/ha na stanovišti Hněvčeves. V případě aplikace hnoje se nacházely hodnoty odběru Mg v intervalu 5,22 kg/ha na stanovišti Lukavec do hodnoty 9,42 kg/ha na stanovišti Hněvčeves.

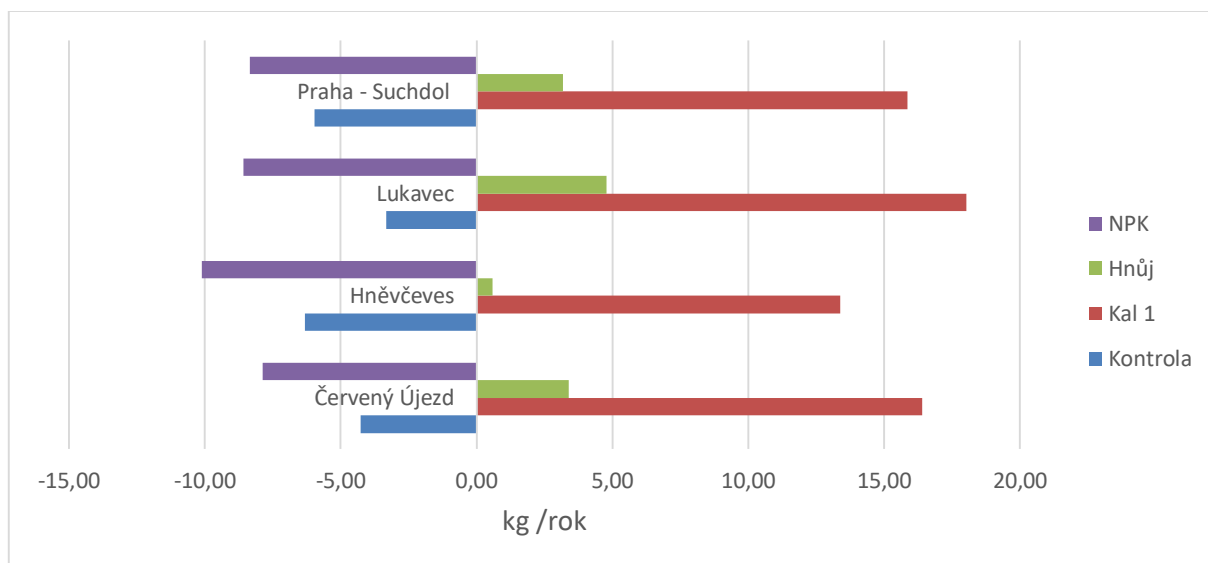
Tabulka č. 19: Průměrný odběr hořčíku zrnem ozimé pšenice na stanovištích (kg/ha/rok)

	Červený Újezd	Hněvčeves	Lukavec	Praha - Suchdol
Kontrola	4,26	6,32	3,33	5,96
Kal 1	6,89	9,91	5,26	7,44
Hnůj	6,61	9,42	5,22	6,83
NPK	7,88	10,1	8,59	8,34

5.5.7 Bilance hořčíku na jednotlivých stanovištích

Na základě rozdílu mezi dodaným a odebraným množstvím hořčíku na jednotlivých stanovištích byla vypočtena zjednodušená bilance hořčíku, která je uvedena v následujícím grafu č. 6. V případě kontrolní nehnojené varianty a varianty, kde proběhla aplikace NPK, vyšly záporné hodnoty bilance. Na variantách, kde byl aplikován hnůj a kal, naopak

vycházely kladné hodnoty bilance hořčíku. Absolutně nejvyšší kladné hodnoty bilance hořčíku byly zaznamenány po aplikaci kalu.



Graf č. 6: Průměrná zjednodušená bilance hořčíku na jednotlivých stanovištích

6 Diskuze

Mezi přirozené zdroje hořčíku v půdě patří minerály, jako jsou dolomit, biotit, amfibol, montmorillonit, olivín nebo pyroxen (Maguire & Cowan 2002; Senbayram et al. 2015). Zároveň však lze hořčík do půdy doplňovat za pomoci různých druhů hnojiv. V rámci této diplomové práce byly jako zdroj hořčíku pro pšenici ozimou aplikovány čistírenské kaly, chlévský hnůj a minerální hnojivo NPK.

Pšenice ozimá je intenzivně pěstovanou plodinou s vysokými nároky a její výnos závisí především na správné výživě, místě pěstování a příslušném agrotechnickém vybavení (Černý et al. 2010).

Dlouhodobý pokus byl založen v roce 1996 a probíhal na čtyřech pokusných stanovištích Praha-Suchdol, Lukavec, Červený Újezd a Hněvčeves. Před založením pokusu v roce 1996 byly na všech čtyřech uvedených stanovištích zjištěny obsahy okamžitě přístupného, přístupného, potenciálně přístupného a reziduálního hořčíku v půdě. Tyto vstupní naměřené hodnoty obsahů jednotlivých forem hořčíku byly následně porovnány s hodnotami naměřenými v roce 2017. V diplomové práci byly použity pro stanovení jednotlivých forem hořčíku metody Mehlich 3, vodný výluh, výluh lučavky královské a extrakce $\text{CaCl}_2/\text{DTPA}$ (CAD). Stanovení metodou Mehlich 3 ve své práci uvádí také Kulhánek et al. (2014). Pomocí uvedené metody je možné kromě hořčíku stanovit i další živiny jako fosfor, draslík a vápník.

V roce 1996, tedy před založením pokusu se hodnoty obsahu okamžitě přístupného hořčíku na jednotlivých stanovištích pohybovaly v rozmezí 5,60-20,3 mg Mg/kg. Naměřené hodnoty obsahu přístupného hořčíku byly od 56,2 do 132 mg Mg/kg. Obsahy potenciálně přístupného hořčíku stanovené metodou podle Mehlich 3 byly zjištěny v rozmezí hodnot 56,4-180 mg Mg/kg. Hřivna (2012) ve své práci uvádí jako optimální zásobu hořčíku v půdě stanoveného stejnou metodou podle Mehlich 3 obsahy 136-200 mg Mg/kg pro lehké půdy. Obsahy reziduálního hořčíku na jednotlivých stanovištích se pohybovaly v intervalu 4314-6718 mg Mg/kg. Velké rozpětí hodnot obsahů jednotlivých forem hořčíku bylo způsobeno variabilitou uvedených stanovišť. Fecenko & Ložek (2000) uvádějí, že obsah hořčíku v půdě ovlivňují pH půdy, půdní druh a půdotvorný substrát. Yan & Hou (2018) ještě doplňují vliv půdního typu. Z uvedených důvodů tedy vyplývá, že obsah hořčíku v půdě může být dosti variabilní.

V roce 2017 byly po aplikaci čistírenského kalu naměřeny na všech čtyřech stanovištích vyšší hodnoty obsahů okamžitě přístupného hořčíku v porovnání s rokem 2017 a pohybovaly se v rozmezí hodnot 7,30-23,7 mg Mg/kg. Ke stejnému zvýšení obsahů došlo na v roce 2017 na všech stanovištích u přístupného a potenciálně přístupného hořčíku. V případě přístupného hořčíku se obsahy pohybovaly v intervalu 92,1-146 mg Mg/kg, u potenciálně přístupného hořčíku byly pak stanoveny obsahy na jednotlivých stanovištích 93,4-179 mg Mg/kg. V případě reziduálního hořčíku byl zvýšený obsah naměřen pouze na stanovišti Červený Újezd, a to 5245 mg Mg/kg. Na zbylých 3 stanovištích byl zjištěný obsah reziduálního hořčíku po aplikaci čistírenského kalu v roce 2017 nižší a pohyboval se v intervalu 4525-6391 mg Mg/kg. Hnojení čistírenským kalem tedy přineslo na všech stanovištích velmi pozitivní výsledky z hlediska obsahu okamžitě přístupného, přístupného a potenciálně přístupného hořčíku. V případě obsahu reziduálního hořčíku přinesla aplikace čistírenského

kalu pozitivní účinky pouze na stanovišti Červený Újezd. Ve srovnání s ostatními variantami hnojení byl v roce 2017 po aplikaci čistírenského kalu dosažen nejvyšší průměrný obsah přístupného hořčíku. Obsah hořčíku v čistírenských kalech se podle jednotlivých autorů liší. Černý et al. (2009) uvádí procentuální obsah Mg v čistírenských kalech přepočtený na sušinu kalu 0,8 %. Podle Duszy et al. (2009) by čistírenský kal používaný v zemědělství měl obsahovat alespoň 0,6 % hořčíku. Vliv na obsah hořčíku v kalu mají především složení odpadní vody a procesy probíhající na konkrétní čistírně odpadních vod. Singh & Agrawal (2008) uvádí pozitivní vliv na půdní vlastnosti po aplikaci čistírenského kalu jako např. zlepšení pórovitosti a objemové hmotnosti půdy. Dusza et al. (2009) ve své práci rovněž popisuje výborné hnojivé účinky čistírenského kalu, a to především kvůli vysokému podílu živin a organických látek. Na druhou stranu však těžké kovy jako kadmium (Cd), olovo (Pb), rtuť (Hg) či chrom (Cr) patří mezi prvky, které omezují použití čistírenského kalu pro zemědělské účely (Fytili & Zabaniotou 2008). Singh & Agrawal (2008) ve své práci poukazují na to, že nadměrná aplikace čistírenských kalů na zemědělskou půdu zvyšuje biologickou dostupnost těžkých kovů. Nízké dávky čistírenských kalů však významně zvýšení koncentrace těžkých kovů nezpůsobují.

Po aplikaci chlévského hnoje byly v roce 2017 na jednotlivých stanovištích zjištěny následující hodnoty: okamžitě přístupný hořčík 6,60-24,2 mg Mg/kg, přístupný hořčík 85,2-149 mg Mg/kg, potenciálně přístupný hořčík 94,3-181 mg Mg/kg a reziduální hořčík 4646-7048 mg Mg/kg. Na všech stanovištích byly v roce 2017 zjištěny zvýšené obsahy okamžitě přístupného, přístupného a potenciálního přístupného hořčíku, podobně jako po aplikaci čistírenského kalu. U reziduálního hořčíku došlo ke zvýšení obsahu pouze na třech stanovištích, tedy kromě stanoviště Lukavec. Ve srovnání s ostatními variantami hnojení byl v roce 2017 po aplikaci chlévského hnoje dosažen nejvyšší průměrný obsah okamžitě přístupného, potenciálně přístupného a reziduálního hořčíku. Je možné tedy konstatovat, že hnůj se stejně jako čistírenský kal osvědčil, neboť hnojení chlévským hnojem přineslo velmi dobré výsledky na vliv obsahu výše uvedených forem hořčíku. Kulhánek et al. (2014) ve své práci uvádějí zvýšení obsahu hořčíku po aplikaci chlévského hnoje ze 100 % na 128 %. Barzegar et al. (2002) zmiňuje hlavní výhody použití hnoje, a to, že aplikací chlévského hnoje dochází ke zvýšení stability půdních agregátů, zvýšení rychlosti infiltrace vody a snížení hustoty půdy.

Na stanovištích, kde proběhla aplikace minerálních hnojiv NPK byly v roce 2017 zjištěny následující obsahy hořčíku: okamžitě přístupný hořčík 3,50-18,5 mg Mg/kg, přístupný hořčík 64,5-109 mg Mg/kg, potenciálně přístupný hořčík 56,9-123 mg Mg/kg a reziduální hořčík mg 4062-6335 Mg/kg. U okamžitě přístupného hořčíku došlo po aplikaci NPK k navýšení obsahu pouze na stanovišti Hněvčeves, na zbylých třech stanovištích se obsah okamžitě přístupného hořčíku v roce 2017 oproti roku 1996 snížil. U přístupného hořčíku již byly výsledky o něco příznivější, neboť obsah se zvýšil na dvou ze čtyř stanovišť, a to na stanovištích Hněvčeves a Praha-Suchdol. V případě potenciálně přístupného hořčíku bylo zvýšení obsahu zaznamenáno pouze na stanovišti Červený Újezd. Ke zvýšení obsahu reziduálního hořčíku nedošlo po aplikaci NPK ani na jednom ze čtyř stanovišť. Při hnojení minerálním hnojivem NPK již nedošlo k tak pozitivním vlivům na obsah hořčíku jako v případě hnojení kalem a chlévským hnojem. Lze tedy konstatovat, že aplikace NPK neměla

na obsah hořčíku zásadní vliv. Podobný závěr potvrzuje ve své práci rovněž Kulhánek et al. (2014).

Na kontrolní nehnojené variantě dosahovaly hodnoty okamžitě přístupného hořčíku na jednotlivých stanovištích v roce 2017 následujících hodnot: 5,20-23,2 mg Mg/kg. Obsahy přístupného hořčíku se pohybovaly v intervalu hodnot 81,9-132 mg Mg/kg, potenciálně přístupného hořčíku pak v rozmezí hodnot 68,1-167 mg Mg/kg a obsahy reziduálního hořčíku byly zjištěny 4586-6189 mg Mg/kg. U okamžitě přístupného hořčíku došlo ke zvýšení obsahu pouze na stanovišti Hněvčeves, na zbylých třech stanovištích došlo naopak k jeho poklesu. V případě obsahů přístupného hořčíku bylo dosaženo podobných výsledků jako u okamžitě přístupného hořčíku. Obsah přístupného hořčíku se zvýšil pouze na stanovišti Praha-Suchdol a na ostatních třech stanovištích došlo ke snížení obsahu přístupného Mg. U obsahů potenciálně přístupného hořčíku došlo na nehnojené kontrolní variantě k překvapivým výsledkům, neboť na celkem třech stanovištích se obsah zvýšil. U reziduálního hořčíku se jeho obsah v roce 2017 na všech stanovištích snížil. Dalo se předpokládat, že se na nehnojené kontrolní variantě hodnoty obsahu hořčíku nebudou nijak výrazně měnit. To se však potvrdilo pouze v případě okamžitě přístupného, přístupného a reziduálního hořčíku. Kulhánek et al. (2014) na základě dlouhodobých experimentů zjistili na kontrolní nehnojené variantě mírně klesající tendenci obsahu hořčíku ve srovnání s hnojenými variantami.

6.1 Výnos pšenice ozimé

Při hodnocení vlivu dlouhodobé aplikace čistírenských kalů byly sledovány na všech čtyřech pokusných lokalitách pozitivní účinky kalu na výnos pšenice ozimé. Průměrná hodnota výnosu za období let 1997-2017 ze všech stanovišť byla po aplikaci kalu 5,67 t sušiny zrna/ha. Černý et al. (2010) ve své práci zkoumali rovněž vliv hnojení čistírenskými kaly na výnos pšenice ozimé, a na základě dlouhodobých experimentů uvádějí, že aplikace kalů zvýšila výnosy pšenice ozimé o 30 %. Singh & Agrawal (2008) na základě výsledků svých pokusů poukazují na to, že čistírenské kaly zvyšují produkci nejrůznějších rostlin, včetně obilovin. Tentýž závěr vyvozuje ve své práci také Özyazici (2013). Ten ve svém výzkumu porovnával různé dávky kalu a jako nejvhodnější dávku čistírenského kalu uvádí množství 20 t/ha.

Jako nejefektivnější se však ukázalo hnojení NPK, kdy průměrná hodnota výnosů ze všech stanovišť byla za období let 1997-2017 6,72 t zrna/ha. Černý et al. (2010) v dřívějším hodnocení těchto pokusů porovnával vliv hnojení čistírenským kalem, hnojem a minerálními hnojivy. Na základě výsledků potvrzuje, že minerální hnojivo se ukázalo jako nejlepší varianta pro dosažení nejvyšších výnosů pšenice ozimé.

Al'shevskii & Derebon (1982) ve svém experimentu porovnávali hnojení pšenice ozimé minerálním hnojivem NPK a hořčíkem ve formě síranu hořečnatého ($MgSO_4$). Na základě svého pokusu prokázali, že hnojení hořčíkem zvýšilo výnosy zrna, parametr hmotnost tisíce zrn a obsah surového proteinu a lepku v zrně. Chwil (2009) ve své práci také zkoumal vliv hořčíku na výnos zrna pšenice ozimé. Podobně jako předchozí autoři Al'shevskii a Derebon aplikoval hořčík ve formě síranu hořečnatého ($MgSO_4$) a na základě výsledků prokázal, že aplikací hořčíku bylo u pšenice ozimé dosaženo vyšších výnosů. Hlisnikovský et al. (2019)

dále uvádějí, že aplikace minerálních hnojiv vedla kromě vyšších výnosů také k vyššímu obsahu bílkovin v zrna pšenice ozimé.

Aplikací chlévského hnoje byla hodnota průměrného výnosu ze všech stanovišť u pšenice ozimé za období 1997-2017 rovna 5,40 t zrna/ha. Jednalo se o druhý nejnižší průměrný dosažený výnos, v porovnání s čistírenským kalem byl nižší o 0,27 t zrna/ha. Stejný závěr, tedy že při aplikaci čistírenských kalů byly ve srovnání s chlévským hnojem zjištěny v dlouhodobých pokusech vyšší průměrné výnosy pšenice ozimé, a to o 11 %, uvádí ve své práci Černý et al. (2010). Nicméně přesto lze chlévský hnůj považovat za účinný s ohledem na výnosy pšenice ozimé. Barzegar et al. (2002) ve své studii rovněž potvrzuje pozitivní vliv statkových hnojiv, do kterých se chlévský hnůj řadí, na výnos pšenice ozimé.

Jak se dalo předpokládat, nejnižšího výnosu bylo dosaženo na kontrolní nehnojené variantě, kde průměrný výnos ze všech pokusných stanovišť dosahoval za období let 1997-2017 3,82 t zrna/ha. Stejný závěr potvrzují ve své práci také Hlisnikovský et al. (2019), kteří v období let 2013-2017 srovnávali aplikaci minerálních hnojiv (obsahujících prvky draslík, hořčík a síru) s kontrolní nehnojenou variantou a jejich vliv na výnos zrna pšenice ozimé. Nejnižších výnosů bylo stejně jako u našeho pokusu dosaženo na kontrolní nehnojené variantě.

Z jednotlivých stanovišť bylo dosaženo nejnižších výnosů pšenice ozimé na stanovišti Lukavec. Tyto nízké výnosy souvisí s nejvyšší pravděpodobností s charakteristikou daného stanoviště. Půda na stanovišti Lukavec představuje půdní typ kambizem, půdní druh písčito-hlinitá a dosahuje hodnoty pH 5,25. Fecenko & Ložek (2000) však uvádějí jako nejvhodnější půdní typ pro pěstování pšenice ozimé černozemě a hnědozemě. Jako nejvhodnější půdní druh je podle Zimolky et al. (2005) půda hlinitá a jílovito-hlinitá s pH neutrálním až slabě kyselým (6,2-7,0). Stanoviště Lukavec nedosahuje doporučených parametrů pro pěstování pšenice ozimé, a z toho důvodu nebylo dosaženo tak vysokých výnosů jako u ostatních stanovišť.

Výkyvy ve výnosech byly pravděpodobně nejvíce ovlivněny průběhem počasí. Podle Zimolky et al. (2005) má počasí podstatnější vliv na tvorbu výnosu než půdní druh nebo půdní typ. Podle Vaňka et al. (2007) je rozhodujícím činitelem, který nejvíce ovlivňuje výnos a kvalitu zrna pšenice, výživa a hnojení dusíkem. Důležitost hnojení dusíkem ve své práci zdůrazňuje také Hřivna (2012). Zároveň však doplňuje, že ve výživě pšenice ozimé mají velký význam také prvky fosfor, draslík, síra, hořčík a vápník, které významně zasahují do metabolických procesů spojených s fotosyntézou a transportem vytvořených asimilátů. Pokud tedy chybí některý z výše uvedených prvků, ani optimální dávka dusíku neovlivní výnos pšenice ozimé.

Z uvedených výsledků vyplývá, že největší vliv na výnos pšenice ozimé měla na všech čtyřech stanovištích Praha-Suchdol, Lukavec, Červený Újezd a Hněvčeves aplikace minerálních hnojiv NPK. Proto na těchto variantách docházelo i k nejvyšším odběrům hořčíku.

7 Závěr

Hořčík je důležitým biogenním prvkem. Má podstatný význam ve výživě rostlin, neboť se uplatňuje při mnoha fyziologických dějích probíhajících v rostlinách. Je důležitou součástí chlorofylu a lze ho nalézt ve všech zelených rostlinách.

Hořčík lze do půdy dodávat za pomoci minerálních a organických hnojiv. Jednou z možností je také aplikace čistírenských kalů. Ty vznikají jako vedlejší produkty v čistírnách odpadních vod. Použití čistírenských kalů jako hnojiva představuje recyklaci nejen hořčíku, ale i dalších rostlinných živin. Aplikací kalů na zemědělskou půdu lze následně snížit potřebu minerálních hnojiv.

Cílem této diplomové práce bylo vyhodnocení účinnosti dlouhodobé aplikace čistírenských kalů na zemědělskou půdu z hlediska změn obsahu přístupného hořčíku v půdě. Kromě přístupného hořčíku byly dále sledovány změny okamžitého přístupného hořčíku, potenciálně přístupného hořčíku a reziduálního hořčíku. Celkově byla hodnocena čtyři pokusná stanoviště s různými půdně-klimatickými podmínkami, a to Praha-Suchdol, Červený Újezd, Hněvčeves a Lukavec. Mezi sebou byly porovnávány roky 1996 (založení pokusu) a 2017.

Z výsledků je zřejmé, že v roce 2017 byl naměřen nejvyšší průměrný obsah přístupného hořčíku v půdě po aplikaci čistírenských kalů ve srovnání s ostatními variantami hnojení. Nejvyšší průměrné obsahy u okamžitého přístupného, potenciálně přístupného a reziduálního hořčíku byly naměřeny na stanovištích, kde byl jako hnojivo aplikován chlévský hnůj. Bylo prokázáno, že aplikace čistírenského kalu vedla ke zvýšenému obsahu přístupného hořčíku ve srovnání s chlévským hnojem a minerálním hnojivem NPK.

Druhým cílem diplomové práce bylo vyhodnocení výnosů pšenice ozimé a odběru hořčíku po dlouhodobé aplikaci čistírenských kalů ve srovnání s hnojením chlévským hnojem a minerálními hnojivy NPK. Pro srovnání byla na každém stanovišti hodnocena kontrolní nehnojená varianta. Nejvyššího průměrného výnosu bylo dosaženo po aplikaci NPK, a to 6,72 t zrna/ha. Druh nejvyšší průměrný výnos - 5,67 t zrna/ha byl zjištěn na stanovištích, kde byl jako hnojivo použit čistírenský kal. Po aplikaci chlévského hnoje byly u pšenice ozimé dosaženy jen nepatrně nižší výnosy ve srovnání s kalem, a to 5,40 t zrna/ha. Zcela nejnižších průměrných výnosů dosahovala kontrolní nehnojená varianta. Z uvedených výsledků vyplývá, že nejlepší vliv na výnosy pšenice ozimé představuje hnojení minerálním NPK. Z toho vyplývají i nejvyšší odběry Mg u této varianty. Vzhledem k tomu, že k variantě NPK nebyl hořčík dodáván, dochází zde pravděpodobně k čerpání Mg z půdní zásoby a systém je tak dlouhodobě neudržitelný. Proto se jako nejvhodnější jeví kombinace organických a minerálních hnojiv.

8 Seznam použité literatury

Al'shevskii, N. G., & Derebon, I. U. 1982. Effect of magnesium fertilizers on the yields and quality of winter wheat grain. *Khimiia v sel'skom khoziaistve*.

Anonym, MŽP. 2015. Optimalizace nakládání s kaly z komunálních čistíren odpadních vod, ECO Trend [on-line] [cit.2020.01.05]. Dostupné z:
<[https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/\\$FILE/OODP-Oddil_III_Navrhova_cast-20160810.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/$FILE/OODP-Oddil_III_Navrhova_cast-20160810.pdf)>

Barzegar A.R., Yousefi A., Daryashenas A. 2002. The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physical properties and yield of wheat. *Plant and Soil*, 247(2): 295-301.

Baumgärtel, G. (Ed.). 2003. Nährstoffverluste: aus landwirtschaftlichen Betrieben mit einer Bewirtschaftung nach guter fachlicher Praxis. Redaktion Dr. HagenTrott, BAD, Frankfurt/Main. 36 s.

Cakmak, I., & Yazici, A. M. 2010. Magnesium: a forgotten element in crop production. *Better crops*, 94(2): 23-25.

Ciešlik, B. M., Namieśnik, J., & Konieczka, P. 2015. Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. *Journal of Cleaner Production*, 90: 1-15.

Cimados, J., Margesin, R., Schinner, F. 2006. Biological activity during composting of sewage sludge at low temperatures. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 57: 88-92.

Clarke, R.M., Cummins, E. 2015. Evaluation of "Classic" and Emerging Contaminants Resulting from the Application of Biosolids to Agricultural Lands. *Human and ecological risk assessment Volume 21, Issue 2*. P. 492-513. ISSN: 10807039.

Cowan, J.A. 2002. Structural and catalytic chemistry of magnesium-dependent enzymes. *BioMetals* 2002, 15: 225- 235.

Černý, J., Balík, J., Kulhánek, M., Časová, K., Nedvěd, V. 2010. Mineral and organic fertilization efficiency in long-term stationary experiments. *Plant Soil and Environment*, 56 (1): 28-36.

Černý, J., Balík J., Švehla P., Kulhánek M. 2009. Využití odpadů z ČOV jako zdroje organických látek a živin. In *Sborník z konference: Racionální použití hnojiv. ČZU v Praze*. Praha. 36-41

- Ding Y., Luo W., Xu G., 2006. Characterisation of magnesium nutrition and interaction of magnesium and potassium in rice. *Annals of Applied Biology*, 149 (2): 111–123.
- Dohányos, M., Koller J. a Strnadová N. 2007. Čištění odpadních vod. 2. vyd. Praha: VŠCHT, 2007. ISBN 9788070806197.
- Dohányos M., 2006. Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů, *Biom.cz* [online], 2006-05-09 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu>>. ISSN: 1801-2655.
- Dohányos M., 2004. Strategie nakládání s čistírenskými kaly. *Odpadové fórum*. roč. 5. č. 5. s. 8 – 11. ISSN 1212-7779.
- Dusza, E., Zablocki, Z., & Mieszczykowska-Wójcikowska, B. 2009. Content of magnesium and other fertilizer compounds in stabilized and dewatered sewage sludge from the municipal sewage treatment plant in Recz. *Journal of Elementology*, 14(1): 63-70.
- Excel. Microsoft Office Excel 2007. Microsoft office Enterprise 2007. USA. release SP2
- Fecenko, J. & Ložek, O. 2000. Výživa a hnojení poľných plodín. Slovenská poľnohospodárska univerzita Nitra. 452 s.
- Fytili, D., Zabaniotou, A., 2008. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - A review. 12. 116–140.
- 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 Soil* 368, 5–21.
- Härdter R, Rex M, Olovius K. 2005. Effects of different Mg fertiliser sources on the magnesium availability in soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70, 249–259.
- Hawkesford M., Horst W., Kichey T., Lambers H., Schjoerring J., Møller I. S., White P. 2012. Functions of Makronutrients. In: Marschner, P. (ed.): *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition)*. AcademicPress, 135-189.
- Hlisnikovský, L., Čermák, P., Kunzová, E., & Barlóg, P. 2019. The effect of application of potassium, magnesium and sulphur on wheat and barley grain yield and protein content. *Agronomy Research*, 17(5): 1905-1917.
- Hřivna, L. 2012: Výživa a hnojení porostů pšenice ozimé a kvalita produkce. Šlechtitelské listy podzim 2012 [online] [cit. 2019-06-20]. Dostupné z: <http://farmseed2.druvod.cz/files/aktuality/vyziva_a_hnojeni_porostu_psenice_ozime_a_kvalita_produkce.pdf>
- Hubálek, T. 2007. Kompostování kalů z ČOV a využití kompostů pro bioremediace. *Odpady-online.cz* [on-line] [cit. 2019.11.24]. Dostupné z: <<http://odpady-online.cz/kompostovani-kalu-z-cov-a-vyuziti-kompostu-pro-bioremediace/>>

- Chwil, S. 2009. The effect of magnesium and nitrogen on the quality parameters of winter wheat yield. *Annales UMCS, Agricultura*, 64(2).
- Julen, U., Itziar, A., Iker, M., Lur, E., Carlos, G. 2019. Application of sewage sludge to agricultural soil increases the abundance of antibiotic resistance genes without altering the composition of prokaryotic communities. *Science of the total environment* Volume 647, P. 1410-1420. ISSN 0048-9697.
- Klír J., Haberle J., Růžek P., Šimon T., Svoboda P. 2018. Certifikovaná metodika pro praxi. Postupy hospodaření pro efektivní využití dusíku a snížení jeho ztrát. VÚRV v.v.i., Praha – Ruzyně. 43 s.
- Klír J., Kunzová E., Čermák P. 2007: Rámcová metodika výživy rostlin a hnojení. Metodika pro praxi. VÚRV v.v.i., Praha-Ruzyně, 40 s. ISBN 978-80-87011-14-0
- Kuchtík, F., et al. Pěstování rostlin: speciální část. Třebíč: Vydavatelství Petr Večeřa, 2005. Pšenice obecná, 80 s. ISBN 80-901789-7-9
- Kulhánek, M., Balík, J., Černý, J., Vašák, F., & Shejbalová, Š. 2014. Influence of long-term fertilizer application on changes of the content of Mehlich-3 estimated soil macronutrients. *Plant, Soil and Environment*, 60(4): 151-157.
- Luscombe, P.C., Syers J.K., Gregg, P. E. H., 1979. Water extraction as a soil testing procedure for phosphate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 10 (11): 1361-1369.
- Maguire, M. E., & Cowan, J. A. 2002. Magnesium chemistry and biochemistry. *Biometals*, 15(3): 203-210.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. London: Academic Press. ISBN0-12-473543-6.
- Matula, J. 2007. Optimalizace výživného stavu půd pomocí diagnostiky KVK-UF. Metodika pro praxi. VÚRV, v.v.i. 47 s.
- McBride, M. B. 2003. Toxic metals in sewage sludge-amended soils: has promotion of beneficial use discounted the risks?. *Advances in environmental research*, 8(1): 5-19.
- Mikkelsen, R. 2010. Soil and fertilizer magnesium. *Better crops*, 94(2): 26-28.
- Nerudová, M. 1984. Komplexní systém hnojení kaly z čistíren odpadních vod veřejných kanalizací. ÚVTIZ. Praha. 50 s.
- Neuberg, J. 1998. Hnojení a výživa rostlin na zahradě. Grada Publishing, spol s. r. o. Praha. 152 s. ISBN: 80-7169-496-7.

Oster, J., & Jayawardane, N. S. 1998. Agricultural management of sodic soils M.E. Sumner, R. Naidu (Eds.), Sodic Soil: Distribution, Management and Environmental Consequences, Oxford University Press, New York (1998). 126-147

Özyazici, M.A. 2013. Effects of sewage sludge on the yield of plants in the rotation system of wheat – white head cabbage – tomato. Eurasian Journal of Soil Science. 2.1: 35-44.

Raclavská, H. 2007. Technologie zpracování a využití kalů z ČOV. Ostrava. 171 s. ISBN: 9788024816005

Richter, R. 2007. Multimediální učební texty z výživy rostlin, MENDELU Brno, [on-line] [cit.2019.12.30], Dostupné z: <http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/agrochemie_pudy/puda_mg.htm>

Richter, R. 2004. Multimediální učební texty z výživy rostlin, MENDELU Brno, [on-line] [cit.2019.12.30], Dostupné z: <http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/biogenni_prvky/mg.htm>

Ryant, P. 2004. Multimediální učební texty z výživy a hnojení polních plodin. Brno: MZLU. [on-line] [cit.2019.06.20], Dostupné z: <http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/hnojeni_plodin/images/obilniny/psenice_ozima/obr_8.bmp>

Senbayram, M., Gransee, A., Wahle, V., & Thiel, H. 2015. Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant–soil continuum. Crop and Pasture Science, 66(12): 1219-1229.

Singh, R., Agrawal, M. 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. Waste Management. 28 (2): 347-358. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.12.010. ISSN: 0956053x.

Smatanová, M., & Trávník, K. 2019. Výsledky agrochemického zkoušení zemědělských půd za období 2013–2018. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský.

Vach, M., & Javůrek, M. 2009. Ekologická optimalizace hlavních pěstitelských opatření pro polní plodiny. Výzkumný ústav rostlinné výroby.

Vaněk, V., Balík, J., Černý, J., Pavlík, M., Pavlíková, D., Tlustoš, P., Valtera, J., 2012: Výživa zahradních plodin. Academia Praha, ISBN 978-80-200-2147-2.

Vaněk V., Balík J., Pavlíková D., Tlustoš P. 2007. Výživa polních a zahradních plodin. ProfiPress. Praha 176 s. ISBN: 976-80-86726-25-0.

Warman, P. R., & Termeer, W. C. 2005. Evaluation of sewage sludge, septic waste and sludge compost applications to corn and forage: yields and N, P and K content of crops and soils. Bioresource technology, 96(8): 955-961.

Yan, B., & Hou, Y. 2018. Effect of Soil Magnesium on Plants: a Review. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 170, No. 2, p. 022168). IOP Publishing.

Zimolka, Josef a kol. Pšenice: pěstování, hodnocení a užití zrna. 1. vyd. Praha: ProfiPress, 2005. 179 s. ISBN 80-86726-09-6.

Zufiaurre, R., Olivar, A., Chamorro, P., & Callizo, A. 1998. Speciation of metals in sewage sludge for agricultural uses. *Analyst*, 123(2): 255-259.

Seznam použitých zákonů a vyhlášek

Ministerstvo životního prostředí. 2008. Vyhláška č. 341 ze dne 26. srpna 2008, o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady. Sbíрка zákonů České republiky, 2008, částka 110. Česká republika.

Ministerstvo životního prostředí. 2016. Vyhláška č. 437 ze dne 19. prosince 2016, o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. Sbíрка zákonů České republiky, 2016, částka 178. Česká republika.

Směrnice rady ze dne 21. května 1991 o čištění městských odpadních vod (91/271/EHS). Úř. věst. L 135, 30.5.1991, s. 40

Směrnice Rady ze dne 12. června 1986 o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství (86/278/EHS). Úř. věst. L 181, 4.7.1986, s. 6

Zákon č. 61/2017 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd. 2017. In: Sbíрка zákonů. Moraviapress, a.s. ročník 2017. částka 54. číslo 156.

Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů. 2001. In: Sbíрка zákonů. Moraviapress, a.s. ročník 2001. částka 71.