

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Změny obsahu různých forem zinku a železa v půdě
ovlivněné dlouhodobým hnojením**

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Simona Zejbrlíková

Obor studia: Rozvoj venkovského prostoru

Vedoucí práce: Ing. Martin Kulhánek, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Změny obsahu různých forem zinku a železa v půdě ovlivněné dlouhodobým hnojením" 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 15.4.2021

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Martinovi Kulhánkovi, Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce, za jeho čas, cenné rady a možnost častých konzultací. Velmi děkuji také za poskytnutí archivních dat, která mi napomohla při psaní této práce. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině a příteli, kteří mě při psaní práce neustále podporovali.

Změny obsahu různých forem zinku a železa v půdě ovlivněné dlouhodobým hnojením

Souhrn

Diplomová práce byla zaměřena na dva významné mikroelementy, které jsou ve výživě rostlin nepostradatelné, avšak ve vyšších koncentracích mohou představovat riziko kontaminace půd i potravního řetězce.

Teoretická část této práce stručně uvedla do problematiky mikroelementů obecně, podrobněji byly popsány jednotlivé vlastnosti zinku a železa, jejich formy v půdě i příjem rostlinami. Značná pozornost byla zaměřena na samotné hnojení těmito mikroelementy, zmíněny byly různé druhy organických i minerálních hnojiv včetně samostatné kapitoly o čistírenských kalech. Na závěr teoretické části byl charakterizován ječmen jarní v souvislosti s výživou a hnojením zinkem a železem.

Cílem experimentální části této diplomové práce bylo vyhodnotit různé frakce zinku a železa v půdě v závislosti na odlišných systémech minerálního a organického hnojení ječmene jarního. Zároveň došlo k vyhodnocení vlivu různorodých variant hnojení (nehnojená kontrola, minerální NPK, chlévský hnůj, čistírenské kaly) na změny obsahu zinku a železa v půdě.

Pro účely diplomové práce byla zvolena tři pokusná stanoviště s rozdílnými půdně-klimatickými podmínkami – Hněvčeves, Lukavec a Praha-Suchdol. V rámci tohoto experimentu byly v tříhonném osevním sledu pěstovány brambory, ozimá pšenice a jarní ječmen. Nejprve došlo ke zhodnocení vstupních vzorků před založením pokusů v roce 1996 s následnou analýzou vzorků po sklizni ječmene jarního v roce 2017. Analýza vzorků byla provedena vodným výluhem, extrakcí metodami CAD a Mehlich 3 a lučavkou královskou.

Jako nejúčinnější varianta hnojení a zdroj příjmu železa i zinku se v rámci experimentu jevila právě aplikace čistírenského kalu. Nevhodná či nadměrná aplikace kalů však může zejména v souvislosti se zinkem, jakožto rizikovým prvkem, naopak škodit, a to jak v oblasti životního prostředí, tak také v oblasti potravních řetězců. V rámci výzkumu této diplomové práce se dle výsledků vyskytovala rizikovost aplikace kalů zejména na stanovišti Lukavec, kde se hodnoty reziduálního obsahu zinku pohybovaly nad limitem již rizikových hodnot a mohou tu tak zapříčinit zmíněné negativní důsledky. V navazujícím výzkumu je proto důležité brát na vědomí i možné negativní účinky kalů a vyhnout se tak ohrožení životního prostředí.

Klíčová slova: Fe v půdě, Zn v půdě, minerální NPK, hnůj, čistírenské kaly

Changes of different soil zinc and iron fractions contents influenced by long term fertilizing

Summary

This diploma thesis was focused on two important microelements that are indispensable in plant nutrition, but at higher concentrations can pose a risk of contaminating the soil and the food chain.

The theoretical part of this work briefly introduced the issue of microelements in general, the individual properties of zinc and iron; their forms in soil and plant uptake were described in more detail. Considerable attention was focused on the actual fertilization with these microelements, various types of organic and mineral fertilizers were mentioned, including an individual chapter on sewage sludge. At the end of the theoretical part, spring barley was characterized in connection with nutrition and fertilization with zinc and iron.

The aim of the experimental part of this thesis was to evaluate the various fractions of zinc and iron in the soil, depending on different systems of mineral and organic fertilization of spring barley. At the same time, the influence of various fertilization variations (unfertilized control, mineral NPK, barn manure, sewage sludge) on changes in zinc and iron content in the soil was evaluated.

For the purposes of the diploma thesis, three experimental sites with different soil-climatic conditions were selected - Hněvčeves, Lukavec and Prague-Suchdol. In this experiment, potatoes, winter wheat and spring barley were grown in a three-field system. First, the input samples, before the establishment of the experiments in 1996, were evaluated, followed by an analysis of samples after the spring barley harvest in 2017. The analysis of the samples was performed by aqueous leaching, extraction by CAD and Mehlich 3 methods and aqua regia.

The application of sewage sludge appears to be the most effective variation of fertilization and source of iron and zinc intake in the experiment. However, inappropriate or excessive application of sludge can be detrimental, especially in connection with zinc, being a risk element, both in the fields of the environment and food chains. Within the research of this diploma thesis, according to the results, the risk of sludge application appears in particular at the Lukavec site, where the values of residual zinc content were above the limit of already risky values and may cause the above mentioned negative consequences. It is therefore

important, in subsequent research, to take into account the possible negative effects of sludge and thus avoid endangering the environment.

Keywords: Fe in soil, Zn in soil, mineral NPK, manure, sewage sludge

Obsah

1	Úvod	9
2	Cíle práce a vědecká hypotéza	10
2.1	Cíle práce	10
2.2	Vědecká hypotéza	10
3	Literární řešerše	11
3.1	Mikroelementy	11
3.1.1	Železo	11
3.1.2	Zinek.....	13
3.1.3	Formy železa a zinku v půdě (obecné vlastnosti)	14
3.2	Hnojiva obsahující zinek a železo	16
3.2.1	Organická a statková hnojiva	16
3.2.2	Minerální hnojiva	18
3.3	Železo a zinek v rostlinách	20
3.3.1	Příjem železa rostlinami.....	20
3.3.2	Příjem zinku rostlinami	20
3.4	Hnojení železem a zinkem	21
3.4.1	Cheláty	21
3.4.2	Mimokořenová výživa	22
3.5	Čistírenské kaly	24
3.5.1	Základní charakteristika	24
3.5.2	Působení čistírenských kalů	24
3.6	Ječmen jarní	25
3.6.1	Základní charakteristika	25
3.6.2	Pěstování ječmene jarního	26
3.6.3	Nedostatek železa a zinku v ječmeni jarním.....	27
3.6.4	Výživa a hnojení ječmene jarního	27
4	Metodika	29
4.1	Analytická stanovení	30
4.1.1	Extrakce půdy demineralizovanou vodou	30
4.1.2	Obsah železa a zinku v půdě stanovený metodou CAD.....	30
4.1.3	Obsahy železa a zinku stanovené metodou Mehlich 3.....	30
4.1.4	Stanovení obsahu reziduálních forem Fe a Zn lučavkou královskou.....	31
4.1.5	Měření obsahu železa a zinku ve výluzích	31
4.2	Statistické vyhodnocení	31
5	Výsledky	32

5.1	Hněvčeves	32
5.1.1	Obsah železa a zinku v půdě stanovený vodným výluhem	32
5.1.2	Obsah železa a zinku v půdě stanovený metodou CAD.....	33
5.1.3	Obsah železa a zinku v půdě stanovený metodou Mehlich 3	34
5.1.4	Obsah železa a zinku v půdě stanovený výluhem lučavky královské	35
5.2	Lukavec	36
5.2.1	Obsah železa a zinku v půdě stanovený vodným výluhem	36
5.2.2	Obsah železa a zinku v půdě stanovený metodou CAD.....	37
5.2.3	Obsah železa a zinku v půdě stanovený metodou Mehlich 3	38
5.2.4	Obsah železa a zinku v půdě stanovený výluhem lučavky královské	39
5.3	Suchdol.....	40
5.3.1	Obsah železa a zinku v půdě stanovený vodným výluhem	40
5.3.2	Obsah železa a zinku v půdě stanovený metodou CAD.....	41
5.3.3	Obsah železa a zinku v půdě stanovený metodou Mehlich 3	42
5.3.4	Obsah železa a zinku v půdě stanovený výluhem lučavky královské	43
6	Diskuze	44
6.1	Železo.....	45
6.2	Zinek	46
7	Závěr.....	48
8	Seznam literatury a použitých zdrojů	49

1 Úvod

Mikroelementy, k nimž se řadí právě železo a zinek, se v posledních desetiletích staly nepostradatelnými komponenty ve výživě rostlin. V důsledku vysoké produktivity různých rostlinných odrůd dochází zároveň ke značnému čerpání mikroelementů z půdy, které vede až k nedostatečnému množství těchto prvků v potravním řetězci. Z těchto důvodů je důležité věnovat právě mikroelementům v závislosti na hnojení rostlin značnou pozornost.

Úloha zinku ve výživě rostlin spočívá především v podílení se na aktivačních reakcích mnohých enzymů, účasti na syntéze bílkovin a významném vlivu na tvorbě stimulatorů růstu. Jelikož se zinek řadí mezi těžké kovy, které jsou obecně považovány za velice účinné, rostliny tento prvek potřebují jen v malém množství. Dle Barczak et al. (2019) se množství zinku v sušině rostlin pohybuje pouze do 100 mg/kg. Z důvodu, že může snadno dojít ke kontaminaci půd, je v zemědělství žádoucí používat hnojiva obsahující zinek pouze na půdách, které jsou na tento prvek chudé. Nedostatek zinku se na rostlinách projevuje zejména jejich zakrslým vzrůstem, asymetričností listů či například bíloželým zbarvením starších listů, a to ve formě chloróz, nekrotizací či fialového zbarvení.

Železo je oproti zinku přijímáno rostlinami ve větším množství. Mezi základní funkce železa ve výživě rostlin se řadí jeho účast na tvorbě enzymů, podílejících se na dýchacích procesech rostlin, dále aktivní účast při stavbě chlorofylu a regulaci oxidačních a redukčních procesů složitých organických sloučenin. Železo se v neposlední řadě účastní samotné fotosyntézy a přeměny dusíkatých látek v rostlině. Vyznačuje se také ochranou rostlin před různými poruchami ve vývoji chloroplastů a chlorofylu. Nedostatek železa se projevuje zejména chlorózou, která se vyznačuje světle zelenými až zářivě žlutými listy na konci výhonků.

Zinek a železo lze do půdy doplnit kromě organických a minerálních hnojiv také čistírenskými kaly, které se řadí mezi jedny z odpadních látek produkovaných v čistírnách odpadních vod. Dlouhodobé hnojení, zejména organickými a statkovými hnojivy, obecně napomáhá k lepším fyzikálním vlastnostem půd. Půdy lépe přijímají a zadržují živiny a vodu, jsou odolnější a lépe využívají živiny dodávané hnojivy minerálními.

Aplikace kalů má příznivý vliv na chemické, fyzikální a biologické vlastnosti půd. Organická hmota obsažená v kalech přispívá k celkovému zlepšení vlastností půdy, jako je objemová hmotnost, pórovitost a vodní režim. Zároveň tato organická hmota příznivě působí na mikrobiální aktivitu půdy. Z důvodu vysoké produkce kalů z čistíren odpadních vod je jejich následné využití právě v zemědělství nejen dalším přínosným způsobem hnojení rostlin, ale zároveň se jedná o vhodnou recyklaci tohoto odpadu s jeho následným dalším využitím.

Kaly však mohou při nesprávném použití představovat zároveň také riziko kontaminace půd rizikovými prvky. Proto je při jejich aplikaci důležité věnovat pozornost analytickým datům v registru půdy, který slouží jako podklad v rozhodovacích procesech u posuzování vhodnosti aplikace kalů ČOV na zemědělskou půdu. Z toho vyplývá, že ne vždy bývá dodávání vyššího obsahu daných prvků do půdy prostřednictvím čistírenských kalů pro konkrétní zemědělskou půdu vhodné a žádoucí. Aplikace kalů může často půdě způsobit více škody než užítku.

2 Cíle práce a vědecká hypotéza

2.1 Cíle práce

Cílem této diplomové práce bylo vyhodnotit různé frakce železa a zinku v půdě v závislosti na různých systémech organického i minerálního hnojení jarního ječmene.

2.2 Vědecká hypotéza

Dlouhodobá aplikace chlévského hnoje povede pravděpodobně ke stabilizaci obsahů železa a zinku v půdě.

Aplikací minerálního NPK dojde k odčerpání Fe a Zn z půdní zásoby. Vzhledem k vyšším výnosům na této variantě se zde dá očekávat nižší zásoba půdního Fe a Zn, než na nehnojené kontrole.

Čistírenské kaly mohou ve vysokých dávkách způsobit kontaminaci půdy zinkem.

3 Literární rešerše

3.1 Mikroelementy

Jak Vaněk et al. (2018) uvádějí, rozdělení rostlinných živin vychází především z jejich obsahu v rostlinách. Rozlišujeme dvě základní skupiny, a to makroelementy a mikroelementy. Mikroelementy jsou v rostlinách zpravidla v obsahu nižším než 0,05 % a jsou uváděné v mg/kg (ppm). Mezi mikroelementy se řadí právě zinek a železo, oba tyto prvky mají ve výživě rostlin velmi důležitou roli. Trčková & Raimanová (2007) uvádějí, že spolu s dalšími zástupci (např. bor, chlor, měď, mangan) se nazývají také jako prvky stopové, respektive prvky mikrobiogenní či mikroprvky.

Černý et al. (2010) udávají, že mikroprvky jsou nezastupitelné a velmi důležité ve výživě rostlin a dle Trčková & Raimanová (2007) přímo nepostradatelné pro jejich zdravý růst a vývoj. Jak Ronen (2007) uvádí, zvyšování intenzity pěstování rostlin, rostoucí spolu s poptávkou po vyšších výnosech a zároveň lepší kvalitě pěstovaných plodin, má za následek zvýšení poptávky právě po mikroelementech. Dle Safyan et al. (2012) se celková produktivita rostlin v průběhu let vlivem genetického vývoje a výběru vysoce výnosných kultivarů zvýšila. Bylo zjištěno, že tyto odrůdy jsou příčinou odběru většího množství mikroelementů z půdy, což vede k jejich nedostatečnému množství na mnoha půdách. Z tohoto důvodu je nutné mikroprvkům věnovat značnou pozornost.

Přístupnost mikroprvků pro rostliny je výrazně spojena s půdními vlastnostmi, a to především půdním pH, obsahem organické hmoty a půdním složením co se týká obsahu primárních minerálů. Rostliny mikroelementy přijímají v nepatrném množství z vnějšího prostředí. Na rozdíl od živin hlavních (makroelementů) nejsou výchozím materiálem pro stavbu těla rostlin, avšak jejich úloha je nezastupitelná právě v metabolismu (Trčková & Raimanová 2007). Mikroprvky se podílí na metabolických procesech, které kontrolují a regulují více než 2000 enzymů (Briat et al. 2015).

Vaněk et al. (2018) obecně charakterizují mikroelementy jako:

- prvky, potřebné rostlinami v malém množství (rostliny je obsahují od několika desetin do 100 mg/kg);
- prvky, mající největší uplatnění v biokatalýze (součást prostetických skupin či aktivací nebo inhibicí enzymů);
- prvky, mající většinou optimální působení v malém rozsahu koncentrací (vhodné je vytvářet a udržovat v půdě přiměřené obsahy přijatelných forem mikroelementů ve vyhovujících poměrech k ostatním živinám);
- prvky, jejichž příjem je výrazně ovlivňován druhem pěstované plodiny a působením vnějších podmínek (zejména půdními a povětrnostními).

3.1.1 Železo

Železo (Fe), latinským názvem *Ferrum*, je chemický prvek, který se v oblasti výživy rostlin řadí mezi mikroprvky neboli mikroelementy. Jedná se o prvek, který Baier & Baierová (1985) řadí do skupiny minerální živiny-ostatní, spolu se sírou a chlorem. Tato živina je

roślinami osvojována z půdy ve větším množství, a jelikož bývá často vedlejší součástí hnojiv, není třeba ji doplňovat zvlášť.

Železo je kov, který se vyskytuje ve dvou stabilních oxidačních formách, a to Fe^{2+} a Fe^{3+} , kde trojmocný kationt bývá zpravidla lépe rozpustný ve vodě za aerobních podmínek, naopak dvojmocný kationt se objevuje zejména v podmínkách anaerobních (Kulhánek et al. 2018). Uvnitř buněk rostlin se obsah Fe^{2+} udržuje na nízké koncentraci, která se v listech obvykle pohybuje mezi 50–100 $\mu\text{g/g}$ sušiny (Mori 1977). Kulhánek et al. (2018) uvádějí, že ačkoliv je celkový obsah Fe v půdách vysoký a pohybuje se v průměrných hodnotách od 20 do 40 g/kg, většina rostlin odebere pouze 1-2 kg Fe/ha ročně. Pokud nastane přebytek železa, dojde k jeho ukládání ve formě makroproteinu ferritinu v plastidech. Jelikož je součástí hemových enzymů, účastní se tak Fe oxidačně-redukčních procesů. Jeho další významná úloha je dle Lucena & Hernandez-Apaolaza (2017) účast na syntéze chlorofylu.

Mezi základní funkce železa v životě rostlin je dle Baier & Baierová (1985) účast na tvorbě enzymů, které se podílí na dýchacích procesech rostlin. Železo se vyznačuje aktivní funkcí při stavbě chlorofylu a reguluje oxidační a redukční procesy složitých organických sloučenin. V neposlední řadě se zúčastňuje fotosyntézy a také přeměny dusíkatých látek v rostlině. Co se týká jeho účinků na růst a vývoj rostlin, vyznačuje se především ochranou rostlin před poruchami ve vývoji chloroplastů a chlorofylu.

3.1.1.1 Projevy nedostatku a nadbytku železa v rostlinách

Výskyt nedostatečného příjmu železa se objevuje na karbonátových půdách či na půdách s vysokým obsahem přístupného fosforu. Možné omezení příjmu železa se zároveň může vyskytovat také na půdách, které jsou chudé na jílovité částice či půdách silně provzdušněných. V suchých obdobích při alkalické půdní reakci je přijímání železa omezeno konkurujícím vápníkem. Příjem železa bývá také často omezován u intenzivního příjmu nitratového dusíku, naopak amoniakální dusík příjem železa podporuje (Baier et al. 1988).

Nedostatek tohoto prvku v rostlinách může být jednak způsoben vysokým pH a vysokými koncentracemi vápníku v prostředí, tak také nadbytkem nitrátů a dalšími faktory. Železo je málo pohyblivým prvkem, tudíž je rostlina závislá na nepřerušovaném příjmu a při deficienci dochází k urychlenému výskytu chlorózy na nejmladších listech, přičemž listy nejstarší zůstanou zelené. Baier & Baierová (1985) popisují projev nedostatku železa jako chlorózu, která se projevuje světle zelenými až zářivě žlutými listy na konci výhonků.

Železo se účastní řady základních metabolických reakcí – fotosyntézy, redukce nitritů a asimilace N_2 či syntézy chlorofylu nebo nukleových kyselin. Jeho nedostatečný příjem se tak zrcadlí především do narušené tvorby chlorofylu se všemi důsledky pro produkci rostlinné sušiny. Pro diagnostické účely je důležitá hladina rozpustného železa v kyselině, které se nazývá jako aktivní Fe. Trčková & Raimanová (2007) dále udávají, že se nedostatek železa projevuje zejména světle zelenou barvou mezi cévami rostlin, popřípadě naprostým žloutnutím nejmladších listů.

Naopak nadbytek železa má za následek narušení růstu a vývoje celých rostlin, zapříčiňuje hnědnutí kořenů či v těžkých případech dokonce způsobuje zasychání a odumírání celých rostlin (Baier et al. 1988).

3.1.2 Zinek

Zinek (Zn), latinským názvem *Zincum*, se řadí mezi kovové prvky, které jsou rostlinami aktivně přijímány z vnějšího prostředí, buď z půdy, nebo pomocí mezibuněčných prostorů do buněk ve formách dvojmocných kationtů (Trčková & Raimanová 2007). Baier & Baierová (1985) zinek řadí do těžkých kovů, spolu s manganem, mědí či molybdenem. Těžké kovy jsou obecně velice účinné, proto je rostliny potřebují pouze v malých množstvích. V zemědělství je proto nutné hnojení těmito prvky praktikovat pouze na půdách, které jsou na příslušné mikroelementy chudé.

Obsah zinku v rostlinách je velmi nízký a obecně se pohybuje do 100 mg/kg v sušině rostlin (Barczak et al. 2019). Pohyb zinku v rostlině je malý, ve starých listech je dokonce úplně imobilní.

V organismu rostlin má zinek velký význam. Mezi jeho základní funkce v rostlinách patří jeho přítomnost a aktivační vliv v mnohých enzymech. Zinek se dále účastní syntézy bílkovin a vyznačuje se významným vlivem na tvorbu stimulatorů růstu. Důležitou roli zinek hraje při regulaci metabolismu nukleových kyselin, kde zinek inhibuje aktivitu ribonukleázy v pletivech rostlin (Richter 2004).

Zinek je přímo napojen na metabolismus bílkovin a aminokyselin. Plní roli nezbytného aktivátoru při tvorbě tryptofanu, tím pádem zároveň nepřímo ovlivňuje také tvorbu indolových auxinů.

3.1.2.1 Projevy nadbytku a nedostatku zinku v rostlinách

Ačkoliv je zinek esenciálním prvkem významným pro růst a vývoj rostlin, ve vysokých koncentracích může působit až fytotoxicky. Zinek v rostlinách zastupuje roli přímého komponentu metaloenzymů anebo se podílí na fyziologických pochodech jako funkční, regulační či strukturální faktor množství enzymů. Zinek je vlivem těchto funkcí zapojen do metabolismu bílkovin (Száková & Tlustoš 2018). Nedostatek zinku u rostlin se projevuje obvykle jejich zakrslým růstem či asymetrickým tvarem listů. Dalšími znaky může být bíloželené zbarvení starších listů ve formách mezižilkových chloróz, nekroz či fialového zbarvení. Listy odpadávají ze spodu rostliny směrem k jejímu vrcholu (Alloway 2008).

Rostliny, které jsou citlivé na nedostatek zinku, jsou například len, chmel, kukuřice, vinná réva, luskoviny a obiloviny. Právě obilniny, do kterých se řadí zkoumaný ječmen jarní, jsou zároveň citlivé i na nadbytek tohoto prvku v půdě (Broadley et al. 2007).

Mezi výrazné symptomy toxicity se řadí chlorózy a nekrózy vrcholků listů rostlin, jejichž projev závisí na druhu, genotypu a růstové fázi rostlin. Obecně je možné obsah zinku v pletivu rostlin klasifikovat do pěti intervalů. Pokud obsah zinku v pletivech klesne pod 10 mg/kg, rostliny vykazují vizuální symptomy nedostatku Zn, v rozmezí od 10-25 mg/kg sušiny je obsah zinku stále nedostatečný, obsah v rozsahu 26-150 mg/kg se označuje za normální, při 151-400 mg/kg sušiny je obsah nadnormální a u více než 400 mg/kg sušiny lze hovořit o toxickém obsahu (Száková & Tlustoš 2018). V následující Tabulce 1 lze vidět relativní citlivost různých plodin na nedostatek zinku. Z Tabulky 1 je patrné, že se ječmen jarní řadí mezi plodiny středně citlivé na deficit zinku.

Tabulka 1: Relativní citlivost plodin na nedostatek zinku (Alloway 2008)

Vysoce citlivé	Středně citlivé	Málo citlivé
Fazole	Ječmen	Pšenice
Hrozny	Brambory	Mrkev
Chmel	Hlávkový salát	Vojtěška
Kukuřice	Rajče	Jetel

3.1.3 Formy železa a zinku v půdě (obecné vlastnosti)

Vazba zinku a železa na organickou hmotu snižuje koncentraci volných kationtů v roztoku, avšak v oblasti rhizosféry se organické komplexy snadno rozpouští, což přispívá ke zvyšování celkového množství iontů a také zvýšení biodostupnosti. Chelatace železa a zinku organickými látkami tak udržuje dané živiny v přístupnějších formách kořenům uvnitř rhizosféry a pomáhá zpomalovat tvoření nerozpustných pevných forem, jako jsou například půdní oxidy a uhličitany. Organická hmota se vyznačuje dalšími přímými a nepřímými vlivy na mobilitu mikroprvků v půdě a jejich příjem plodinami. Jedná se například o zlepšení struktury půdy, zvýšení vododržnosti, zlepšení aerace či zlepšení podmínek pro kořenový růst. Zmíněné faktory zvyšují mobilitu téměř všech mikroprvků a umožňují tak lepší podmínky jejich přísunu ke kořenům (Černý et al. 2018).

Minerální živiny mohou být přijímány rostlinami obecně třemi způsoby, a to z půdy prostřednictvím kořenů v podobě anorganických iontů, listy v podobě iontů či plynů anebo pomocí spolupráce s mikroorganismy (Marschnert et al. 1997). Jako hlavní zdroj příjmu minerálních forem železa a zinku je považován příjem prostřednictvím kořenů rostlin z půdy v podobě anorganických iontů. K povrchu kořene jsou ionty živin transportovány třemi mechanismy – difusí, hromadným tokem pomocí pohybu vody a intercepcí neboli prorůstáním kořene do oblasti substrátu. Dostupnost každé živiny je ovlivňována mírou její sorpce v půdním komplexu. Velkou podstatu v příjmu živin hrají tzv. kořenové vlásky, které zvětšují povrch kořene, pronikají do malých pórů půdy a zajišťují tak kontakt s půdními částicemi (Buchanan et al. 2000). Jak Baligar & Duncan (1990) uvádějí, obsah minerálních prvků v rostlině bývá často odrazem jejich obsahu v půdě, na které roste.

3.1.3.1 Formy železa v půdě

Železo je v půdách většinou v dostatečném množství zejména ve formě hydratovaných oxidů, jako je například limonit, či sulfidů. Ionty v půdním roztoku bývají převážně trojmocné, avšak kořeny lépe absorbují ionty dvojmocné. Železo obsahují křemičitany jako je augit, amfibol a biotit. Během alkalické reakce půd, např. při silném vápnění, může dojít k výraznému snížení koncentrace železitých iontů (Šetlík et al. 2004). V největším množství se železo nachází v pevně vázané nevýměnné formě jako součást krystalové mřížky primárních (např. augit, biotit, olivín) i sekundárních minerálů (např. montmorilonit, illit, vermikulit). Bývá také obsaženo v různých oxidech, jako je například goethit, hematit či magnetit. V půdě dochází ke

zvětrávání a oxidaci těchto Fe minerálů působením vzdušného kyslíku a železitých bakterií za vzniku trojmocného železa (Richter 2007).

Množství železa se v půdách pohybuje v průměru od 20-40 g/kg. Tento celkový obsah Kulhánek et al. (2018) označují za vysoký, protože většina rostlin odebere pouze 1-2 kg Fe/ha ročně. Tato skutečnost však neznamená, že jsou zásoby železa v půdě pro rostliny dostatečné a není tak třeba je dodávat hnojením. O půdách, které nemají problémy s nedostatkem železa, lze hovořit tehdy, když jejich pH nepřesahuje hodnotu 7,0. V dobře provzdušněných alkalických půdách je však koncentrace kationtů Fe^{2+} a Fe^{3+} , které jsou rostlinám v půdním roztoku přístupné, velmi nízká. V půdách, které mají hodnotu pH 7 až 9 se koncentrace $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ a $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ nachází v rozmezí okolo 10^{-10} mol/l.

Kulhánek et al. (2018) uvádějí, že se železo vyskytuje ve dvou stabilních oxidačních formách, a to Fe^{2+} a Fe^{3+} . Železo ve formě Fe^{3+} je ve vodě lépe rozpustné za aerobních podmínek, oproti tomu železo jako dvojmocný kationt, tedy Fe^{2+} , se vyskytuje zejména v podmínkách anaerobních.

V půdách, které jsou provzdušněné, je rozpustnost sloučenin železa ovlivněna přítomností oxidů železitých, hydroxidů a tvorbou chelátů s organickými sloučeninami. Velkou roli v rozpustnosti železa zastupují cheláty, z toho důvodu je vhodné na půdy, vyznačující se vysokým pH a nízkým obsahem organické hmoty, aplikovat chlévský hnůj pro zvýšení přístupnosti Fe (Klír et al. 2008).

Další možností pro zlepšení chelatace železa jsou mikrobiální siderofory. U nedostatku dostupného železa je mohou tvořit téměř všechny druhy mikroorganismů. Výrazně vyšší přítomnost těchto látek je vždy v rhizosféře rostlin, velkou roli u příjmu železa rostlinami zastávají především siderofory hub (Kulhánek et al. 2018).

3.1.3.2 Formy zinku v půdě

Kulhánek et al. (2018) charakterizují zinek jako velmi rozšířený mikroprvek, který se vyskytuje téměř ve všech zemědělských půdách, a to sice v malém, ale pro rostliny dostačujícím množství. Obsah zinku v ornici se obvykle pohybuje okolo 10–300 mg/kg, takové množství odpovídá zhruba 20-600 kg/ha. Za dobrou hladinu přístupného zinku Kulhánek et al. (2018) považují 2,2 – 5 mg $\text{Zn}_{\text{Mehlich3}}$ /kg. Z praktického hlediska se však kvůli obtížnému uvolňování zinku z jeho hydroxidových forem v ornici nachází, co se přístupné formy zinku týče, obvykle pouze 1 kg/ha.

Jak Kulhánek et al. (2018) uvádějí, se stoupající hodnotou pH zároveň klesá rozpustnost sloučenin zinku, z toho důvodu je při hodnotě pH nad 8,4 zinek rostlinám téměř nedostupný. Celková koncentrace zinku v půdním roztoku je ve vztahu k půdní matici silně ovlivněna absorpčními a desorpčními procesy. Z toho vyplývá, že při daném pH záleží také na množství rozpustných půdních sloučenin a také na množství organické hmoty i mikrobiální aktivitě.

Zinek se vyskytuje spolu se železem v železatohořečnatých minerálech, jako je magnetit, biotit a amfibol. Kulhánek et al. (2018) udávají, že se zinek může dále vyskytovat i jako součást mřížky oktaedru jílových materiálů, či například může být vázán i v uhličitanech a dalších minerálech, vyskytujících se v půdě.

Vlivem zvětrávání je dále uvolňován a vázán na půdní částice. Jeho dostupnost pro rostliny je závislá na pH půdy, při alkalickém pH se stává nedostupným. Z tohoto důvodu při silném hnojení fosforečnany (vápenatými) může docházet k projevu nedostatku zinku (Šetlík et al. 2004). Kulhánek et al. (2018) zároveň popisují, že při vysoké koncentraci zinku může naopak dojít ke snížení příjmu fosforu. Černý et al. (2018) proto doporučují, aby byl poměr přijatelných obsahů $P_{\text{Mehlich3}}:Zn_{\text{Mehlich3}}$ v hodnotě cca 9,3 – 14,3:1.

Barak & Helmke (1993) uvádějí, že problémy s nedostatkem zinku v půdě mohou nastat obecně v tom případě, kdy je tento mikroprvek nedostatečně obsažen v matečné hornině, či v případě, že se jedná o půdy, které se vyznačují nepříznivou půdní reakcí. Nízký obsah celkového zinku v půdě je typický především pro písčité půdy. Naopak vysoký obsah zinku v půdě se vyznačuje nepříznivým vlivem na příjem Fe, Cu a Mn a může tak zapříčinit deficit daných mikroprvků v rostlině (Kulhánek et al. 2018).

Obsah zinku v půdě je závislý především na obsahu zinku v mateční hornině a charakteru půdotvorného procesu, z toho důvodu se jeho celkový obsah značně liší. Zinek je v nevýměnné formě vázán v mřížce různých minerálů, jako je například biotit, amfibol či augit. Zinek je více obsažen v bazických horninách než v kyselých, neboť právě v kyselém prostředí jsou jeho sloučeniny rozpustnější. Část nevýměnného zinku tvoří také nerozpustné sloučeniny, jako je např. $Zn_3(PO_4)_2$ či Zn_2SiO_4 . Přijatelnost zinku rostlinami je však velmi nízká. Pomocí zvětrávání se uvolňuje iont Zn^{2+} , a to především v prostředí kyselém. Malé množství zinku se v půdě nachází ve formě vodorozpustných solí, kde je nejvíce rozpustný chlorid zinečnatý, dusičnan zinečnatý nebo síran zinečnatý (Fageria et al. 2010). V posledních letech se hlavním antropogenním zdrojem zinku v půdě staly podniky barevné metalurgie, které zapříčinily zvýšení kontaminace zinkem především v horní vrstvě půd, což se stalo vážným problémem v oblasti ochrany životního prostředí (Richter 2007).

3.2 Hnojiva obsahující zinek a železo

3.2.1 Organická a statková hnojiva

Mezi organická a statková hnojiva se řadí široké spektrum materiálů živočišného či rostlinného původu. Statkovými hnojivy jsou dodávány do půdy živiny, organické látky, mikroorganismy i látky stimulační a růstové. Jedná se zpravidla o kvalitní organickou hmotu, díky které je nejen udržována, ale i zvyšována úrodnost půdy. Vlivem dlouhodobého hnojení statkovými a organickými hnojivy mají půdy lepší fyzikální vlastnosti, lépe přijímají a zadržují živiny a vodu, jsou odolnější ke změnám pH a napomáhají lépe přijímat a využívat množství živin, dodávaných prostřednictvím hnojiv minerálních (Gao et al. 2020). Černý et al. (2010) považují statková hnojiva za nenahraditelnou část v systémech výživy a hnojení rostlin. Černý et al. (2018) uvádějí, že aplikace různých organických materiálů, jako jsou například posklizňové zbytky, hnůj, zelené hnojení, komposty či odpadní materiály, jsou obecně doporučovanou strategií ke zvýšení půdní úrodnosti a zlepšení účinnosti živin z půdy či z dodaných hnojiv.

Statková hnojiva vznikají v koloběhu zemědělského podniku jako vedlejší produkt při chovu různých druhů hospodářských zvířat či pěstování kulturních rostlin (Tripolskaja et al. 2016). Dle zákona č. 156/1998 Sb, o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd, se hnojiva rozlišují dle vlastností na statková hnojiva živočišného původu a statková hnojiva rostlinného původu.

Mezi statková hnojiva živočišného původu se řadí například chlévský hnůj, močůvka, kejda, hnojůvka či trus drůbeže. Tato hnojiva se často označují také jako hnojiva „stájová“, jejichž složení, kvalita a účinek závisí na druhu a kategorii hospodářských zvířat, způsobu jejich ustájení, zdravotním stavu a v neposlední řadě také na způsobu ošetřování, skladování a aplikaci hnojiv.

Do statkových hnojiv rostlinného původu se dle Chadwick et al. (2011) řadí například sklíditelné vedlejší produkty kulturních plodin (např. sláma, řepný chrást, nať brambor) nebo celé pěstované rostliny, které se využijí jako zelené hnojení či se ponechají na povrchu půdy (např. mulčování). Složení a obsah živin tohoto hnojiva z velké části závisí na živinném režimu půd dané oblasti.

Vhodné je zmínit také kompost, a to i přes to, že dle zákona č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd, do statkových hnojiv nepatří. Tzv. statkový kompost se řadí do způsobů využití organické hmoty v zemědělském podniku, jako jsou zbytky z posklizňových úprav, znehodnocené krmivo či přebytky kejdy a močůvky (Shuman et al. 2000).

Černý et al. (2018) uvádějí, že organická hnojiva jsou obecně doporučovanou strategií ke zvyšování půdní úrodnosti a zlepšování účinnosti přijímaných živin z půdy či ostatních hnojiv. Používání organických hnojiv ovlivňuje výživu plodin mikroelementy tím, že působí na chemické, fyzikální i biologické vlastnosti půd, tvoří lepší prostředí pro růst rostlin a je zdrojem potřebných mikroprvků. Organická hmota, která se prostřednictvím organických hnojiv do půdy dodává, přispívá například ke zvyšování výměnné kapacity. Vazba zinku a železa na organickou hmotu za tvorby organických komplexů snižuje koncentraci volných kationtů v roztoku a zároveň také v oblasti rhizosféry, kde se organické komplexy snadno rozpouští. Toto přispívá ke zvýšení celkového obsahu iontů a zároveň i zvýšení biodostupnosti v závislosti na pohyblivosti a kinetice disociace komplexů. Chelatace zinku a železa organickými látkami udržuje tyto živiny ve formě, která je přístupnější kořenům uvnitř rhizosféry a zpomaluje tak tvorbu pevných forem, které jsou v půdě nerozpustné (např. oxidy a uhličitany).

Dodaná organická hmota má mnoho dalších přímých a nepřímých vlivů na mobilitu mikroprvků v půdě i na příjem rostlin. Jedná se například o zlepšení struktury půdy, zlepšení aerae a zároveň zvýšení vododržnosti, zlepšení podmínek kořenového růstu a stimulace mikrobiální aktivity. Tyto děje obecně zvyšují mobilitu většiny mikroelementů a umožňují jim tak lepší přístup ke kořenům rostlin (Shaver et al. 2007).

Používání organických hnojiv ovlivňuje výživu rostlin mikroprvky díky působení na fyzikální, chemické a biologické vlastnosti půd. Vytváří tak vhodnější prostředí pro růst, je zdrojem žádaných mikroprvků.

3.2.1.1 Chlévský hnůj

Chlévský hnůj je tuhé statkové hnojivo, které vzniklo fermentací chlévské mrvy, skládající se ze směsi tuhých a tekutých výkalů hospodářských zvířat (především skotu) a podestýlky, např. slámy, pazdeří, pilin (Khan & Khan 2020). Jedná se o organické hnojivo, které obsahuje jak základní živiny (N, P, K, Ca, Mg), tak také mikroelementy (Fe, Zn, Cu, Mn, Mo). Hnůj zpravidla neobsahuje klíčivá semena plevelů. Hnojivo je někdy pro snadnou manipulaci dodáváno v peletované formě, kde pelety při styku s vlhkostí bobtnají a dochází tak k postupnému uvolňování živin, zlepšování tepelných a vzdušných vlastností půd a půdní struktury, což vede k dobrému prokořnění rostlin. Chlévský hnůj navyšuje podíl humusu v půdě a přispívá tak k vyšší půdní úrodnosti (Holík et al. 2018).

Järvan et al. (2017) udávají, že aplikace chlévského hnoje je nejvhodnějším způsobem doplnění zinku a železa do půdy za podpory jejich uvolňování. Kulhánek et al. (2018) uvádějí, že podobně jako u železa zvyšuje aplikace chlévského hnoje rozpustnost zinku v alkalických půdách, a tím i jeho příjem rostlinami. Nedostatek železa v půdě lze nejčastěji vyřešit právě aplikací hnoje (Ai et al. 2020). O podstatné úloze statkových hnojiv se zmiňuje také Valenta (2018), který uvádí, že využívání statkových hnojiv je úspěšným způsobem, jakým lze navrátit živiny a organickou hmotu do půdy. Tabulka 2 zobrazuje obsah zinku a železa v různých typech statkových hnojiv.

Tabulka 2: Obsah zinku a železa ve statkových hnojivech (Valenta 2018)

Hnojivo	Množství t/ha	Fe kg/ha	Zn g/ha
Hnůj skotu	30	19	1900
Hnůj prasat	30	25	5900
Kejda skotu	30	3,10	1020
Kejda prasat	30	2,16	2050
Digestát	30	3,60	550

V současné době je možné používat chlévský hnůj také v granulované podobě, která lze aplikovat přímo na půdu. Liu et al. (2020) uvádějí, že k hnojení je možné použít jak hnůj velkých zvířat (skot, koně, prasata, ovce, kozy), tak také těch malých (slepice, králíci, husy). Hnůj většiny malých zvířat, především drůbeže, obsahuje větší množství živin než hnůj velkých zvířat, jelikož je často sušší a tím obsahuje i více organických látek.

3.2.2 Minerální hnojiva

Minerální neboli průmyslová hnojiva slouží k doplnění chybějících živin do půdy. Tato hnojiva živiny zpravidla doplňují tak, aby byly v půdě zastoupeny v určitém poměru pro podporu jednotlivých růstových fází v době vegetace konkrétních druhů pěstovaných rostlin. Minerální hnojiva však půdu nezvyšují, proto je důležité používat zároveň i hnojiva organická (Geisseler & Scow 2014). Do skupiny minerálních hnojiv spadají látky, které byly vyrobeny mimo zemědělský podnik, obvykle se jedná o produkty chemického, stavebního

a těžebního průmyslu. Minerální hnojiva umožňují nahradit živiny, které jsou z půdy exportovány a z velké části odchází z koloběhu živin v zemědělském podniku. Právě průmyslová hnojiva poklesu účinné hladiny živin v půdě zabraňují. Živiny se vyčerpávají z půdy jak sklizněmi, tak také například vyplavováním, smyvem či chemickou nebo biologickou sorpcí. Tyto ztráty je třeba pravidelně nahrazovat hnojením, neboť pouhé uvolňování živin z primárních minerálů nebo humusu k zajištění potřeby živin pěstovaných rostlin nestačí (Hamid & Bugaev 2020).

Jak Davydov et al. (2018) uvádějí, minerální hnojiva se obecně dělí na tuhá (prášková, granulovaná) a kapalná, dále pak na jednosložková a vícesložková. Jednosložková průmyslová hnojiva obsahují pouze jednu živinu (např. N, P, K, Mg), lze je tedy rozdělit na hnojiva dusíkatá, fosforečná, draselná či hořečnatá. Vícesložková hnojiva mohou být naopak složena jak z hlavních živin (makroprvků), tak také doplňkových živin (mikroprvků). Dle způsobu výroby lze tato hnojiva dále rozdělit na vícesložková hnojiva směsná a vícesložková hnojiva kombinovaná. Vícesložková hnojiva mohou být tzv. dvousložková (obsah dvou živin) či třísložková (obsah všech tří základních živin N, P, K). Často jsou vyčleňována také hnojiva speciální neboli tzv. mikrohnojiva, která obsahují převážně mikroelementy v chelátové formě.

Železo je dodáváno prostřednictvím minerálních hnojiv nejčastěji jako vícesložková směs se sírou. Jedná se o síran železnatý (FeSO_4), jehož heptahydrát $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ je znám také jako zelená skalice. Tato anorganická sloučenina umožňuje svým hnojením formou postřiku roztoku na list rychle odstranit příčiny nedostatku Fe v rostlinách. Zelená skalice tvoří jemné světle zelené krystalky, ztrácející při delším skladování na vzduchu vodu. Postupně u ní dochází k tvrdnutí a v důsledku povrchové oxidace dvojmocného Fe na trojmocné mění barvu do žlutého až hnědého odstínu (Manzeke et al. 2019).

Zinek je z minerálních hnojiv nejčastěji využíván ve sloučenině síranu zinečnatého. Heptahydrát $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ nalezneme pod triviálním názvem bílá skalice. Jedná se o hnojivo, které zabezpečí rychlý příjem zinku kořenovým systémem rostlin z důvodu jeho výborné rozpustnosti ve vodě. Může být takto aplikován v dávkách 2-20 kg/ha a tato forma je z okamžitého hlediska o něco efektivnější nejen než oxid zinečnatý, ale dokonce i Zn-cheláty (Kulhánek et al. 2018). Dalším známým minerálním hnojivem na bázi zinku je například hnojivo YaraVita Zintrac 700 od firmy YARA Agri Czech Republic, které obsahuje 40 % (700 g/l) zinku.

Kulhánek et al. (2018) upozorňují, že doplnění mikroprvků formou minerálních hnojiv je zejména doplňkový způsob, kterému je nutné věnovat velkou pozornost hlavně z hlediska správné dávky a formy, neboť i poměrně nízká koncentrace těchto hnojiv může být pro rostliny toxická.

3.3 Železo a zinek v rostlinách

3.3.1 Příjem železa rostlinami

Rostliny přijímají železo prostřednictvím kořenů, a to pouze ve formě Fe^{2+} iontů, popřípadě Fe-chelátů. Při příjmu železa dochází k antagonismu s jinými kationty, kdy například se zvyšujícím se příjmem železa dochází k poklesu příjmu mědi, manganu a vápníku, v opačném případě vysoký příjem těchto prvků může vyvolat poruchy v příjmu železa (Baier et al. 1988).

Železo se vyznačuje zvláštním postavením u příjmu rostlinami. Dvouděložné vyšší rostliny a většina rostlin jednoděložných získává železo prostřednictvím membránově vázané reduktázy, jež redukuje mimobuněčné cheláty dvojmocného železa. Uvolněný iont Fe^{2+} je poté absorbován a následně přenesen skrze cytoplazmatickou membránu specifickými přenašeči – proteiny. Oproti tomu rostliny jednoděložné z čeledi graminaceae (např. obilniny a kukuřice) do prostředí uvolňují specifické látky, takzvané fyto siderofory, které chelatizují anorganické sloučeniny trojmocného Fe. Vznikají tak Fe^{3+} komplexy, které jsou poté přijímány pomocí příslušného transportního systému v plazmalemě kořenových buněk (Trčková & Raimanová 2007).

Ohledně příjmu listy jsou hlavním místem pro vstup živin do listu hydrofilní póry, které bývají menší než jeden nanometr. Kutikulární póry jsou dostatečně propustné pro vodu a malé ionty (popř. molekuly). Příjem foliárně aplikovaných mikroelementů bývá vyšší u mladých rostlin a dochází ke snižování příjmu v průběhu stárnutí listů, jež je provázáno poklesem metabolické aktivity a zvětšením tloušťky kutikuly (Kobayashi et al. 2019).

Železo se vyznačuje velmi nízkou pohyblivostí ve floému, tudíž nedochází k příliš významnému přemísťování aplikovaného mikroelementu mimo list. Zde hrají značnou úlohu cheláty, které sice prvku více usnadňují transport floémem, ale jsou zároveň také vzhledem ke své velikosti obtížněji přijímány (Hansen et al. 2007).

3.3.2 Příjem zinku rostlinami

Zinek je rostlinami přijímán ve formě Zn^{2+} iontů či Zn-chelátů. Příjem zinku rostlinami je často omezován přítomnými ionty Fe^{2+} , popřípadě Mn^{2+} , které ho svými antagonistickými vlivy značně limitují (Baier et al. 1988).

Příjem zinku je významně ovlivňován půdní reakcí, kde negativně působí zejména půdy neutrální, alkalické či půdy bohaté na uhličitany. Nedostatečný příjem zinku kořeny rostlin je zesilovaný na výsušných půdách s nedostatkem vody, které jsou vystavovány nadměrnému slunečnímu záření. Naopak nadměrný, obvykle až toxicky působící, příjem zinku může vyvolávat intenzivní a trvající vyhnojování pozemků kompostovaným komunálním odpadem (Baier et al. 1988).

Rozpustnost sloučenin zinku je závislá na pH půdy, kde množství zinku se stoupající hodnotou pH klesá. Dostupnost zinku je dále pro rostliny redukována vysokou hladinou přístupných fosfátů. Zhoršený příjem zinku se často objevuje v obdobích, kdy je chladné počasí. Dostatečná koncentrace zinku se u většiny rostlin pohybuje mezi 20-100 $\mu\text{g/g}$ sušiny listů. Zinek je nezbytný jako součást více než 300 enzymů, které se zúčastňují metabolismu

cukrů, dusíku a aminokyseliny tryptofanu neboli prekursoru pro syntézu rostlinného hormonu auxinu (Trčková & Raimanová 2007).

3.4 Hnojení železem a zinkem

Dlouhodobě působící hnojiva se vyznačují takovou povrchovou úpravou, která zapříčiní postupné uvolňování živin. Některá zásobují rostliny živinami po dobu několika měsíců, další dokonce až dva roky (Manna et al. 2007).

Nejrelevantnější data ohledně působení různých hnojiv obsahujících Fe a Zn v reálných podmínkách je možno získat z dlouhodobých přesných polních pokusů. Ty představují velkou roli v zajištění lepší kontroly nad zásobou živin a jejich cyklem a kvantifikací změn, k nimž dochází v období několika desítek let. Výhodou je také jejich využití zejména pro hodnocení vzájemných vztahů na úrovni půda-živiny, jejich sorpci, koloběh v půdě a také ve vztahu živiny-rostlina, jejich odběr a též ztráty do atmosféry a vyplavování z půdy. Tyto pokusy umožňují lépe porozumět cyklům živin a následně ovlivňovat jejich efektivnost využití (Černý et al. 2010).

3.4.1 Cheláty

Cheláty tvoří důležitou úlohu v přijímání mikroprvků rostlinami. Význam těchto půdních chelátů spočívá především v jejich přednosti v oblastech rozpustnosti a stálosti v půdním roztoku a v půdě. Taková sloučenina v půdě nedisociuje, z toho důvodu ani nemůže tak rychle přecházet do nerozpustných sloučenin. Cheláty se dále vyznačují tím, že je zde kov vázán minimálně na dvou místech. Podstatou těchto hnojiv, která se aplikují na listy rostlin, je ligand a minerální iont, jenž je vyvázaný polární a koordinační vazbou (Škarpa & Richter 2013). Chelátová hnojiva v současné době upoutávají velkou pozornost jak ze stran výrobců hnojiv, tak také ze stran jejich spotřebitelů.

Cheláty jsou tvořeny buď ligandy přírodními (např. organickými kyselinami či aminokyselinami) nebo syntetickými kyselinami (EDTA, ADDHA, DTPA aj.). Ve srovnání s přírodním ligandem mají na rozdíl od iontů (např. K^+ , Ca_2^+) velkou molekulu. Kannan (1969) je tak řadí mezi vysokomolekulární látky, které nemohou snadno projít skrze buněčnou membránu a být tedy rostlinami absorbovány.

Jak uvádí Pavlů (2018), cheláty, které vznikají v rhizosféře, usnadňují vstup daného prvku do rostliny, v některých případech však ochranný mechanismus rostlin vstupu prvku brání. Do takového systému vstupují půdní vlastnosti, jako jsou charakteristiky sorpčního komplexu a půdní reakce. Velikost sorpčního komplexu určí, zda dojde k sorpci rizikového prvku, nebo k transportování profilem. Půdní reakce bývá klíčovou pro mobilitu daných prvků, kde je například zinek při nižším pH půdy mobilnější.

3.4.1.1 Cheláty železa

Cheláty železa mohou mít velice významnou roli v jeho rozpustnosti. Například v půdách, které mají hodnotu pH 7,9, byl zaznamenán za přítomnosti organické hmoty až 35 000krát vyšší obsah rozpustného Fe ve srovnání s rovnovážnou konstantou pro materiály anorganické. Z toho důvodu lze doporučit pro zvýšení přístupnosti železa aplikaci hnoje do půd s vysokým pH a nízkým obsahem organické hmoty (Kulhánek et al. 2018).

Mezi velmi významné komponenty, přispívající k chelataci železa, se řadí mikrobiální siderofory. Siderofory jsou malé a vysoce afinitní železo-chelatující sloučeniny, jež bývají vylučovány mikroorganismy (bakterie, houby) a přispívají k transportu železa přes buněčné membrány (Boer et al. 2005). Kulhánek et al. (2018) dále uvádějí, že při nedostatku dostupného železa mohou siderofory tvořit téměř všechny druhy mikroorganismů. Přítomnost sideroforů je v rhizosféře rostlin oproti okolní půdě výrazně vyšší. Nejvýznamnějšími siderofory pro příjem železa rostlinami jsou dle Ghosh et al. (2017) především siderofory hub.

Hnojení Fe-cheláty Kulhánek et al. (2018) považují za jednu z nejúčinnějších a dlouhodobě ověřených strategií. Nejznámější syntetickou chelatační sloučeninou je kyselina ethylendiamintetraoctová (EDTA). Při nahrazení vodíkových iontů z této sloučeniny železem vzniká sloučenina Fe-EDTA. Tuto látku je vhodné aplikovat do půdy, jelikož aplikací na list by mohlo dojít k jeho poškození. Mezi další možné Fe-cheláty se řadí například Fe-DTPA, Fe-EDDHA, Fe-EDDHMA či Fe-EDDHSa (Lucena 2003).

3.4.1.2 Cheláty zinku

Cheláty zinku se vyznačují tím, že přispívají k lepší rozpustnosti tohoto prvku v půdním roztoku i při méně příznivé půdní reakci, jako je v tomto případě výskyt neutrálního a alkalického pH (Škarpa & Richter 2013).

Za příklady Zn-chelátových hnojiv lze uvést hnojiva Lister Zn 150 WP – 150 g Zn/kg či Lister Zn 80 SL – 75 g Zn/l, která obsahují vodorozpustný zinek v chelátové (EDTA) vazbě. Jedná se o jednosložková hnojiva, která slouží pro doplnění deficitu zinku v půdě. Pro ječmen jarní je zde doporučena aplikace 1 až 2x, v termínu od počátku odnožování až do poloviny sloupkování (Anonym 2009). Škarpa & Richter (2013) doporučují dávku zinku představující 200 g Zn/ha, odpovídající dávce hnojiva Lister Zn 80 SL 2,66 l/ha. Jako další lze uvést hnojivo Zinkuran, koncentrované dvousložkové zinečnaté hnojivo, které se skládá jak z chelátu zinku, tak také oxidu zinečnatého. Toto hnojivo je určeno především jako doplňková výživa plodin s vyššími nároky na zinek. Takto chelatizovaný zinek je mobilní i na alkalické půdě a jeho vstřebání je možné jak prostřednictvím kořenů, tak také listů rostlin (Anonym 2021).

3.4.2 Mimokořenová výživa

K mimokořenové výživě rostlin přistupujeme zejména v případě, že se u rostlin objeví faktory, které omezují přístupnost mikroprvků kořeny rostlin. Jedná se například o celkový stav rostlin, kde vzhledem k malé pohyblivosti většiny mikroprvků bývá často kritickým obdobím konec tvorby vegetativních a generativních orgánů, dále mezi omezující faktory patří nevhodné

půdní vlastnosti, a to zejména pH půdy, půdní druh, sorpční vlastnosti a obsah organické hmoty (Kulhánek et al. 2018).

Právě mimokořenovou výživu lze vhodně využít při omezení použitelnosti hnojení do půdy kvůli již zmíněným faktorům. Tento způsob aplikace hnojiv je v poslední době stále více využíván v zemědělské praxi. Jedná se o oprávněné agrotechnické opatření v případě, že je uplatňováno jako doplňkové opatření a způsob zajištění výživy živinami při jejich omezené půdní přístupnosti (Górny 2001).

Jak Kulhánek et al. (2018) uvádějí, mimokořenová výživa je schopna poskytnout rychlou korekci závažných nedostatků, jenž se často objevují u rostlin již v počátečních fázích jejich růstu či během vegetace, a je alespoň dočasným řešením těchto problémů. Aplikace listových hnojiv (foliární aplikace) sice může být často efektivnější než aplikace do půdy, cena aplikované živiny bývá ale zároveň také značně vyšší.

Využívání živin rostlinami z listových hnojiv je ovlivňováno mnoha faktory. Peng et al. (2020) uvádějí jako největší problémy nízkou míru průniku listovým povrchem, odtok postřikové jíchy z hydrofobních povrchů, rizikovost smytí hnojiva srážkami, omezení translokace v rostlině, rychlé vysušení aplikovaného hnojiva či poškození listů. Kulhánek et al. (2018) uvádějí, že většina mikroelementů, která není z foliární aplikace využita, není ani později účinně využita prostřednictvím kořenů hnojené plodiny. Vaněk et al. (2016) uvádějí, že při aplikování hnojiv přes listy musí živiny překonat mimo kutikuly i jiné ochranné vrstvy listu. Z tohoto hlediska jsou velmi důležité vlastnosti postřikové jíchy. Velkým vlivem se zde vyznačuje například pH, použití adjuvantů či forma látky s mikroelementy – soli, cheláty aj. Dle současných poznatků je nutné v mimokořenové výživě přednostně řešit zejména ty mikroprvky, u nichž se opravdu předpokládá deficit, neboť při výrazném překombinování mikro a makroprvků se pak nemusí dosáhnout žádoucího efektu, jelikož průnik je omezen množstvím transportních míst v pletivech (především v listech).

Mnohé prvky se vyskytují v podobě kationtů, které se navzájem chovají antagonisticky (Mg^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , aj.) Zároveň je důležité sledovat skutečný obsah daných mikroprvků v listovém hnojivu, jelikož se objevují hnojiva, která sice daný prvek uvádí na etiketě, ale ve skutečnosti ho obsahují v nízké koncentraci. Kromě aktuálního stavu porostu by se pěstitel měl zaměřit také na období, ve kterém je daný prvek rostlinami více vyžadován (Peng et al. 2020).

Pro mimokořenovou aplikaci zinku Kulhánek et al. (2018) doporučují 1% roztok síranu zinečnatého, pro dosažení vyšší účinnosti roztoku je nutné použít smáčedlo. Železo je zase možné dodat hnojivy pro mimokořenovou výživu ve formě síranu železitého či citranu železitého (Górny 2001).

3.5 Čistírenské kaly

3.5.1 Základní charakteristika

Dle webových stránek Ministerstva životního prostředí je kal definován jako nevyhnutelný odpad při čištění odpadních vod v čistírně odpadních vod (ČOV). Delibacak et al. (2020) považují čistírenské kaly za důležitý druh organických odpadů z různých kategorií pevných odpadních látek. Jak Zufiaurre et al. (1998) uvádějí, čistírenské kaly představují suspenzi pevných a agregovaných koloidních látek, původně přítomných v odpadní vodě a vzniklých během procesu čištění odpadní vody. Kaly představují zhruba 1-2 % objemu čištěných vod a obsahují 50-80 % zakoncentrovaných původních znečištění (Dohányos 2006). Webové stránky Ministerstva životního prostředí dále uvádí, že při zpracování odpadních vod dochází k odstranění nežádoucích složek z vody a koncentrování do objemově nevýznamného produktu – kalu. Kal může obsahovat nadbytečnou biomasu z biologického čištění. Hlavním cílem úpravy kalů je zabránění nepříznivých dopadů na lidské zdraví a životní prostředí. Koncentrace prospěšných, ale i znečišťujících složek v kalu, je závislá na počáteční kvalitě odpadních vod a také na úrovni požadovaných technologií, které zaručí dosažení kvalitativních požadavků na vyčištěnou odpadní vodu.

Dle Černý et al. (2014) organické látky obsažené v čistírenských kalech vykazují nižší stabilitu v porovnání s chlévským hnojem. Z tohoto důvodu jsou v půdě poměrně rychle mineralizovány. Při pravidelném hnojení čistírenskými kaly je příznivě hodnoceno jejich dlouhodobé působení. V porovnání s hnojením chlévským hnojem však kaly vykazují menší obsah humusových látek a nižší stupeň humifikace.

3.5.2 Působení čistírenských kalů

Dle vyhlášky č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, je pro aplikaci kalů na zemědělskou půdu nutné splnit následující podmínky:

- možné je aplikovat pouze upravené kaly, které prošly hygienizací a neobsahují žádné choroboplodné zárodky nebezpečné pro lidi a zvířata v nadlimitním množství;
- nepřesahovat obsahy rizikových prvků a rizikových látek, a to jak v upravených kalech, tak v půdě, na kterou má být kal aplikován;
- neaplikovat kaly na zemědělskou půdu na chráněných územích;
- neaplikovat kaly v pásmu ochrany vodních zdrojů či na zamokřených a zaplavovaných půdách;
- neaplikovat kaly na půdách s hodnotou pH nižší než 5,6;
- nevyužívat hnojení kaly v inzenzivních plodících ovocných výsadbách;
- nepoužívat na pozemcích, které jsou využívány k pěstování polní zeleniny v roce jejich pěstování ani v roce předcházejícím;
- nevyužívat kaly na plochách, které jsou využívány k rekreaci a sportu a na veřejně přístupných prostranstvích;
- použitím kalů nezhoršovat kvalitu půdy ani povrchových a podzemních vod.

Dle Černý et al. (2014) má aplikace kalu většinou příznivý vliv na chemické, fyzikální a biologické vlastnosti půdy. Po aplikaci čistírenských kalů je obvykle popisováno mírné zvýšení hodnoty pH. Změny pH půd jsou především v korelaci s obsahem uhličitánů v kalech zejména, pokud je během stabilizace a hygienizace kalů využito vápnění. U ostatních typů kalů je častěji zaznamenáván mírný pokles pH půdy. Jelikož si ale půda udržuje dobrou pufrací schopnost, pokles hodnoty pH je menší ve srovnání s hnojením minerálními hnojivy.

Jak Hradil (2015) uvádí, organická hmota, která je dodávána v kalech do půdy, přispívá k celkovému zlepšení vlastností půdy, jako je objemová hmotnost, pórovitost a vodní režim půdy. Hnojené půdy vykazují nejen lepší schopnost infiltrace vody, ale zároveň i schopnost vodu zadržovat. Mimo jiné, organická hmota příznivě působí také na mikrobiální aktivitu půdy, neboť v kalech jsou obsaženy odumřelé buňky mikroorganismů, jenž představují snadno rozložitelný substrát pro půdní mikroorganismy. Zároveň Wang et al. (2008) udávají, že při aplikování správně ošetřených čistírenských kalů není riziko uvolnění těžkých kovů do půdy příliš vysoké.

Hezký (2020) uvádí, že aplikace kalů na zemědělskou půdu poskytuje zemědělcům jak výhody, tak také určitá úskalí. Funkci sledování kvality, a především obsahu nežádoucích látek, zastává Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. Mezi hlavní přednosti používání kalů patří přísun zdroje živin pro pěstované rostliny, kde se navíc vlivem jejich aplikace zvyšuje obsah organických látek dodávaných do půdy. Mezi záporné vlastnosti naopak považuje vnos rizikových látek a také přítomnost nežádoucích prvků. Černý et al. (2014) ale uvádějí, že původní předpoklady, že bude obsah rizikových prvků snižovat mikrobiální aktivitu v půdě, nebyly ve většině případů potvrzeny. Čistírenské kaly lze v zemědělství využít jednak jako organické hnojivo přímou aplikací na půdu a jednak ve formě kompostu.

3.6 Ječmen jarní

3.6.1 Základní charakteristika

Ječmen, latinským názvem *Hordeum*, se řadí do čeledi lipnicovitých (*Poaceae*), do botanické třídy jednoděložných rostlin. Jedná se pravděpodobně o nejstarší kulturní rostlinu vůbec, jejíž archeologický nález ve formě divokého ječmene je datován až do dob 8 500 před naším letopočtem (Ullrich 2011), na našem území se pak ječmen pěstuje jako kulturní rostlina nejméně po dobu 5 000 let.

Po staletí ječmen sloužil k výrobě sladu a piva, krup, náhražek kávy či sladařských výtažků. Pěstování ječmene přispívá k zajištění krmivářské základny v živočišné výrobě jakožto již vytríděný ječmen nebo ve formě sladařských odpadů (Benada 2001).

Jak uvádí Hudec (2020), Česká republika patří v Evropě dlouhodobě k největším producentům sladovnického ječmene a během posledních let se daří českým pěstitelům dosahovat vysokých výnosů v požadované kvalitě za stabilního prostředí sektoru, což dává pěstování sladovnického ječmene dobré perspektivy do budoucích let. Tuto myšlenku sdílí také Černý et al. (2007), kteří považují sladovnický ječmen za budoucí hlavní obilovinu v ČR.

Dle Benada (2001) je ječmen dělen podle způsobu využití produkce, a to na ječmen k výrobě sladu a na ječmen ke krmným a potravinářským účelům. (Zimolka 2006) tyto užitkové směry doplňuje dále o využití v průmyslu a pícninářství. V České republice je jarní ječmen pěstován zejména pro účely sladovnické.

Ječmen tvoří svazčité kořeny, v porovnání s dvouděložnými rostlinami slabší a netloustnoucí. Z obilnin pěstovaných v ČR tvoří ječmen nejvyšší počet zárodečných (primárních) kořínků v počtu 4-10 (nejčastěji 5-6), což ale závisí na velikosti obilek (větší obilky tvoří vyšší počet), dále typu (víceřadé mají nižší počet než dvouřadé) a formě ječmene, kdy jarní tvoří více kořínků než ozimá. Hloubka zakořenění je závislá na půdních vlastnostech (půdním druhu) a utužení ornice a podorničí, kde ve vlhké a utužené půdě je při snížené prostupnosti kořenů dosahováno i nižšího výnosu zrna. Hmotnost sušiny kořenů jarního ječmene v hloubce ornice bývá 70-80 % (Zimolka 2006).

Vegetační doba ječmene jarního činí dle Zimolka (2006) 90-120 dnů, dle Benada (2001) 110-125 dnů. Během tohoto období ječmen dokáže vytvořit vysoký biologický a hospodářský výnos, a to z důvodu vysoké rychlosti fotosyntézy v období velké periody růstu neboli období sloupkování. Jedná se o fázi s největšími nároky na živiny, kdy se vzhledem k jeho mělkému a slabšímu kořenovému systému jedná o přístupné živiny právě v orničním profilu. Obvyklá doba posklizňového dozrávání je v závislosti na odrůdě 4-8 týdnů. Ke klíčení potřebuje jarní ječmen vláhu ve výši 50-60 % hmotnosti obilky, což je menší množství než např. u pšenice či žita. Optimální teplota pro klíčení je okolo 15 °C, avšak ke klíčení dochází již při 1-2 °C, což umožňuje velmi rané setí a pěstování ječmene i v chladnějších oblastech. Doba pro vzejití ječmene jarního bývá 7-10 dnů.

3.6.2 Pěstování ječmene jarního

Ječmen jarní nemá příliš náročné požadavky na prostředí, lze ho tedy úspěšně pěstovat ve velmi rozdílných podmínkách. Obecně bývá nejnáročnější ječmen sladovnický a množitelský (Zimolka 2006). Dle Benada (2001) je ječmen jarní druhou nejvýznamnější pěstovanou obilninou v České republice, ihned po pšenici ozimé.

Kvalitní ječmen jarní, který je určený na slad, je produkován především v oblastech úrodných regionů jako je řepařská oblast, ve které se objevují převážně půdy černozemního a hnědozemního typu, dále půdy se sprašovým charakterem, lokalizované v polohách do 250 m n. m. Vhodná předplodina v těchto oblastech je proto cukrovka, pro kterou jsou dané podmínky stejně vyhovující. Další vyhovující oblasti pro pěstování sladovnického jarního ječmene jsou kukuřičná výrobní oblast a oblast obilnářská. Benada (2001) řadí Polabskou nížinu, nižší polohy Středočeské pahorkatiny a střední Moravu mezi zdaleka nejvhodnější oblasti pro pěstování jarního ječmene.

Ječmen jarní se vyznačuje citlivostí na utužení půdy a kyselou půdní reakcí, na které reaguje snížením výnosu a zhoršením jakosti. Proto je nutné volit vhodné stanoviště, kdy je třeba se vyvarovat oblastem kyselých dešťů (Zimolka 2006) či lokalitám s častým výskytem rosy a mlhy a na pozemcích s vysokým stupněm zaplevelení (Benada 2001). Zimolka (2006) dále uvádí, že ječmen plodina velice náročná na dobrý fyzikální a strukturní stav půdy, dostatek vzduchu, přítomnost živin v půdě a na celkovém dodržení agrotechnického termínu

setí. Ječmen jarní vyžaduje opatření ke zlepšení pH, jako je například vápnění půd či listová výživa Ca. Půdní reakce by měla být v řepařské a kukuřičné oblasti v rozmezí pH 6,2-7,2, v obilnářské a bramborářské pak pH 5,8-6,2 pH (Zimolka 2006). Jak Benada (2001) uvádí, kyselé půdní prostředí vykazuje negativní vliv na růst i sladovnickou kvalitu ječmene, zároveň také potlačuje tvorbu kořenového systému, a tím snižuje účinnost živin. Půda by měla být zásobená makroprvky v těchto hodnotách: fosfor 80-100, draslík 201-261, hořčík 160-230 mg/kg půdy. Z tohoto důvodu bývají nejvhodnější předplodiny pro pěstování ječmene jarního právě okopaniny, které při správném hnojení i provedení agrotechnických opatření zanechávají půdu z hlediska struktury a obsahu makroprvků v lepším stavu.

Dle Benada (2001) se agrotechnická lhůta setí u jařin nijak kalendářně nestanovuje, je však důležité sít co nejdříve, zpravidla jakmile to počasí a stav půdy dovolí. Jelikož je ječmen velmi citlivý na zamazání, což znamená, že klíčící obilky trpí na nedostatek kyslíku, je nutné věnovat pozornost zejména vlhkosti a dostatečné vyžralosti půdy.

Doporučené výsevky ječmene jarního jsou pro kukuřičnou výrobní oblast 3,5-4,0 MKS (milion klíčivých semen), pro řepařskou výrobní oblast 3,5 MKS, pro obilnářskou 3,5-4,0 MKS, pro bramborářskou 4,0-4,5 MKS a pro píceňářskou 4,0-4,5 MKS (Benada 2001).

3.6.3 Nedostatek železa a zinku v ječmeni jarním

Nedostatek zinku se na ječmeni jarním projevuje především nepravidelnými světle zelenými až žlutozelenými podélnými skvrnami na obou stranách středního žebra a šedohnědými podlouhlými skvrnami u středně starých listů. Dále je při nedostatku zinku omezován růst ječmene, postižené rostliny jsou světlejší a listy mají fialový odstín. Často se také může vyskytovat chloróza ječmene, což se projevuje zejména chlorotickými středními listy mezi žilnatinou. Nedostatek zinku pro rostlinu zhoršují půdy s vysokým obsahem organické hmoty, chladné vlhké podmínky či půdy s vysokým pH a vysokým obsahem fosforu. Zinek je pro ječmen jarní důležitý z hlediska zvyšování klasové fertility (počet zrn v klase) i lepší kvality zrna (Barczak et al. 2019).

Nedostatek železa může ječmeni jarnímu způsobovat chlorózu mezi žilnatinou se žlutozelenými pruhy, vyskytující se na mladších listech. S postupným nedostatkem železa dochází ke žloutnutí celé listové čepele a rozšiřování chlorózy také na starší listy. Objevuje se omezená tvorba chlorofylu a chlorotické blednutí interkostálních polí. Nedostatek železa je zhoršován především vysokým pH v půdním prostředí, zamokřenými a vápenitými půdami či půdami s vysokým obsahem mědi, manganu nebo zinku. Železo je důležité z hlediska zdravého zeleného olistění a vyššího výnosu ječmene jarního (Noworolnik et al. 2018).

3.6.4 Výživa a hnojení ječmene jarního

Rostlinná produkce agroekosystémů je významně závislá na přirozeném koloběhu živin a zároveň také na vkladech živin z průmyslových hnojiv (Křen et al. 2015), které by měly být v souladu s půdně-klimatickými podmínkami stanovišť a s nároky pěstovaných plodin (Gáborík et al. 2010). Baier & Baierová (1988) zároveň poukazují na významný vliv jak hnojení, tak také na vliv předplodin, ročníku i stanovišť na úrodu pěstovaných plodin.

Ječmen jarní se řadí mezi plodiny, které mají střední potřebu živin (Zimolka 2006). Jelikož tato plodina dokáže za krátkou vegetační dobu vytvořit značné množství organické hmoty, potřebuje zároveň také dostatečné množství živin v přístupných formách a ve vyváženém poměru. Ječmen dobře využívá zejména pozůstatky použitých hnojiv k předplodině, ačkoliv jak Černý et al. (2007) uvádějí, toto platilo zejména při osevních postupech, do kterých byly řazeny rostliny hnojené hnojem.

Rovněž je důležitá výživa a hnojení dusíkem, který ovlivňuje výnos a kvalitu sladovnického ječmene (Benada 2001). Dávka dusíku se obvykle aplikuje před setím či aplikací do stadia 3. listu při přednosti setí před hnojením. Dusíkaté hnojení se provádí na jaře, výjimku tvoří kukuřičné oblasti, kdy je možné hnojit již na podzim.

Černý et al. (2007) rozdělují předplodiny ječmene do tří hlavních skupin:

1. okopaniny, hnojené organickými hnojivy (např. brambory, cukrovka, kukuřice);
2. plodiny, zanechávající dostatek pohotových živin (např. mák, řepka);
3. plodiny, vyčerpávající půdu s vysokým podílem posklizňových zbytků (např. ozimá pšenice, kukuřice na zrno).

Právě zástupci z poslední skupiny jsou nejčastějšími předplodinami pro jarní ječmen. Hnojení se zde přizpůsobuje zejména s ohledem na vyčerpanost půdy. U nedostatku srážek na podzim a v zimě dochází k posunu mineralizace posklizňových zbytků do pozdnějšího jara, proto by mělo hnojení vycházet především z jarních rozborů půdy (Černý 2011). Pokud je předplodinou ječmene jiná obilovina, je vhodné dodání organické hmoty jinými formami, jako je například zaorání slámy či zelené hnojení (Benada 2001).

Černý et al. (2007) uvádějí fosfor, draslík a mangan jako další základní prvky pro hnojení ječmene jarního. Ječmen jarní má zvýšenou potřebu fosforu především v jeho raných fázích růstu a zároveň na toto cílené hnojení příznivě reaguje. Usabaliev et al. (2020) dále uvádějí, že by se základní hnojení mělo pohybovat minimálně v dávce odběru jednotlivých živin, správně ale ve zvýšených dávkách (s ohledem na půdní vlastnosti). Prvky P, K, Ca a Mg lze k ječmeni hnojit podobně jako k předplodině, z důvodu jeho jarního charakteru je pro toto hnojení dostatečné množství času. Dávka P, K, Ca a Mg by měla zohlednit také následující plodinu.

Z mikroelementů je u ječmene jarního nejčastěji deficitní zinek. Mikroelementy obecně Košál (2013) doporučuje dodávat v univerzálních hnojivech, jako je například FERTIGREEN Kombi, hnojivo pro mimokořenovou výživu plodin, které kromě kompletní sestavy živin (N (7 %), P₂O₅ (7 %), K₂O (5 %), S (2 %)) obsahuje i mikroprvky, jako je železo a zinek. Toto hnojivo dále obsahuje aminokyseliny, které umožňují rychlý průnik živin do rostlinných tkání, dále stimulační látky či smáčedla. Dalším příkladem je vícesložkové kapalné hnojivo FERTIKAL, které obsahuje 7% dusík, 5% hořčík, 5% vápník a také řadu stopových prvků, jako je bor, mangan, měď, železo a zinek.

4 Metodika

Dlouhodobý experiment byl založen na pokusných stanicích ČZU a VÚRV v.v.i. Ruzyně v roce 1996. Pro účely této diplomové práce byla zvolena stanoviště s různými půdně-klimatickými podmínkami (Hněvčeves, Lukavec a Praha-Suchdol). Charakteristika stanovišť je patrná z Tabulky 3. Na parcelkách (60 m² na jednu plodinu) jsou pěstovány v tříhonném osevním sledu brambory, ozimá pšenice a jarní ječmen. Cílem práce bylo hodnocení obsahu železa a zinku v půdě po dokončení 7. osevního cyklu, a to po sklizni ječmene v roce 2017. Pro odhad vývoje obsahů Fe a Zn byly analyzovány i archivní vzorky půdy, odebrané v roce 1996.

Tabulka 3: Základní charakteristika pokusných stanovišť

Stanoviště	Hněvčeves	Lukavec	Praha-Suchdol
Lokalizace	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.)	265	610	286
Průměrná roční teplota (°C)	8,2	7,7	9,1
Průměrné roční srážky (mm)	573	666	495
Půdní typ	Hnědozem	Kambizem	Černozem
Půdní subtyp	<i>modální</i>	<i>oglejená</i>	<i>modální</i>
Půdní druh ¹⁾	prachovitá hlína	písčité hlína	prachovitá hlína
pH ²⁾	6,20 (±0,2)	5,25 (±0,17)	7,5 (±0,10)
P ³⁾	96 (±12)	183 (±15)	79 (±10)
K ³⁾	203 (±37)	245 (±28)	236 (± 23)
Ca ³⁾	2079 (±251)	1220 (±119)	7531 (±1710)
Mg ³⁾	125 (±23)	74 (±13)	167 (±20)
Fe ³⁾	209 (±10)	333 (±6)	92 (±12)
Zn ³⁾	9 (±1)	4 (±0,5)	6 (±1,3)

¹⁾ dle NRSC USDA

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

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

Organickými hnojivy je hnojeno pouze k první plodině v osevním sledu, proto je u brambor (kukuřice) sledováno přímé působení aplikace organických hnojiv, u ozimé pšenice a jarního ječmene působení následné. Dávky dusíku jako hlavní živiny jsou uvedeny v Tabulce 4. Pro potřeby pokusu jsou používány čistírenské kalů z Ústřední čistírny odpadních vod Praha Trója. Živiny z minerálních hnojiv (varianty NPK) jsou dodávány v LAV (27,5 % N), trojitým superfosfátu (21 % P; 30 kg P/ha/rok ke každé plodině u této varianty) a 60 % draselné soli (50 % K; 100 kg K/ha/rok).

Celý systém byl (s výjimkou nehnojené kontroly) založen na jednotné dávce dusíku tak, aby celková dávka N za 3 roky (brambory + pšenice ozimá + ječmen jarní) činila 330 kg N/ha.

To platí pro organická i minerální hnojiva, popřípadě jejich kombinaci. Proto jsou při stejné dávce dusíku hodnoceny rozdíly mezi variantami z hlediska různých forem Fe a Zn v půdě.

Tabulka 4: Systém hnojení polního pokusu ČZU (množství živin na 1 ha)

Varianta	Brambory	Ozimá pšenice	Jarní ječmen
Kontrola	0	0	0
Kal 1	330 kg N	0	0
Kal 3	990 kg N		
Hnůj	330 kg N	0	0
NPK¹⁾	120 kg N	140 kg N	70 kg N

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

Odběr vzorků ornice (0-30 cm) byl proveden v roce 2017 po sklizni ječmene. Byl tak zjištěn obsah různých forem železa a zinku v půdě po dokončení 7. osevního sledu. Vzorkování půd po sklizni ječmene bylo realizováno ve 4 opakováních. Ornice byla usušena a přeseta přes síto s velikostí otvorů 2 mm. Pro potřeby diplomové práce byly k analýzám využity rovněž archivní vzorky půdy z roku 1996 (před založením pokusu).

4.1 Analytická stanovení

4.1.1 Extrakce půdy demineralizovanou vodou

Extrakty pro stanovení okamžitě přístupného železa a zinku byly zhotoveny metodou adaptovanou dle Luscombe et al. (1979). Ke 3 g vzorku bylo doplněno 30 ml demineralizované vody. Vzorky byly třepány 1 hodinu a následně odstředěny 5 min. při 9000 g. Vzniklé extrakty byly analyzovány.

4.1.2 Obsah železa a zinku v půdě stanovený metodou CAD

Obsah železa a zinku v půdě byl rovněž stanoven dle normy EN 13651. Tato evropská norma je určena pro stanovení živin a prvků extrahovatelných chloridem vápenatým/DTPA (diethylentriaminpentaoctová kyselina), přičemž právě DTPA zajišťuje dobrý potenciál metody pro stanovení většiny mikroelementů (včetně Fe a Zn) a rizikových prvků, které jsou v půdě mobilní. Půda byla extrahována roztokem 0,01 mol/l CaCl₂ a 0,002 mol/l DTPA v poměru 1:10 (3 g půdy/30 ml roztoku CAD). Po 1 hodině třepání byly vzorky zfiltrány. Fe a Zn byly měřeny ve vzniklých extraktech.

4.1.3 Obsahy železa a zinku stanovené metodou Mehlich 3

Ke stanovení obsahu potenciálně přístupného železa a zinku 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), NH_4NO_3 ($c=0,25$ mol/l) a EDTA ($c=0,001$ mol/l). Tento roztok je využíván v ČR jako normovaná metoda pro stanovení P, K, Ca a Mg v rámci agrochemického zkoušení půd. Podle Zbiral (2016) vykazuje tato metoda dobrý potenciál i pro stanovení Fe a Zn. Poměr zeminy a vyluhovadla činil 1:10 (3 g zeminy, 30 ml vyluhovadla). Třepání probíhalo po dobu 10 min. Získaný roztok byl filtrován a následně měřen na obsah Fe a Zn.

4.1.4 Stanovení obsahu reziduálních forem Fe a Zn lučavkou královskou

Reziduální obsah Fe a Zn zahrnuje i formy těchto prvků, které jsou rostlinám prakticky nedostupné. Vzhledem k tomu, že jsou obsahy těchto forem železa a zinku stanovené lučavkou královskou v jednotlivých sezónách udávány jako málo variabilní, byla provedena pouze extrakce archivních vzorků z roku 1996 a vzorků půd po sklizni ječmene, tedy po dokončení 7. osevní rotace. Postup byl proveden dle normy ISO 11466:1995. K analýze byl navážen 1 g vzorku, který byl následně extrahován 10 ml roztoku lučavky královské (konc. HCl a konc. HNO_3 v poměru 3:1) za pomoci nízkotlakého mikrovlnného rozkladu po dobu 40 minut. Výsledné extrakty byly kvantitativně převedeny do 25ml zkumavek a následně měřeny na obsah železa a zinku.

4.1.5 Měření obsahu železa a zinku ve vyluzích

Všechna měření obsahu železa a zinku v získaných vyluzích byla realizována na optickém emisním spektrometru s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES, Varian Vista-Pro, Mulgrave, Austrálie).

4.2 Statistické vyhodnocení

Pro statistické vyhodnocení byly využity základní popisné charakteristiky v programu STATISTICA (ver.12.0). Vzorky půdy po sklizni ječmene byly odebírány ve 4 opakováních, a proto bylo možno realizovat popisné charakteristiky a následně i analýzu variance (ANOVA, Tukey test při $p<0,05$) rovněž v programu STATISTICA (ver.12.0).

5 Výsledky

5.1 Hněvčeves

5.1.1 Obsah železa a zinku v půdě stanovený vodným výluhem

Při hodnocení obsahu železa se vstupní hodnoty před založením pokusu (před realizací hnojení) pohybovaly v rozmezí 28,5 – 40,3 mg/kg (Tabulka 5). Hodnoty jsou poměrně variabilní, což je způsobeno extrakcí vodným výluhem, vykazujícím zpravidla vyšší rozdíly mezi naměřenými hodnotami. V roce 2017 došlo ke zvýšení hodnot u všech variant hnojení, včetně železem nehnojené kontroly a NPK. Varianty kal 1, hnůj a NPK se průkazně nelišily od variant kontrola a kal 3, zároveň však byla hodnota u variant kal 1 a hnůj průkazně vyšší ve srovnání s variantou NPK.

Při hodnocení obsahu zinku se vstupní hodnoty před založením pokusu pohybovaly mezi 0,140 – 0,169 mg/kg (Tabulka 5). Naměřené hodnoty u zinku v porovnání se železem nejsou v tomto roce příliš variabilní. Obdobně jako u železa, také i u zinku došlo v roce 2017 (ve srovnání s rokem 1996) ke zvýšení hodnot u všech variant hnojení, včetně zinkem nehnojené kontroly a NPK. Průkazně nejvyšší hodnota byla zaznamenána u varianty kal 3, následované variantou kal 1, oproti tomu u varianty kontrola byla hodnota průkazně nejnižší. Varianty hnůj a NPK vykazovaly podobné výsledky jako kontrola a kal 1, avšak hodnota u varianty kal 1 byla průkazně vyšší než u varianty kontrola.

Tabulka 5: Obsah okamžitě přístupného (vodný výluh) železa a zinku v půdě na stanovišti Hněvčeves (v mg/kg)

Varianta	Železo			Zinek		
	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996
Kontrola	40,3	67,2 ^{ab}	26,9	0,169	0,194 ^a	0,025
Kal 1	33,4	73,9 ^a	40,5	0,140	0,280 ^b	0,140
Kal 3	35,8	67,3 ^{ab}	31,5	0,160	0,378 ^c	0,218
Hnůj	36,8	71,5 ^a	34,7	0,154	0,238 ^{ab}	0,084
NPK	28,5	57,5 ^b	29,0	0,142	0,233 ^{ab}	0,091

5.1.2 Obsah železa a zinku v půdě stanovený metodou CAD

Při hodnocení obsahu železa se vstupní hodnoty před založením pokusu (před realizací hnojení) pohybovaly v rozmezí 119,1 – 132,9 mg/kg (Tabulka 6). Hodnoty vykazují poměrně nízkou variabilitu. V roce 2017 se hodnoty zvýšily u všech variant hnojení, včetně železem nehnojené kontroly a NPK. Průkazně nejvyšší hodnota byla zaznamenána u varianty kal 3, následované variantou kal 1. Varianty kontrola, hnůj a NPK dosahovaly průkazně nejnižších hodnot. Varianty kal 1 a kal 3 se statisticky odlišovaly jak vzájemně, tak také od zbylých variant.

Při hodnocení obsahu zinku se vstupní hodnoty před založením pokusu v roce 1996 pohybovaly mezi 9,19 – 10,8 mg/kg (Tabulka 6). Naměřené hodnoty u zinku nejsou v tomto roce rovněž výrazně variabilní. Oproti železu došlo u zinku v roce 2017 ke snížení hodnot u všech variant hnojení s výjimkou varianty kal 3. Průkazně nejvyšší hodnota v roce 2017 byla zaznamenána u varianty kal 3, naopak nejnižší hodnota se vyskytla u varianty kontrola. Mezi variantami kontrola, kal 1, hnůj a NPK nebyl zaznamenán průkazný rozdíl.

Tabulka 6: Obsah snadno přístupného (metoda CAD) železa a zinku v půdě na stanovišti Hněvčeves (v mg/kg)

Varianta	Železo			Zinek		
	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996
Kontrola	128	230 ^a	102	9,29	2,96 ^a	-6,33
Kal 1	125	295 ^b	170	9,19	8,07 ^a	-1,12
Kal 3	133	372 ^c	239	10,8	16,4 ^b	5,60
Hnůj	119	245 ^a	126	10,7	4,39 ^a	-6,31
NPK	123	197 ^a	74,3	10,1	5,76 ^a	-4,34

5.1.3 Obsah železa a zinku v půdě stanovený metodou Mehlich 3

Při hodnocení obsahu železa se vstupní hodnoty před založením pokusu (před realizací hnojení) pohybovaly v rozmezí 202 – 219 mg/kg (Tabulka 7). Hodnoty vykazují rovněž poměrně malou variabilitu. Průkazně nejvyšší hodnota byla zaznamenána u varianty kal 3, naopak u varianty NPK byla hodnota průkazně nejnižší. Varianta kal 1 se průkazně nelišila od varianty kal 3, stejně tak jako se varianta NPK průkazně neodlišovala od varianty hnůj. Rozdíl mezi hodnotami naměřenými v roce 2017 a 1996 dosahoval vždy kladných hodnot.

Při hodnocení obsahu zinku se vstupní hodnoty před založením pokusu v roce 1996 pohybovaly mezi 8,38 a 9,73 mg/kg (Tabulka 7). Naměřené hodnoty u zinku nebyly v tomto roce příliš variabilní. Průkazně nejvyšší hodnota v roce 2017 byla zaznamenána u varianty kal 3, naopak nejnižší hodnota se vyskytla u varianty kontrola. Mezi zbylými variantami vůči variantě kontrola nebyl zaznamenán průkazný rozdíl. Rozdíl mezi hodnotami naměřenými v roce 2017 a 1996 se pohyboval v záporných hodnotách s výjimkou kladné hodnoty u varianty kal 3.

Tabulka 7: Obsah potenciálně přístupného (metoda Mehlich 3) železa a zinku v půdě na stanovišti Hněvčeves (v mg/kg)

Varianta	Železo			Zinek		
	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996
Kontrola	202	366 ^{bc}	164	8,38	2,93 ^a	-5,45
Kal 1	217	380 ^{cd}	163	8,39	6,57 ^a	-1,82
Kal 3	207	396 ^d	189	9,29	12,6 ^b	3,31
Hnůj	212	361 ^{ab}	149	9,46	4,00 ^a	-5,46
NPK	219	330 ^a	111	9,73	5,80 ^a	-3,93

5.1.4 Obsah železa a zinku v půdě stanovený výluhem lučavky královské

Při hodnocení obsahu železa se vstupní hodnoty před založením pokusu (před realizací hnojení) pohybovaly v rozmezí 23 563 – 25 729 mg/kg (Tabulka 8). Hodnoty nevykazují příliš velkou variabilitu. V roce 2017 se hodnoty u všech variant hnojení snížily, včetně železem nehnojené kontroly a NPK. Nejvyšší hodnota byla zaznamenána u varianty kontrola, naopak u varianty NPK byla hodnota nejnižší. Mezi variantami kontrola a hnůj nebyl zaznamenán výrazný rozdíl.

Při hodnocení obsahu zinku se vstupní hodnoty před založením pokusu v roce 1996 pohybovaly mezi 56,6 a 62,2 mg/kg (Tabulka 8). Obdobně jako u železa, ani u zinku nejsou naměřené hodnoty v tomto roce příliš variabilní. Avšak oproti železu došlo u zinku v roce 2017 ke zvýšení hodnot u všech variant hnojení. Nejvyšší hodnota byla zaznamenána u varianty kal 3, naopak nejnižší se vyskytla u varianty kontrola. Mezi variantami kontrola, hnůj a NPK nebyl zaznamenán výrazný rozdíl.

Tabulka 8: Reziduální obsah (výluh lučavky královské) železa a zinku v půdě na stanovišti Hněvčeves (v mg/kg)

Varianta	Železo			Zinek		
	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996
Kontrola	25729	22967	-2762	58,8	64,3	5,50
Kal 1	25133	22242	-2891	60,0	80,9	20,8
Kal 3	25493	22596	-2898	57,4	103	45,7
Hnůj	25222	22786	-2436	56,6	66,3	9,70
NPK	23563	21222	-2341	62,2	70,6	8,40

5.2 Lukavec

5.2.1 Obsah železa a zinku v půdě stanovený vodným výluhem

Při hodnocení obsahu železa se vstupní hodnoty před založením pokusu (před realizací hnojení) pohybovaly v rozmezí 9,5 – 11,2 mg/kg (Tabulka 9). Hodnoty nevykazují příliš velkou variabilitu. V roce 2017 se hodnoty u všech variant hnojení zvýšily, včetně železem nehnojené kontroly a NPK. Nejvyšší hodnota byla zaznamenána u varianty kontrola, naopak u varianty kal 3 byla hodnota nejnižší. Mezi variantami však nebyl zaznamenán statisticky průkazný rozdíl.

Při hodnocení obsahu zinku se vstupní hodnoty před založením pokusu v roce 1996 pohybovaly mezi 0,046 a 0,068 mg/kg (Tabulka 9). Obdobně jako u železa, ani u zinku nejsou naměřené hodnoty v tomto roce příliš variabilní. Průkazně nejvyšší hodnota v roce 2017 byla zaznamenána u varianty kal 3, naopak nejnižší hodnota se vyskytla u varianty kontrola, následované variantou hnůj. Mezi variantami kontrola, kal 1, hnůj a NPK nebyl zaznamenán průkazný rozdíl. Rozdíl mezi hodnotami naměřenými v roce 2017 a 1996 se pohyboval v kladných hodnotách, kromě varianty kontrola.

Tabulka 9: Obsah okamžitě přístupného (vodný výluh) železa a zinku v půdě na stanovišti Lukavec (v mg/kg)

Varianta	Železo			Zinek		
	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996
Kontrola	10,2	14,9 ^a	4,60	0,062	0,051 ^a	-0,011
Kal 1	11,2	13,2 ^a	2,00	0,068	0,102 ^a	0,034
Kal 3	10,9	12,4 ^a	1,50	0,055	0,244 ^b	0,190
Hnůj	9,50	13,9 ^a	4,40	0,046	0,052 ^a	0,006
NPK	10,1	14,6 ^a	4,50	0,061	0,099 ^a	0,038

5.2.2 Obsah železa a zinku v půdě stanovený metodou CAD

Při hodnocení obsahu železa se vstupní hodnoty před založením pokusu (před realizací hnojení) pohybovaly v rozmezí 143 – 182 mg/kg (Tabulka 10). Hodnoty vykazují poměrně velkou variabilitu. V roce 2017 se hodnoty zvýšily u všech variant hnojení, včetně železem nehnojené kontroly a NPK. Průkazně nejvyšší hodnota byla zaznamenána u varianty kal 3, následované variantou kal 1, naopak u varianty NPK byla hodnota nejnižší. Mezi variantami kontrola, hnůj a NPK nebyl zaznamenán průkazný rozdíl.

Při hodnocení obsahu zinku se vstupní hodnoty před založením pokusu v roce 1996 pohybovaly mezi 3,06 – 3,77 mg/kg (Tabulka 10). Naměřené hodnoty u zinku v porovnání se železem nejsou v tomto roce příliš variabilní. Průkazně nejvyšší hodnota byla zaznamenána u varianty kal 3, poté následovala varianta kal 1 a naopak nejnižší hodnota se vyskytla u varianty kontrola. Mezi variantami kontrola, hnůj a NPK nebyl zaznamenán průkazný rozdíl. Rozdíl mezi hodnotami naměřenými v roce 2017 a 1996 se pohyboval v kladných hodnotách, kromě variant kontrola a NPK.

Tabulka 10: Obsah snadno přístupného (metoda CAD) železa a zinku v půdě na stanovišti Lukavec (v mg/kg)

Varianta	Železo			Zinek		
	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996
Kontrola	148	217 ^a	68,5	3,75	2,77 ^a	-0,974
Kal 1	182	386 ^b	204	3,45	11,1 ^b	7,62
Kal 3	150	489 ^c	339	3,27	27,1 ^c	23,9
Hnůj	143	234 ^a	91,1	3,06	4,36 ^a	1,30
NPK	146	190 ^a	43,7	3,77	3,25 ^a	-0,517

5.2.3 Obsah železa a zinku v půdě stanovený metodou Mehlich 3

Při hodnocení obsahu železa se vstupní hodnoty před založením pokusu (před realizací hnojení) pohybovaly v rozmezí 314,5 – 336,7 mg/kg (Tabulka 11). Hodnoty vykazují poměrně malou variabilitu. V roce 2017 se hodnoty zvýšily u všech variant hnojení, kromě varianty NPK. Průkazně nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u variant kal 1 a kal 3, naopak u varianty NPK byla hodnota průkazně nejnižší. Varianty NPK a hnůj se průkazně nelišily od kontroly, avšak hodnota u varianty hnůj byla průkazně vyšší ve srovnání s NPK.

Při hodnocení obsahu zinku se vstupní hodnoty před založením pokusu v roce 1996 pohybovaly mezi 2,78 – 3,80 mg/kg (Tabulka 11). Průkazně nejvyšší hodnota v roce 2017 byla zaznamenána u varianty kal 3, následované variantou kal 1, naopak nejnižší hodnota se vyskytla u varianty kontrola. Mezi variantami kontrola, hnůj a NPK nebyl zaznamenán průkazný rozdíl. Rozdíl mezi hodnotami naměřenými v roce 2017 a 1996 se pohyboval v kladných hodnotách, kromě variant kontrola a NPK.

Tabulka 11: Obsah potenciálně přístupného (metoda Mehlich 3) železa a zinku v půdě na stanovišti Lukavec (v mg/kg)

Varianta	Železo			Zinek		
	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996
Kontrola	315	330 ^{ab}	15,8	3,68	3,16 ^a	-0,524
Kal 1	325	455 ^c	130	2,78	12,1 ^b	9,28
Kal 3	337	487 ^c	151	3,76	26,4 ^c	22,6
Hnůj	335	342 ^b	7,3	3,11	4,21 ^a	1,11
NPK	330	304 ^a	-26,5	3,80	3,41 ^a	-0,386

5.2.4 Obsah železa a zinku v půdě stanovený výluhem lučavky královské

Při hodnocení obsahu železa se vstupní hodnoty před založením pokusu (před realizací hnojení) pohybovaly v rozmezí 28 399 – 29 380 mg/kg (Tabulka 12). Hodnoty nevykazují příliš velkou variabilitu. Nejvyšší hodnota v roce 2017 byla zaznamenána u varianty kal 3, naopak u varianty kontrola byla hodnota nejnižší. Mezi variantami kombinace kal 1 a hnůj a kombinace kal 3 a NPK nebyl zaznamenán výrazný rozdíl. Rozdíl mezi hodnotami, naměřenými v roce 2017 a 1996, dosahoval vždy kladných hodnot kromě varianty kontrola.

Při hodnocení obsahu zinku se vstupní hodnoty před založením pokusu v roce 1996 pohybovaly mezi 95,1 – 102,2 mg/kg (Tabulka 12). Naměřené hodnoty jsou v tomto roce poměrně variabilní. V roce 2017 došlo ke zvýšení hodnot u všech variant hnojení s výjimkou varianty kontrola. Nejvyšší hodnota byla zaznamenána u varianty kal 3, naopak nejnižší hodnota se vyskytla u varianty kontrola. Mezi variantami hnůj a NPK nebyl zaznamenán výrazný rozdíl.

Tabulka 12: Reziduální obsah (výluh lučavky královské) železa a zinku v půdě na stanovišti Lukavec (v mg/kg)

Varianta	Železo			Zinek		
	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996
Kontrola	28753	27268	-1485	99,7	91,5	-8,10
Kal 1	29380	28732	-648	102	124	22,2
Kal 3	29282	29982	701	99,6	158	58,7
Hnůj	28399	28884	485	95,1	98,6	3,50
NPK	29235	29965	730	95,6	97,3	1,80

5.3 Suchdol

5.3.1 Obsah železa a zinku v půdě stanovený vodným výluhem

Při hodnocení obsahu železa se vstupní hodnoty před založením pokusu (před realizací hnojení) pohybovaly v rozmezí 9,7 – 35,8 mg/kg (Tabulka 13). Hodnoty vykazují velkou variabilitu. V roce 2017 se hodnoty zvýšily u všech variant. Průkazně vyšší hodnota byla zaznamenána u varianty kontrola, a to ve srovnání s variantou NPK. Ostatní varianty byly statisticky podobné jednak vzájemně, a jednak i s variantami kontrola a NPK.

Při hodnocení obsahu zinku se vstupní hodnoty před založením pokusu v roce 1996 pohybovaly mezi 0,000 – 0,134 mg/kg (Tabulka 13). Naměřené hodnoty jsou v tomto roce poměrně variabilní. Průkazně nejvyšší hodnota byla zaznamenána u varianty kontrola, následované variantou kal 3, naopak průkazně nejnižší hodnota se v roce 2017 vyskytla u varianty NPK. Zbylé varianty (kal 1, kal 3 a hnůj) si byly statisticky podobné jak vzájemně, tak také s variantami kontrola, kal 3 a NPK. Rozdíl mezi hodnotami naměřenými v roce 2017 a 1996 se pohyboval v kladných hodnotách.

Tabulka 13: Obsah okamžitě přístupného (vodný výluh) železa a zinku v půdě na stanovišti Suchdol (v mg/kg)

Varianta	Železo			Zinek		
	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996
Kontrola	35,8	40,5 ^a	4,70	0,134	0,174 ^a	0,039
Kal 1	9,7	29,0 ^{ab}	19,3	0,000	0,104 ^{ab}	0,104
Kal 3	10,3	31,3 ^{ab}	21,1	0,007	0,152 ^a	0,144
Hnůj	12,5	33,8 ^{ab}	21,3	0,013	0,090 ^{ab}	0,077
NPK	10,4	24,6 ^b	14,1	0,007	0,070 ^b	0,064

5.3.2 Obsah železa a zinku v půdě stanovený metodou CAD

Při hodnocení obsahu železa se vstupní hodnoty před založením pokusu (před realizací hnojení) pohybovaly v rozmezí 9,50 – 12,5 mg/kg (Tabulka 14). Hodnoty nevykazují příliš velkou variabilitu. Průkazně vyšší hodnota byla v roce 2017 zaznamenána u varianty kal 3, a to ve srovnání s kontrolou a NPK. Zbývající varianty byly srovnatelné vzájemně a zároveň i s kalem 3, kontrolou a NPK. Rozdíl mezi hodnotami naměřenými v roce 2017 a 1996 dosahoval vždy kladných hodnot.

Při hodnocení obsahu zinku se vstupní hodnoty před založením pokusu v roce 1996 pohybovaly mezi 2,14 – 5,88 mg/kg (Tabulka 14). Naměřené hodnoty jsou v tomto roce poměrně variabilní. V roce 2017 došlo ke zvýšení hodnot u všech variant hnojení. Průkazně nejvyšší hodnota byla zaznamenána u varianty kal 3, naopak průkazně nejnižší hodnota se vyskytla u varianty NPK. Hodnota u varianty kal 1 byla rovněž průkazně vyšší než u NPK.

Tabulka 14: Obsah snadno přístupného (metoda CAD) železa a zinku v půdě na stanovišti Suchdol (v mg/kg)

Varianta	Železo			Zinek		
	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996
Kontrola	12,5	32 ^a	19,9	5,88	8,11 ^{ab}	2,23
Kal 1	9,50	56 ^{ab}	46,4	2,14	12,2 ^b	10,0
Kal 3	11,6	79 ^b	67,0	3,31	21,4 ^c	18,1
Hnůj	11,7	39 ^{ab}	27,1	2,17	6,95 ^{ab}	4,78
NPK	10,3	27 ^a	17,2	2,14	3,73 ^a	1,59

5.3.3 Obsah železa a zinku v půdě stanovený metodou Mehlich 3

Při hodnocení obsahu železa se vstupní hodnoty před založením pokusu (před realizací hnojení) pohybovaly v rozmezí 74,6 – 86,4 mg/kg (Tabulka 15). Hodnoty nevykazují příliš velkou variabilitu. V roce 2017 se hodnoty zvýšily u všech variant hnojení. Průkazně nejvyšší hodnoty byly oproti zbývajícím variantám zaznamenány u kal 1 a kal 3. Mezi variantami kontrola, hnůj a NPK nebyl zaznamenán průkazný rozdíl.

Při hodnocení obsahu zinku se vstupní hodnoty před založením pokusu v roce 1996 pohybovaly mezi 3,442 – 4,986 mg/kg (Tabulka 15). Naměřené hodnoty nejsou v tomto roce příliš variabilní. V roce 2017 došlo ke zvýšení hodnot u všech variant hnojení. Průkazně nejvyšší hodnota byla v roce 2017 zaznamenána u varianty kal 3, následované variantou kal 1, naopak nejnižší hodnota se vyskytla u varianty NPK. Mezi variantami kontrola, hnůj a NPK nebyl zaznamenán průkazný rozdíl.

Tabulka 15: Obsah potenciálně přístupného (metoda Mehlich 3) železa a zinku v půdě na stanovišti Suchdol (v mg/kg)

Varianta	Železo			Zinek		
	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996
Kontrola	82,5	101 ^a	18,7	4,46	10,9 ^a	6,47
Kal 1	74,6	208 ^b	134	4,04	17,9 ^b	13,9
Kal 3	86,4	228 ^b	142	4,99	29,4 ^c	24,4
Hnůj	85,9	134 ^a	48,2	4,03	9,79 ^a	5,76
NPK	74,8	110 ^a	35,0	3,44	5,47 ^a	2,03

5.3.4 Obsah železa a zinku v půdě stanovený výluhem lučavky královské

Při hodnocení obsahu železa se vstupní hodnoty před založením pokusu (před realizací hnojení) pohybovaly v rozmezí 26 291 – 28 673 mg/kg (Tabulka 16). Hodnoty vykazují vcelku velkou variabilitu. V roce 2017 se hodnoty zvýšily u všech variant hnojení kromě variant hnůj a NPK. Nejvyšší hodnota byla zaznamenána u varianty kal 3, naopak u varianty NPK byla hodnota nejnižší. Mezi variantami kontrola, hnůj a NPK nebyl zaznamenán výrazný rozdíl.

Při hodnocení obsahu zinku se vstupní hodnoty před založením pokusu v roce 1996 pohybovaly mezi 73,8 – 84,5 mg/kg (Tabulka 16). Naměřené hodnoty jsou v tomto roce poměrně variabilní. Nejvyšší hodnota byla v roce 2017 zaznamenána u varianty kal 3, naopak nejnižší hodnota se vyskytla u varianty NPK. U všech variant hnojení byl zaznamenán výrazný rozdíl. Rozdíl mezi hodnotami, naměřenými v roce 2017 a 1996, se pohyboval vždy v kladných hodnotách, kromě hodnot u variant hnůj a NPK.

Tabulka 16: Reziduální obsah (výluh lučavky královské) železa a zinku v půdě na stanovišti Suchdol (v mg/kg)

Varianta	Železo			Zinek		
	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996	Rok 1996	Rok 2017	2017-1996
Kontrola	26291	27280	989	79,7	85,8	6,10
Kal 1	27656	28367	711	78,5	98,3	19,8
Kal 3	26310	28678	2368	73,8	120	45,8
Hnůj	28054	27230	-824	80,5	78,2	-2,30
NPK	28673	27095	-1578	84,5	65,1	-19,5

6 Diskuze

Mikroelementy se v půdě přirozeně vyskytují zejména v primárních minerálech, z nichž se následně uvolňují prostřednictvím zvětrávacích procesů. Obsah mikroelementů přímo závisí na druhu horniny. Zejména železo je v půdách zastoupeno většinou v dostatečném množství, a to především ve formě hydratovaných oxidů a sulfidů. Železo obsahují také křemičitany, jako je augit, amfibol a biotit (Stucki et al. 1988). Celkové množství železa se dle Kulhánek et al. (2018) v půdě pohybuje v průměru od 20-40 g/kg. Naopak zinek je v zemědělské půdě sice velmi rozšířený, avšak v porovnání se železem se vyskytuje v daleko menším množství, které je však pro rostliny stále dostačující. Obdobně jako železo se zinek přirozeně vyskytuje v minerálech, jako je biotit, amfibol či augit (Alloway 2008).

Mikroelementy se často vyznačují tím, že se u nich vyskytuje poměrně úzké rozmezí mezi jejich optimálním a škodlivým obsahem. Zejména využívání čistírenských kalů jako hnojiv bývá často rizikové z hlediska kontaminace půdy. Z tohoto důvodu je důležité aplikovat kaly v souladu s legislativou pro aplikaci kalů ČOV a sedimentů na zemědělskou půdu. Jedná se o vyhlášku MŽP č. 153/2016 Sb, která uvádí mimo jiné tzv. preventivní hodnoty obsahu rizikových prvků na zemědělských půdách.

Při nedostatečném množství železa a zinku v půdě lze tyto živiny doplnit pomocí aplikace minerálních a organických hnojiv. V rámci výzkumu této diplomové práce byly zkoumány změny obsahu zinku a železa v půdě ovlivněné dlouhodobou aplikací čistírenských kalů, chlévského hnoje a minerálních NPK hnojiv.

Hnojenou plodinou v tomto experimentu je ječmen jarní, který se pěstoval v tříhonném osevním sledu spolu s bramborami a pšenicí ozimou. Ječmen jarní řadí Alloway (2008) mezi rostliny středně citlivé na nedostatek zinku. Dle Zimolka (2006) je ječmen jarní plodina se střední potřebou živin. Ječmen jarní dobře čerpá z pozůstatků použitých hnojiv k předplodinám, avšak dle Černý et al. (2007) tato skutečnost platí především při osevních postupech, do kterých byly řazeny rostliny hnojené chlévským hnojem.

Dlouhodobý pokus byl v rámci této diplomové práce založen v roce 1996 a probíhal na celkem třech stanovištích – Hněvčeves, Lukavec a Praha-Suchdol, která se od sebe odlišují zejména půdně-klimatickými podmínkami. V roce 1996 došlo na všech zkoumaných stanovištích ke zjištění obsahů okamžitě přístupného, snadno přístupného, potenciálně přístupného a reziduálního železa a zinku v půdě, a to v závislosti na metodách výzkumu vzorků. V rámci tohoto experimentu byly pro stanovení obsahu jednotlivých forem zinku a železa využity čtyři metody – vodný výluh, Mehlich 3, CAD a lučavka královská. Metodu Mehlich 3 však Zhang et al. (2008) považují za statisticky neověřenou napříč laboratořemi, naopak Škarpa (2020) považuje tuto metodu za velmi účinné činidlo, které má mimo jiné i lepší schopnost pufrovat pH při extrakci. Výsledné hodnoty, naměřené před založením pokusu v roce 1996, byly poté porovnávány s výsledky naměřenými v roce 2017. Rozdíl mezi hodnotami naměřenými v roce 2017 a 1996 značí buď nárůst nebo úbytek daného prvku v půdě.

6.1 Železo

V roce 1996, tedy před založením tohoto pokusu, se hodnoty reziduálního obsahu železa (stanovené výluhem lučavky královské) na stanovišti Hněvčeves pohybovaly v rozmezí hodnot 23,6 až 25,7 g/kg. Tyto hodnoty spadají do rozmezí 20 – 40 g/kg, které uvádějí Kulhánek et al. (2018) jako průměrné. K totožným hodnotám se přiklání ve své práci zároveň i Cornell & Schwertmann (2003). Oproti tomu na stanovišti Lukavec dosahoval reziduální obsah železa značně vyšších vstupních hodnot než na stanovišti Hněvčeves. Zde se hodnoty pohybovaly v rozmezí od 28,4 do 29,4 g/kg. I přes to, že se zde vyskytuje obsah železa v o něco větším množství, stále spadá do rozmezí udávaného Kulhánek et al. (2018) a Cornell & Schwertmann (2003). Na posledním stanovišti Suchdol byly vstupní hodnoty železa naměřeny mezi 26,3 a 28,7 g/kg.

V roce 2017 došlo na stanovišti Hněvčeves k výraznému snížení reziduálního obsahu železa u všech variant hnojení. Jedná se tak o jediné stanoviště, na kterém nedošlo k navýšení množství železa po aplikaci žádného hnojiva ze všech pěti sledovaných variant. Na stanovišti Lukavec došlo k mírnému navýšení obsahu železa pouze u variant kal 3, hnůj a NPK. Nejvíce zde obsah železa v půdě navýšila minerální NPK hnojiva. Oproti tomu ke značnému poklesu došlo u varianty kontrola, kde se obsah železa snížil o 1485 mg/kg. Na stanovišti Praha-Suchdol naopak varianty hnůj a NPK reziduální obsah železa v půdě snížily, u varianty NPK dokonce o 1578 mg/kg. Zde se jako nejúčinnější varianta hnojení jeví čistírenský kal (kal 3), který obsah železa v půdě navýšil o 2368 mg/kg. Baier et al. (1988) uvádějí jako možné omezení příjmu železa karbonátové půdy. Dále se omezení příjmu železa může vyskytovat na půdách, které jsou chudé na jílovité částice či na půdách silně provzdušněných, což by mohlo vysvětlovat snížení reziduálního obsahu železa po aplikaci všech variant hnojiv na stanovišti Hněvčeves. V neposlední řadě může být příjem železa omezován při intenzivním příjmu nitrátového dusíku (Baier & Baierová 1985).

Při hodnocení obsahu potenciálně přístupného železa (stanoveno metodou Mehlich 3) se vstupní hodnoty v roce 1996 na stanovišti Hněvčeves pohybovaly v rozmezí od 202 – 219 mg/kg. Na Stanovišti Lukavec dosahovaly vstupní hodnoty rozmezí hodnot 315 až 337 mg/kg. Na třetím stanovišti (Praha-Suchdol) se hodnoty potenciálně přístupného železa pohybovaly pouze v rozmezí 74,6 – 86,4 mg/kg a jedná se tak o stanoviště, které zpočátku obsahovalo nejmenší množství tohoto prvku.

V roce 2017 po aplikaci hnojiv došlo ke zvýšení obsahu potenciálně přístupného železa na stanovišti Hněvčeves, a to u všech variant hnojení. Zde měl největší vliv na zvýšení obsahu železa čistírenský kal (kal 3), který tento prvek v půdě navýšil o 189 mg/kg. Kal 3 byl rovněž variantou, která nejvíce navýšila obsah potenciálně přístupného železa na stanovišti Lukavec, a to na 487 mg/kg. Ke zvýšení obsahu došlo zároveň i u varianty kal 1, která navýšila obsah železa na 455 mg/kg. Zbíral (2016) ve své práci označuje hodnoty nad 420 mg Fe/kg za vysoké. Jako jediná varianta hnojení, která naopak obsah železa snížila, a to o 26,5 mg/kg, byla minerální NPK hnojiva. Na stanovišti Suchdol došlo ke zvýšení obsahu potenciálně přístupného železa u všech variant hnojení, nejvíce rovněž u hnojení variantou kal 3, a to o 142 mg /kg. Dle navrhovaných kritérií Zbíral (2016) se železo vyskytovalo na všech stanovištích s výjimkou stanoviště Lukavec (vysoký obsah) ve středním obsahu.

6.2 Zinek

V roce 1996 se hodnoty reziduálního obsahu zinku (stanovené výluhem lučavky královské) na stanovišti Hněvčeves pohybovaly v rozmezí 56,6 až 62,2 mg/kg. Prachovitá hlína, vyskytující se na stanovišti Hněvčeves, se řadí mezi běžné půdy, ve které jsou dle vyhlášky č. 153/2016 Sb. doporučeny limitní hodnoty celkového obsahu zinku 120 mg/kg sušiny. Vyšší hodnoty zinku, než je tento stanovený limit, by tak na stanovišti mohly znamenat značné riziko kontaminace půdy a zároveň potenciální ohrožení pro životní prostředí, a to zejména co se nežádoucího vstupu tohoto prvku do potravinového řetězce týče (Čermák et al. 2017). Indikační hodnota, při jejímž překročení může dojít k ohrožení růstu rostlin a produkční funkce půdy, je dle Havel et al. (2014) 400 mg Zn/kg sušiny stanoveného extrakcí lučavkou královskou. Hodnoty reziduálního obsahu zinku na stanovišti Hněvčeves se dle vyhlášky č. 153/2016 Sb. nachází v rozmezí doporučených hodnot nepředstavující riziko kontaminace půdy na stanovišti. Na stanovišti Lukavec byly ve stejném roce hodnoty reziduálního obsahu zinku stanoveny výluhem lučavky královské v rozmezí 95,1 - 102,2 mg/kg. Na stanovišti Lukavec se vyskytuje půdní druh písčité hlína, kterou řadí Baiamonte et al. (2014) rovněž mezi půdy běžné. I přes to, že jsou hodnoty na stanovišti Lukavec značně vyšší než na stanovišti Hněvčeves, stále se nachází v rozmezí limitních hodnot a pravděpodobně tak nehrozí kontaminace půdy ani narušení potravního řetězce. Poslední zkoumané stanoviště se nacházelo v městské části Praha-Suchdol. Zde se v roce 1996 hodnoty reziduálního obsahu zinku stanovené výluhem lučavky královské pohybovaly v rozmezí 73,8 – 84,5 mg/kg. Ani zde naměřené hodnoty reziduálního obsahu zinku nepřestavovaly riziko kontaminace půdy.

K nejvýraznějším navýšením reziduálního obsahu zinku v půdě došlo v roce 2017 zejména po aplikaci čistírenského kalu (kal 1 a kal 3), a to na všech třech stanovištích. Na prvním zkoumaném stanovišti Hněvčeves došlo po aplikaci kalu k navýšení reziduálního obsahu zinku na hodnoty 80,9 (kal 1) a 103 (kal 3) mg/kg. Také na stanovišti Lukavec došlo v roce 2017 ke značnému navýšení reziduálního obsahu zinku. Hodnoty se po aplikaci čistírenského kalu navýšily na 124 (kal 1) a 158 (kal 3) mg/kg. Tyto hodnoty ale již Čermák et al. (2017) považují za rizikové, a to zejména v oblasti kontaminace půdy na stanovišti. V tomto případě by tak čistírenský kal mohl mít negativní vliv na vlastnosti půdy i sklizených produktů. Na stanovišti Praha-Suchdol se hodnoty reziduálního obsahu zinku navýšily po aplikaci varianty kal 1 z 78,5 mg/kg na 98,3 mg/kg. Aplikace kalu 3 s sebou přinesla navýšení obsahu zinku o 45,8 mg/kg, a to na hodnotu 120 mg/kg. Jedná se tak o hnojivo s nejvyšším přísunem zinku ze všech pěti variant hnojení na tomto stanovišti. Naměřená hodnota 120 mg/kg po aplikaci varianty kal 3 je však považována dle vyhlášky č. 153/2016 Sb. za hraniční. Z důvodu navýšení hodnot zinku na všech zkoumaných stanovištích se čistírenský kal jeví jako účinné hnojivo, které obsahuje vysoký obsah tohoto prvku. Například Balík et al. (1998) ve svém výzkumu uvádějí celkový obsah zinku v kalech 1580 mg Zn/kg sušiny. Také Dusza et al. (2009) popisují výborné hnojivé účinky čistírenských kalů, a to zejména díky vysokému podílu živin a organických látek. Jak již ale bylo zmíněno, nevhodná aplikace kalů na půdách, které dosahují vysokého obsahu zinku již před jejich hnojením, je považována za rizikovou. To bylo potvrzeno právě v případě stanoviště Lukavec, kde byly limitní hodnoty prvku po hnojení kalem značně překročeny.

I přes to, že ve většině případů došlo k navýšení obsahu zinku na všech stanovištích, některé varianty po jejich aplikaci naopak zapříčinily jeho úbytek. Jedná se zejména o variantu kontrola na stanovišti Lukavec, kde došlo v roce 2017 k úbytku obsahu zinku v půdě o 8,10 mg/kg. Také na stanovišti Suchdol došlo k úbytku obsahu zinku hned ve dvou variantách hnojení (hnůj a NPK), kde u varianty NPK došlo ke snížení obsahu zinku v půdě o 19,5 mg/kg. Oproti tomu na stanovišti Hněvčeves docházelo pouze k navýšení reziduálního obsahu zinku, a to u všech variant hnojení.

Při hodnocení obsahu potenciálně přístupného zinku stanoveného metodou Mehlich 3 byly vstupní hodnoty v roce 1996 na stanovišti Hněvčeves stanoveny v rozmezí 8,38 až 9,73 mg/kg. Na stanovišti Lukavec se hodnoty pohybovaly v porovnání s ostatními stanovišti poměrně v nízkých hodnotách, a to v rozmezí 2,78 – 3,80 mg/kg. Obsah potenciálně přístupného zinku na stanovišti Suchdol dosahoval hodnot 3,44 – 4,99 mg/kg. Dle navrženého kritéria 2,21 – 5,00 mg/kg (střední obsah zinku), které ve své práci uvádí Zbiral (2016), lze hodnoty naměřené na stanovištích Lukavec a Suchdol zařadit mezi hodnoty středního obsahu. Naopak hodnoty naměřené na stanovišti Hněvčeves lze v tomto případě považovat již za hodnoty obsahu vysokého.

V roce 2017 došlo na stanovišti Hněvčeves ke snížení obsahu potenciálně přístupného zinku (metoda Mehlich 3) u všech variant hnojení, kromě hnojení variantou kal 3, kde došlo naopak k navýšení na 12,6 mg/kg. Na stanovišti Lukavec došlo ke snížení obsahu potenciálně přístupného zinku pouze u dvou variant hnojení, a to u varianty kontrola a NPK. K výraznému zvýšení došlo zejména u variant kal 1 a kal 3, kde především varianta kal 3 navýšila obsah zinku o 22,6 mg/kg, a to na hodnotu 26,4 mg/kg. Obsah potenciálně přístupného zinku na stanovišti Lukavec po hnojení čistírenskými kaly tak dosahuje vysokých hodnot. Na posledním stanovišti (Suchdol) došlo ke zvýšení obsahu potenciálně přístupného zinku u všech variant hnojení. Obdobně, jako u stanoviště Lukavec, nejvíce obsah zinku navýšily obě varianty čistírenských kalů. Varianta kal 3 přitom obsah zinku navýšila o 24,4 mg/kg na hodnotu 29,4 mg/kg. Všechny naměřené hodnoty v roce 2017 na stanovišti Suchdol vykazovaly dle kritérií Zbiral (2016) hodnoty vysokého obsahu.

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vyhodnotit různé frakce železa a zinku v půdě, a to v závislosti na různorodých systémech dlouhodobé aplikace minerálních a organických hnojiv. Byly zde sledovány změny okamžitě přístupného, snadno přístupného, potenciálně přístupného a reziduálního obsahu železa a zinku v půdě na třech stanovištích s odlišnými půdně-klimatickými podmínkami (Hněvčeves, Lukavec, Praha-Suchdol). Zde proběhlo porovnání výsledků z roku 1996, kdy se pokus zakládal, a výsledků z roku 2017. V průběhu pokusu byly sledovány různé varianty hnojení (kontrola, čistírenské kaly, chlévský hnůj a minerální NPK hnojiva).

Z výsledků provedeného výzkumu vyplývá, že roku 2017 byl nejvyšší reziduální obsah a zároveň také obsah potenciálně přístupného zinku v půdě naměřen po aplikaci čistírenských kalů. Tento výsledek tak prokázal, že čistírenské kaly jsou v porovnání s ostatními zkoumanými variantami hnojení, jako je chlévský hnůj, kontrola a minerální NPK hnojiva, vysoce účinné z hlediska zvýšení obsahu zinku v půdě.

Stejně tak tomu bylo i u druhého zkoumaného mikroelementu, kde jak obsah potenciálně přístupného a zároveň také reziduálního železa rovněž nejvíce navýšily čistírenské kaly. Kromě čistírenských kalů zde však hrály velkou roli také varianty hnojení chlévský hnůj a minerální NPK hnojiva, u nichž došlo rovněž k výraznému navýšení reziduálního obsahu železa, a to zejména na stanovišti Lukavec.

Čistírenské kaly však u zinku, jakožto potenciálně rizikového prvku, nemusí vždy přinášet pouze žádoucí pozitivní účinky. Naopak je zde velká rizikovost, zejména z hlediska kontaminace životního prostředí a nežádoucího vstupu prvku do potravního řetězce. Takové ohrožení se v rámci provedeného výzkumu vyskytlo zejména na stanovišti Lukavec, kde se reziduální obsah zinku po aplikaci čistírenských kalů navýšil na hodnoty 124 (kal 1) a 158 (kal 3) mg/kg neboli nad limitní hodnoty, které jsou již mnoha autory považovány za rizikové. Zde by tak aplikace čistírenského kalu mohla přivodit negativní důsledky jak v oblasti vlastností půdy, tak také sklizených plodin.

Dle zjištěných výsledků po dlouhodobé aplikaci chlévského hnoje nedocházelo pokaždé ke stabilizaci obsahů železa i zinku v půdě. Stabilizace reziduálního obsahu železa neproběhla na stanovišti Hněvčeves a zároveň také na stanovišti Praha-Suchdol. Reziduální obsah zinku nebyl stabilizován pouze na stanovišti Praha-Suchdol. Z této skutečnosti je patrné, že problematika dlouhodobého využívání chlévského hnoje za účelem stabilizace obsahu těchto mikroelementů zůstává nadále otevřenou.

Poslední zkoumaná hypotéza se zaměřovala na aplikaci minerálních NPK hnojiv, při kterých by mohlo docházet k odčerpání železa i zinku z půdy. V porovnání s nehnojenou kontrolou byla nižší zásoba reziduálního obsahu železa v půdě zaznamenána na stanovištích Hněvčeves a Praha-Suchdol, naopak na stanovišti Lukavec došlo oproti kontrole ke zvýšení obsahu železa. Vyšší obsah zinku v půdě v porovnání s nehnojenou kontrolou byl zaznamenán na stanovišti Hněvčeves i Lukavec, naopak na stanovišti Praha-Suchdol došlo u varianty NPK k výraznému snížení celkového obsahu zinku v porovnání se všemi zbylými variantami hnojení, včetně nehnojené varianty kontrola. Tato hypotéza tedy rovněž v rámci tohoto výzkumu nebyla potvrzena a zároveň ani vyvrácena, je tak třeba další výzkum, zaměřený např. na vliv půdních vlastností.

8 Seznam literatury a použitých zdrojů

- Ai YJ, Li FP, Gu HH, Chi XJ, Yuan XT, Han DY. 2020. Combined effects of green manure returning and addition of sewage sludge compost on plant growth and microorganism communities in gold tailings. *Environmental Science and Pollution Research* **27**:31686-31698.
- Alloway BJ. 2008. Zinc in soils and crop nutrition. IZA and IFA, Brussels, Belgium and Paris.
- Anonym. 2009. Jednosložkové hnojivo pro doplnění deficitu zinku Lister Zn 150 WP, 80 SL. Available from <https://www.biosfor.cz/listove-hnojivo-lister-zn-150-wp-80-sl> (accessed January 2021).
- Anonym. 2021. Zincuran SC 5 l. Available from <http://obchod.agrokop.cz/zincuran-sc-5-l-2> (accessed January 2021).
- Baiamonte G, Pasquale CD, Marsala V, Cimò G, Alonzo G, Crescimanno G, Conte P. 2014. Structure alteration of a sandy-clay soil by biochar amendments. *Journal of Soils and Sediments* **15**:816-824.
- Baier J, Baierová V. 1985. Abeceda výživy rostlin a hnojení. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- Baier J, Smetánková M, Baierová V. 1988. Diagnostika výživy rostlin. MZVŽ ČSR, Praha.
- Baier J, Baierová V. 1988. Jak hnojit na zahrádce. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- Baligar VC, Duncan RR. 1990. Crops as Enhancers of Nutrient Use. Academic Press, Cambridge.
- Balík J, Tlustoš P, Pavlíková D, Száková J. 1998. Obsah zinku v rostlinách jarního ječmene po aplikaci čistírenských kalů. Available from <http://www.agris.cz/clanek/126319> (accessed March 2021).
- Barak P, Helmke PA. 1993. The chemistry of zinc. Pages 1-13 in Robson AD, editor. Zinc in Soils and Plants. Springer, Dordrecht.
- Barczak B, Jastrzębska M, Kostrzevska MK. 2019. Biofortification of Spring Barley Grain with Microelements through Sulfur Fertilization. *Journal of Chemistry* **2019**:1-7.
- Benada J. 2001. Metodika pěstování jarních obilnin: ječmen jarní, oves, pšenice jarní. Zemědělský výzkumný ústav, Kroměříž.

- Boer W, Folman LB, Summerbell RC, Boddy L. 2005. Living in a fungal world: impact of fungi on soil bacterial niche development. *FEMS Microbiology Reviews* **29**:795-811.
- Briat JF, Dubos Ch, Gaymard F. 2015. Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. *Trends in Plant Science* **20**:33-40.
- Broadley MR, White PJ, Hammond JP, Zelko I, Lux A. 2007. Zinc in plants. *New phytologist Foundation* **173**:677-702.
- Buchanan BB, Gruissem W, Jones RL. 2000. *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. American Society of Plant Physiologists, Rockville.
- Cornell RM, Schwertmann U. 2003. *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Čermák P, Mühlbachová G, Káš M, Vavera R, Pechová M. 2017. Metodický postup pro stanovení obsahu mikroelementů metodou Mehlich 3 a návrh hodnocení jejich obsahu v zemědělských půdách. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha 6 – Ruzyně.
- Černý L, Vašák J, Křováček J, Hájek M. 2007. *Jarní sladovnický ječmen-Pěstitelský rádce*. Kurent, s. r. o., Praha.
- Černý J, Balík J, Kulhánek M, Vašák F. 2010. Bilance živin v dlouhodobých hnojařských pokusech. Pages 26-31 in Vaněk V, editor. *Sborník z 16. mezinárodní konference: Racionální použití hnojiv: zaměřené na úlohu a význam dlouhodobých pokusů ve výživě rostlin*. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Černý J, Vaněk V, Kulhánek M. 2010. Vliv hnojení na výnos a úrodnost půdy. Česká zemědělská univerzita, Praha. Available from <https://www.zemedelec.cz/vliv-hnojeni-na-vynos-a-urodnost-pudy/> (accessed December 2020).
- Černý L. 2011. Koláč prakticky využitelných znalostí při pěstování jarního sladovnického ječmene. Pages 7-9 in Černý L, editor. *Kompendium 2011 je konferenci: Řízení a diagnostika klíčových momentů v technologii jarního ječmene*. Sdružení pro ječmen a slad, Velká Bystřice.
- Černý J, Balík J, Kulhánek M, Vašák F, Vaněk V. 2014. Využití kalů z čistíren odpadních vod. Pages 19-26 in Vaněk V, editor. *Sborník z 25. mezinárodní konference: Racionální použití hnojiv zaměřené na význam a posláním organických látek v půdě*. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Černý J, Kulhánek M, Balík J, Sedlár O. 2018. Zásady hnojení mikroelementy. Pages 63-70 in Vaněk V, editor. *Sborník z 24. mezinárodní konference: Racionální použití hnojiv*

zaměřené na význam a uplatnění mikroelementů ve výživě rostlin. Česká zemědělská univerzita, Praha.

- Davydov R, Sokolov M, Hogland W, Glinushkin A, Markaryan A. 2018. The application of pesticides and mineral fertilizers in agriculture. *MATEC Web of Conferences* **245**:1-5.
- Delibacak S, Voronina L, Morachevskaya E, Ongun AR. 2020. Use of sewage sludge in agricultural soils: Useful or harmful. *Eurasian Journal of Soil Science* **9**:126-139.
- Dohányos M. 2006. Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. *Biom.cz*. Available from <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu> (accessed January 2021).
- Dusza E, Zablocki Z, Mieszczerykowska-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**: 63-70.
- EN 13651: 2002: Soil improvers and growing media – Extraction of calcium chloride/DTPA (CAT) soluble nutrients. Czech normalization institute, Prague, 20 pp.
- Fageria NK, Baligar VC, Jones ChA. 2010. *Growth and Mineral Nutrition of Field Crops*, Third Edition. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Gáborík Š, Ložek O, Slamka P, Kajanovičová I, Várady T. 2010. Výsledky dlhodobých pol'ných pokusov na Slovensku. Pages 49-56 in Vaněk V, editor. *Sborník z 16. mezinárodní konference: Racionální použití hnojiv zaměřené na úlohu a význam dlouhodobých pokusů ve výživě rostlin*. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Gao C, El-Sawah AM, Ali DFI, Hamoud YA, Shaghaleh H, Sheteiwy MS. 2020. The Integration of Bio and Organic Fertilizers Improve Plant Growth, Grain Yield, Quality and Metabolism of Hybrid Maize (*Zea mays* L.). *Agronomy* **10**:1-25.
- Geisseler D, Scow KM. 2014. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms – A review. *Soil Biology and Biochemistry* **75**:54-63.
- Ghosh SK, Banerjee S, Sengupta Ch. 2017. Bioassay, characterization and estimation of siderophores from some important antagonistic fungi. *Journal of Biopesticides* **10**:105-112.
- Górny AG. 2001. Photosynthetic activity of flag leaves in diallel crosses of spring barley under varied nutrition and soil moisture. *Cereal Research Communications* **29**:159-166.
- Hamid AE, Bugaev PD. 2020. Impact of Seed Treatments Pre-sowing and Organo-mineral Fertilizer on Spring Barley Production. *Indian Journal of Agricultural Research* **54**:611-616.

- Hansen NC, Hopkins BG, Ellsworth JW, Jolley VD. 2007. Iron Nutrition in Field Crops. Pages 23-59 in Barton LL, Abadía J, editors. Iron Nutrition in Plants and Rhizospheric Microorganisms. Springer, Dordrecht.
- Havel M, Vebr V, Petrlík J, Válek P. 2014. Zinek. Available from <https://arnika.org/zinek> (accessed March 2021).
- Hezký P. 2020. Podmínky využití kalů ve výživě rostlin. Available from <https://www.uroda.cz/podminky-vyuziti-kalu-ve-vyzive-rostlin/> (accessed November 2020).
- Holík L, Hlisnikovský L, Kunzová E. 2018. The effect of mineral fertilizers and farmyard manure on winter wheat grain yield and grain quality. *Plant Soil Environ.* **64**:491-497.
- Hradil R. 2015. Půda zdravá-živá-úrodná. Fabula a Bioinstitut, Olomouc.
- Hudec S. 2020. Sladovnický ječmen – plodina s jistým odbytem. Limagrain Central Europe Cereals, s.r.o. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/ochrana-rostlin-a-pestovani/osivo-a-sadba-1/sladovnicky-jecmen-plodina-s-jistym-odbytem> (accessed December 2020).
- Chadwick D, Sommer S, Thorman R, Fangueiro D, Cardenas L, Amon B, Misselbrook T. 2011. Manure management: Implications for greenhouse gas emissions. *Animal Feed Science and Technology* **166-167**:514-531.
- ISO 11466:1995: Soil quality - Extraction of trace elements soluble in aqua regia, 1:1-6.
- Järvan M, Vettik R, Tamm K. 2017. The importance and profitability of farmyard manure application to an organically managed crop rotation. *Zemdirbyste-Agriculture* **104**:321-328.
- Kannan S. 1969. Penetration of iron and some organic substances through isolated cuticular membranes. *Plant Physiol.* **44**:517-521.
- Khan A, Khan A. 2020. Phenology, Crop Stand and Biomass of Wheat in Response to Farmyard Manure and Soil Amendments. *Sarhad Journal of Agriculture* **36**:777-788.
- Klír J, Kunzová E, Čermák P. 2008. Rámcová metodika výživy rostlin a hnojení. Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha-Ruzyně.
- Kobayashi T, Nozoye T, Nishizawa NK. 2019. Iron transport and its regulation in plants. *Free Radical Biology and Medicine* **133**:11-20.

- Košál R. 2013. Využití LOVOCaN a dalších listových hnojiv ve výživě jarního ječmene. Pages 30-32 in Černý L, editor. Sladovnický ječmen: Kompendium 2013 ke konferenci Intenzita a kvalita. Sdružení pro ječmen a slad (SJS), Velká Bystřice.
- Křen J, Neudert L, Procházková B, Smutný V. 2015. Obecná produkce rostlinná-1. část. VŠZ, Brno.
- Kulhánek M, Černý J, Balík J, Sedlár O. 2018. Úloha železa, manganu, mědi a zinku ve výživě rostlin. Pages 23-32 in Vaněk V, editor. Sborník z 24. mezinárodní konference: Racionální použití hnojiv zaměřené na význam a uplatnění mikroelementů ve výživě rostlin. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Liu S, Wang J, Pu S, Blagodatskaya E, Kuzyakov Y, Razavi BS. 2020. Impact of manure on soil biochemical properties: A global synthesis. *Science of The Total Environment* **745**:1-15.
- Lucena JJ. 2003. Fe Chelates for Remediation of Fe Chlorosis in Strategy I Plants. *Journal of Plant Nutrition* **26**:1969-1984.
- Lucena JJ, Hernandez-Apaolaza L. 2017. Iron nutrition in plants: an overview. *Plant Soil* **418**:1-4.
- Luscombe PC, Syers JK, Gregg PEH. 1979. Water extraction as a soil testing procedure for phosphate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **10**:1361-1369.
- Manna MC, Swarup A, Wanjari RH, Mishra B, Shahi DK. 2007. Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields. *Soil and Tillage Research* **94**:397-409.
- Manzeke MG, Mtambanengwe F, Watts MJ, Hamilton EM, Lark RM, Broadley MR, Mapfumo P. 2019. Fertilizer management and soil type influence grain zinc and iron concentration under contrasting smallholder cropping systems in Zimbabwe. *Scientific Reports* **9**:1-13.
- Marschnert H, Kirkby EA, Engels C. 1997. Importance of Cycling and Recycling of Mineral Nutrients within Plants for Growth and Development. *Botanica Acta* **110**:265-273.
- Mehlich A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **15**:1409-1416.
- Ministerstvo zemědělství. 1998. Zákon č. 156 ze dne 12. června 1998, o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd (zákon o hnojivech). Pages 6709-6715 in *Sbírka zákonů České republiky*, 1998, částka 54. Česká republika.

- Ministerstvo životního prostředí. 2001. Vyhláška č. 383 ze dne 17. října 2001, o podrobnostech nakládání s odpady. Pages 8355-8420 in Sbíрка zákonů České republiky, 2001, částka 145. Česká republika.
- Ministerstvo životního prostředí. 2015. Kaly z čistíren odpadních vod. Ministerstvo životního prostředí, Praha. Available from https://www.mzp.cz/cz/kaly_cistiren_odpadnich_vod (accessed November 2020).
- Ministerstvo životního prostředí. 2016. Vyhláška č. 153 ze dne 9. května 2016, o stanovení podrobností ochrany kvality zemědělské půdy a o změně vyhlášky č. 13/1994 Sb., kterou se upravují některé podrobnosti ochrany zemědělského půdního fondu. Pages 2692-2699 in Sbíрка zákonů České republiky, 2016, částka 59. Česká republika.
- Ministerstvo životního prostředí. 2016. Vyhláška č. 437 ze dne 19. prosince 2016, o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. Pages 6994-7021 in Sbíрка zákonů České republiky, 2016, částka 178. Česká republika.
- Mori S. 1997. Reevaluation of the genes induced by iron deficiency in barley roots. *Soil Science and Plant Nutrition* **43**:975-980.
- Noworolnik K, Leszczyńska D, Kostiw P. 2018. The yield of selected cultivars of spring barely depending on the sowing rate. *Polish Journal of Agronomy* **33**:3-7.
- Pavlu L. 2018. *Základy-pedologie-a-ochrany-pudy*. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Peng Y, Zhang M, Xu Z, Yang T, Su Y, Zhou T, Wang H, Wang H, Wang Y, Lin Y. 2020. Estimation of leaf nutrition status in degraded vegetation based on field survey and hyperspectral data. *Scientific Reports* **10**:1-12.
- Richter R. 2004. *Zinek*. MZLU, Brno. Available from http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/biogenni_prvky/zn.htm (accessed November 2020).
- Richter R. 2007. *Železo v půdě*. MZLU, Brno. Available from http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/agrochemie_pudy/puda_fe.htm (accessed January 2021).
- Ronen E. 2007. Micro-elements in agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* **3**:39-48.
- Safyan N, Naderidarbaghshahi MR, Bahari B. 2012. The effect of microelements spraying on growth, qualitative and quantitative grain corn in Iran. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences* **8**:3-25.

- Shaver TM, Westfall DG, Ronaghi M. 2007. Zinc Fertilizer Solubility and Its Effects on Zinc Bioavailability Over Time. *Journal of Plant Nutrition* **30**:123-133.
- Shuman LM, Dudka S, Das K. 2000. Zinc Forms and Plant Availability in a Compost Amended Soil. *Water, Air, and Soil Pollution* **128**:1-11.
- StatSoft inc. 1984-2013 (2021): STATISTICA, version 12.
- Stucki JW, Goodman BA, Schwertmann U. 1988. *Iron in Soils and Clay Minerals*. D. Reidel publishing company, Dordrecht.
- Šzáková J, Tlustoš P. 2018. Role selenu a vybraných rizikových prvků v rostlinách. Pages 39-46 in Vaněk V, editor. *Sborník z 24. mezinárodní konference: Racionální použití hnojiv zaměřené na význam a uplatnění mikroelementů ve výživě rostlin*. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Šetlík I, Seidlová F, Šantrůček J. 2004. *Fyziologie rostlin*. Available from <http://kebr.prf.jcu.cz/?act=2#KEBR562> (accessed January 2021).
- Škarpa P, Richter R. 2013. Formy zinku v listových hnojivech ovlivňují výnos semene máku jarního. Pages 105-108 in Mikšík V, Bečková L, Bečka D, editors. *Prosperující olejniny*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Škarpa P. 2020. Stanovení přístupných živin v půdě. Available from https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/laborator/index.php?N=1&I=3&J=9&K=0 (accessed February 2021).
- Trčková M, Raimanová I. 2007. Stopové prvky ve výživě rostlin. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v. v. i., Praha-Ruzyně. Available from <https://www.zemedelec.cz/stopove-prvky-ve-vyzive-rostlin/> (accessed December 2020).
- Tripolaskaja L, Baksienė E, Razukas A, Sidlauskas G. 2016. How Organic Fertilizers Change Chemical Element Leaching: A Summary of the Lysimeter Studies in Lithuania, 1987-2014. *Polish Journal of Environmental Studies* **25**:2589-2599.
- Ullrich SE. 2011. *Barley Production, Improvement, and Uses*. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken.
- Usubaliev B, Brantestam AK, Kurmanbekova G, Chekirov K, Totubaeva N, Bothmer R. 2020. Agronomic Performance of Spring Barley Cultivars under Different Eco-Environmental Conditions. *Polish Journal of Environmental Studies* **29**:4331-4344.

- Valenta J. 2018. Hnojiva s mikroelementy. Pages 57-62 in Vaněk V, editor. Sborník z 24. mezinárodní konference: Racionální použití hnojiv zaměřené na význam a uplatnění mikroelementů ve výživě rostlin. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2016. Výživa a hnojení polních plodin. Profi Press s.r.o., Praha.
- Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Kolář L. 2018. Význam a poslání mikroelementů ve výživě rostlin. Pages 9-14 in Vaněk V, editor. Sborník z 24. mezinárodní konference: Racionální použití hnojiv zaměřené na význam a uplatnění mikroelementů ve výživě rostlin. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Wang X, Chen T, Ge Y, Jia Y. 2008. Studies on land application of sewage sludge and its limiting factors. *Journal of Hazardous Materials* **160**:554-558.
- Zbírál J. 2016. Determination of plant-available micronutrients by the Mehlich 3 soil extractant – a proposal of critical values. *Plant Soil and Environment* **62**:527-531.
- Zhang H, Schroder J, Payton ME, Kaiuki S. 2008. Interlaboratory Validation of the Mehlich 3 Method for Extraction of Plant-Available Phosphorus. *Journal of AOAC International* **92**:91-102.
- Zimolka J. 2006. Ječmen-formy a užitkové směry v ČR. Profi Press, Praha.
- Zufiaurre R, Olivar A, Chamorro P, Callizo A. 1998. Speciation of metals in sewage sludge for agricultural uses. *Analyst* **123**:255-259.

