

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA APLIKOVANÉ EKOLOGIE



**Vliv biocharu na produkci živin a cukrů u
cukrové řepy (*Beta Vulgaris*)**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce:

doc. Ing. Kateřina Berchová, Ph.D.

Vypracovala:

Bc. Lucie Blažková

Praha 2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Lucie Blažková

Regionální environmentální správa

Název práce

Vliv biocharu na produkci živin a cukrů u cukrové řepy (*Beta vulgaris*)

Název anglicky

Effect of biochar on the production of nutrients and sugars in sugar beet (*Beta vulgaris*)

Cíle práce

Předložená diplomová práce navazuje na bakalářskou práci, která se zabývala aplikací biocharu do zemědělské půdy vykazující nízkou zadržovací schopností živin s cílem zvýšit retenci půdní vody a také snížit loužení potřebných živin (především dusičnanů) do nižších vrstev.

Cílem diplomové práce bylo sledovat a posoudit vliv biocharu na produkci živin a cukrů a zároveň ověřit a navrhnout optimální dávku vybraného biocharu v kombinaci s aplikací statkových hnojiv pro účely maximální produkce sledované plodiny. V rámci dlouhodobého testování aplikace biocharu do zemědělských půd byl založen nádobový experiment s cukrovou řepou v klimatizovaném skleníku v areálu Ústavu experimentální botaniky akademie věd ČR. Následně výzkum pokračoval v laboratorních podmínkách na České zemědělské univerzitě v Praze.

V práci byly stanoveny tyto cíle:

1. Posoudit, zda je obsah živin v nadzemní a podzemní biomase testované plodiny (cukrová řepa) ovlivněn různými typy substrátu (neošetřený substrát, substrát s přídatkem 2% a 5% biocharu, substrát s přídatkem 2% a 5% hnoje a v poslední řadě substrát ošetřený kombinací biocharu a statkového hnoje opět ve dvou odlišných dávkách 2% a 5% hmotnostně).

2. Vyhodnotit účinnost a kvalitu přídatku biocharu na obsah živin v nadzemní a podzemní biomase testované plodiny (cukrová řepa) a zároveň zhodnotit použití biocharu jakožto půdního aditiva pro zemědělské půdy.

Metodika

Práce navazuje na předchozí nádobový experiment s hospodářsky významnou cukrovou řepou, která je velmi náročná na množství vody a dostupných živin. Experiment byl proveden v laboratorních podmínkách, kde byla získána potřebná biomasa rostlin, a to konkrétně na sledování obsahu živin a cukrů. Získaná biomasa byla usušena, rozemleta a následně laboratorně testována. Biologicky dostupné prvky v půdě byly extrahovány metodou Mehlich III. a následně byl zbytkový obsah živin stanoven pomocí ICP-EOS spektrometrie. Obsahy cukrů byly analyzovány pomocí metody HPLC. Výsledky byly statisticky vyhodnoceny.

Doporučený rozsah práce

50 stran, 2 grafy

Klíčová slova

biochar, obsah živin, obsah cukrů, výživa rostlin, nádobový experiment, cukrová řepa

Doporučené zdroje informací

- F. Verheijen, S. Jeffery, A.C. Bastos, M. van der Velde, I. Diafas (2010) Biochar Application to Soils A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions; European Communities, 2010
- LEHMANN, J. – JOSEPH, S. Biochar for environmental management : science and technology. London ; Sterling: Earthscan, 2009. ISBN 978-1-84407-658-1.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. London: Academic Press, 1995. ISBN 0-12-473543-6.
- RICHTER, R. – HLUŠEK, J. Výživa a hnojení rostlin. 1, Obecná část. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1994. ISBN 80-7157-138-5.

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

doc. Ing. Kateřina Berchová, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované ekologie

Elektronicky schváleno dne 28. 2. 2023

prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 1. 3. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 06. 02. 2024

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: **Vliv biocharu na produkci živin a cukrů u cukrové řepy (*Beta vulgaris*)** vypracovala samostatně pod odborným vedením doc. Ing. Kateřiny Berchové Ph.D. a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom/a, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování:

Ráda bych poděkovala doc. Ing. Kateřině Berchové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, vstřícnost, trpělivost a všestrannou pomoc při zpracování této diplomové práce. Dále děkuji Ústavu experimentální botaniky AV ČR nejen za poskytnutí laboratoře při testování cukrové řepy ale také za pomoc při testování zkoumaných subjektů. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu v průběhu celého mého studia.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá využitím biocharu v zemědělské půdě s cílem zvýšit obsah organické hmoty a schopnost zadržení vody a živin. Práce se soustředí na analýzu vlivu biocharu na produkci živin a cukrů, optimalizaci dávky biocharu ve spojení s hnojivem pro maximální výnosy plodin a na zkoumání rozdílů ve vstřebávání živin v nadzemní a kořenové části cukrové řepy. Díky své adsorpční a kationtové výměnné kapacitě se biochar stává efektivním nositelem živin, což přispívá ke zlepšení kvality půdy a adaptaci na změnu klimatu. Problematika sucha stále více ohrožuje výnosy cukrové řepy a dalších náročných plodin na nedostatek vody a živin.

Teoretická část obsahuje základní poznatky o výživě rostlin, minerální výživě a funkcích jednotlivých prvků, sacharidech a biocharu. Tyto informace slouží k správnému porozumění fungování rostlin, optimálnímu příjmu živin pro jejich růst a vývoj, dosažení maximálních výnosů a k pochopení významu sacharidů pro rostliny. Zároveň slouží k popsání relevantních fyzikálně-chemických vlastností biocharu, jako je jeho stabilita, vodní kapacita a retence živin. V praktické části byl proveden experiment navazující na předchozí výzkum z roku 2020, kdy byly rostliny cukrové řepy pěstovány v kontrolních podmínkách areálu Ústavu experimentální botaniky AV ČR a následně testovány v laboratořích České zemědělské univerzity v Praze. Tento experiment slouží jako pokračování a rozšíření informací získaných v rámci předchozí studie, která byla součástí mé bakalářské práce. Cílem této práce je detailněji zkoumat vliv biocharu na obsah živin a cukrů u cukrové řepy, s důrazem na nový pohled na problematiku.

V experimentu se zkoumala optimalizace dávky biocharu ve spojení s aplikací hnojiv pro maximalizaci produkce cukrové řepy za podmínek simulovaného sucha. Rostliny byly pěstovány v podmínkách skleníku v litrových nádobách s různými variantami, včetně kontroly bez ošetření, aplikace biocharu, hnojiv a jejich kombinace. Během experimentu byla monitorována půdní vlhkost a živiny, a po období sucha byly analyzovány fyziologické parametry rostlin.

Výsledky ukazují, že kombinace přídatku biocharu a hnojiv má významný vliv na retenci vody, což bylo prokázáno dvojnásobným až trojnásobným zvýšením objemového obsahu vody ve srovnání s kontrolní půdou. Dále se ukázalo že má významný vliv také na snížení vyplavování živin z hnojiv. Analýza pórové vody odhalila, že vyplavování živin z hnojiv do půdy se po přidání biocharu snížilo až o 86 % ve srovnání se samotným hnojem. Kombinovaný přídatek vedl k více než dvojnásobnému zvýšení výnosu listů a hlíz cukrové řepy ve srovnání s kontrolní skupinou, což naznačuje významný potenciál pro zvýšení produkce plodin

Dále bylo prokázáno, že použití biocharu mělo pozitivní dopad na výměnu plynů v listech rostlin během sucha, což naznačuje lepší fyziologické podmínky rostlin a potenciál pro zvýšení odolnosti vůči nepříznivým podmínkám. Kombinace biocharu a hnojiv také vedla k významnému zvýšení obsahu cukru v rostlinách o 2,4krát, což naznačuje nejen zvýšení produkce cukrové řepy, ale také možnost využití této kombinace pro zlepšení kvality plodin.

Celkově lze tedy konstatovat, že kombinace biocharu a hnojiv má potenciál pozitivně ovlivnit kvalitu půdy, zvýšit produkci plodin a zlepšit kvalitu rostlin. Tyto výsledky naznačují možné praktické využití této kombinace v polních podmínkách a potenciál pro zlepšení udržitelnosti zemědělského hospodaření.

Klíčová slova: biochar, obsah živin, obsah cukrů, výživa rostlin, nádobový experiment, cukrová řepa

Abstract

The thesis deals with the use of biochar in agricultural soils to increase organic matter content and water and nutrient retention capacity. The thesis focuses on the analysis of the effect of biochar on nutrient and sugar production, optimization of the biochar rate in combination with fertilizers for maximum crop yields and investigation of differences in nutrient uptake in the above ground and root parts of sugar beet. Due to its adsorption and cation exchange capacity, biochar becomes an efficient carrier of nutrients, contributing to improved soil quality and adaptation to climate change. Drought issues are increasingly threatening the yields of sugar beet and other water and nutrient demanding crops.

The theoretical part contains basic knowledge about plant nutrition, mineral nutrition and functions of individual elements, carbohydrates and biochar. This information is used to properly understand the functioning of plants, optimal nutrient uptake for plant growth and development, to achieve maximum yields and to understand the importance of carbohydrates for plants. It also serves to describe relevant physicochemical properties of the biochar such as its stability, water holding capacity and nutrient retention. In the practical part, an experiment was carried out following up on previous research from 2020, when sugar beet plants were grown under control conditions on the premises of the Institute of Experimental Botany of the CAS and subsequently tested in the laboratories of the Czech University of Agriculture in Prague. This experiment serves as a continuation and extension of the information obtained in the previous study, which was part of my bachelor thesis. The aim of this thesis is to investigate in more detail the effect of biochar on nutrient and sugar content in sugar beet, with an emphasis on a new perspective on the issue.

The experiment investigated the optimization of biochar rate in conjunction with fertilizer application to maximize sugar beet production under simulated drought conditions. Plants were grown under greenhouse conditions in litre containers with different treatments including no treatment control, biochar application, fertilizer application and their combination. Soil moisture and nutrients were monitored during the experiment, and plant physiological parameters were analyzed after the drought period.

The results show that the combination of biochar and fertilizer addition has a significant effect on water retention, as demonstrated by a two- to threefold increase in volumetric water content compared to the control soil. It was also shown to have a significant effect on reducing nutrient leaching from fertiliser. Pore water analysis revealed that nutrient leaching from fertiliser into the soil was reduced by up to 86% after the addition of biochar compared to manure alone. The combined addition led to more than a twofold increase in sugar beet leaf and tuber yield compared to the control group, indicating a significant potential for increasing crop production

Furthermore, it was shown that the use of biochar had a positive impact on gas exchange in plant leaves during drought, indicating improved plant physiological conditions and the potential for increased resistance to adverse conditions. The combination of biochar and fertiliser also led to a significant increase in plant sugar content by a factor of 2.4, indicating not only an increase in sugar beet production but also the potential to use this combination to improve crop quality.

Overall, the combination of biochar and fertiliser has the potential to positively influence soil quality, increase crop production and improve plant quality. These results indicate the possible practical application of this combination under field conditions and the potential for improving the sustainability of agricultural management.

Keywords: biochar, nutrient content, sugar content, plant nutrition, pot experiment, sugar beet

1	Úvod	1
2	Cíle práce	5
3	Literární rešerše	6
3.1	Výživa rostlin	6
3.1.1	Příjem živin	7
3.1.2	Vnější a vnitřní faktory příjmu.....	10
3.1.3	Zdroj živin v půdách	12
3.2	Minerální výživa rostlin	14
3.2.1	Makroživiny	15
3.2.2	Mikroživiny.....	27
3.2.3	Užitečné prvky	36
3.2.4	Ostatní (cizorodé) prvky	37
3.3	Sacharidy	40
3.3.1	Glukóza (Glc).....	43
3.3.2	Fruktóza (Fru)	44
3.3.3	Sacharóza	44
3.4	Biochar	45
3.4.1	Výroba biocharu a jeho druhy podle pyrolýzní teploty	47
3.4.2	Základní vlastnosti biocharu	50
3.4.3	Biochar a jeho užití v zemědělství	51
3.4.4	Dostupné živiny v biocharu	52
3.4.5	Negativní atributy biocharu.....	53
3.4.6	Využití půdních aditiv k úpravě půdních vlastností.....	54
4	Metodika	56
4.1	Charakteristika vybrané zemědělské plodiny.....	56
4.1.1	Cukrová řepa (<i>Beta vulgaris var. altissima</i>)	56

4.2	Půda a bioaditiva.....	58
4.3	Popis experimentu.....	59
4.3.1	Skleníkový experiment s cukrovou řepou.....	59
4.4	Skližeň rostlin	61
4.5	Chemická analýza rostlin	62
4.6	Chemická analýza půdy	62
4.7	Stanovení dostupných živin v půdě podle extrakční metody Mehlich 3	65
4.8	Stanovení obsahu sacharidů metodou HPLC	66
4.9	Zpracování dat.....	67
5	Výsledky	68
5.1	Parametry půdy	68
5.1.1	Změna půdní vlhkosti.....	68
5.1.2	Chemické složení vody v půdních pórech	69
5.2	Reakce rostlin na vodní stres a změny	71
5.2.1	Fyziologická odezva během období sucha.....	71
5.3	Parametry sklizně.....	72
5.3.1	Hmotnost biomasy	72
5.3.2	Elementární složení rostlin.....	73
5.3.3	Obsah cukru v hlízách.....	78
6	Diskuse	82
6.1	Reakce půdy na změny.....	82
6.2	Reakce cukrové řepy na vodní stres.....	84
6.3	Vztahy mezi parametry rostlin.....	87
7	Závěr.....	90
8	Přehled literatury a použitých zdrojů.....	91
9	Seznam obrázků, tabulek a grafů.....	112

9.1	Obrázky	112
9.2	Tabulky	113
9.3	Grafy	113
10	Seznam příloh	114
11	Přílohy	115

Přehled použitých zkratk a symbolů

CSS – Carbon Capture and Sequestration (zachytávání a ukládání oxidu uhličitého)

C – control (kontrolní vzorek půdy – čistá Regozem)

B – Biochar (biouhel)

M – Manure (hnůj)

MB – Biochar in combination with manure (biouhel v kombinaci s hnojem)

FDR – Senzory pro měření vlhkosti půdy

HPLC – Kapalinová chromatografie

ICP – Inductively Coupled Plasma (indukčně vázané plazma)

ICP – EOS – Atomová optická emisní spektrometrie

1 Úvod

Pěstování plodin a jejich výnosy jsou v posledních letech stále více negativně ovlivňovány klimatickými změnami, což představuje jeden z nejvážnějších problémů s možnými katastrofálními důsledky pro společnost, kterému musíme celosvětově čelit. Odhaduje se, že v důsledku změny klimatu došlo od roku 1982 k průměrnému snížení výnosů plodin zhruba o 70%, přičemž existuje jen malé množství zemědělských oblastí, které by nebyly změnou klimatu značně ovlivněny. Dopady klimatických změn se projevují prostřednictvím přímých, nepřímých a socioekonomických faktorů. Mezi přímé faktory patří například morfologické a fyziologické změny u rostlin. Ty jsou doprovázeny nepřímými faktory, jako je snížení produktivity a úrodnosti půdy, nedostatek vody pro zavlažování, zvýšený výskyt škůdců a chorob, extrémní změna teplot, sucho a povodně. Všechny tyto změny pak negativně ovlivňují socioekonomické faktory, jako je poptávka po potravinách, obchod a náklady související s produkcí, distribucí a prodejem potravin. Tato situace má významný dopad na zemědělství a obchodní prostředí, zejména v souvislosti s klesajícími výnosy plodin a rostoucími cenami potravin na trhu (Raza a kol., 2019).

Jedním z klíčových faktorů snižujících celosvětovou produkci zemědělských plodin je právě výše zmíněné sucho. To má zásadní vliv na obousměrné interakce mezi rostlinami a půdou (Ghaffari a kol., 2021). Nedostatek srážek a dlouhodobé sucho, které může trvat i několik let, narušují vzájemnou interakci mezi rostlinou a půdou, což vede ke snížení produktivity a úrodnosti půdy. Narušení interakce mezi půdou a rostlinami má důsledky i na celkovou biologickou rozmanitost a ekologickou rovnováhu ekosystémů. Sucho tak nepřímo přispívá ke komplexním změnám ovlivňujícím životní prostředí a ekosystémy jako celek (Gu a kol., 2019). Díky nedostatku vody v půdě dochází k narušení rostlinných fyziologických procesů, jako je fotosyntéza, transpirace a vstřebávání živin. V důsledku toho dochází k oslabení růstu a vývoje rostlin. Následkem oslabení růstu a vývoje rostlin pak dochází ke snížení výnosů plodin a narušení biologické rozmanitosti půdního prostředí. Dopady sucha ovlivňují také složení a aktivitu půdních organismů, které hrají důležitou roli v životnosti a úrodnosti půdy. Změny v půdních mikrobiálních populacích a aktivitě mikroorganismů mohou ovlivnit biochemické cykly a celkovou ekologickou stabilitu (Fahad a kol., 2017).

Rostliny svou činností ovlivňují nejen půdní prostředí, ale jsou ovlivňovány i změnami, které v půdě samy způsobují. Tento vzájemný vztah, při kterém rostliny ovlivňují složení půdy, a ta zpětně ovlivňuje následný růst stejného rostlinného druhu se nazývá plant-soil feedback (PSF). Dominantní druhy rostlin tak mohou měnit složení půdy ve svůj vlastní prospěch (Ehrenfeld a kol., 2005). Prostřednictvím kořenového systému ovlivňují fyzikální (struktura, hustota, propustnost, vlhkost, teplota), chemické (pH, obsah živin) a biologické (obsah živých organismů, úkryt, zdroj potravy) vlastnosti půdy. To následně ovlivňuje prosperitu a životaschopnost rostlinných společenstev (Van der Putten a kol., 2013).

Reakce mezi rostlinami a půdou lze rozdělit na pozitivní a negativní zpětnou vazbu. V případě pozitivní zpětné vazby dokážou rostliny vytvořit ideální půdní podmínky pro svůj růst a zlepšit tak svou kondici. To jim postupně umožňuje dosáhnout dominantního postavení na daném stanovišti. Naopak při negativní zpětné vazbě se může stav konkrétní rostliny zhoršovat a její dominance může být tak ztracena. Tím se může oslabit vliv rostliny na půdu a půda může vratným efektem ovlivnit rostliny. Negativní zpětná vazba může vést k nedostatku dostupných živin v půdě, což vytváří vhodnější podmínky pro ostatní druhy rostlin. Tato interakce mezi rostlinami a půdou tak nepříznivě ovlivňuje celkový stav životního prostředí (Ehrenfeld a kol., 2005).

Stres ze sucha ovlivňuje zejména výnos a kvalitu cukrové řepy (Toscano a kol., 2019). Výzkum Khaembaha a kolegů (2021) ukázal, že nedostatečná závlaha má negativní dopad na výnos cukrové řepy a obsah dusíku. Podobně studie Islama a kolegů (2020) prokázala, že po deseti dnech bez zavlažování se snížila produkce biomasy cukrové řepy a koncentrace pigmentu.

Aby se překonal vodní stres, je nezbytné zvýšit zavlažování. To se stává stále důležitějším prvkem moderního zemědělství pro udržení výnosů. Pro zemědělce to však znamená ekonomické a časové náklady, zejména pokud je vyžadováno dodatečné hnojení organickými a minerálními hnojivými (Chen a kol., 2019).

Přílišné zavlažování může způsobit zasolení půdy, zatímco nadměrné hnojení může dlouhodobě snížit kvalitu půdy, zejména v důsledku nadměrného vyplavování dusičnanů. Proto je velice důležité zkoumat metody, které by pomohly zadržovat vlhkost a živiny v půdě, aby se půdní prostředí dokázalo vhodně přizpůsobit měnícím se klimatickým podmínkám (Chen a kol., 2019).

Zlepšení schopnosti půdy zadržovat vlhkost lze dosáhnout pomocí aplikací organických doplňků, jako jsou biochar, hnůj, kompost a digestáty (organický materiál z anaerobního štěpení pro použití v zemědělství) (Chen a kol., 2019). Biochar je materiál bohatý na uhlík získaný tepelným zpracováním biomasy za podmínek se sníženým obsahem kyslíku (Kumar a kol., 2020). Vyrábí se z různých lignocelulózových materiálů, jako jsou rostlinné zbytky, chlévský hnůj, potravinářské odpady a kaly (Bolan a kol., 2021). Tyto materiály se přeměňují na biochar prostřednictvím pyrolýzy, hydrotermální karbonizace nebo zplyňování (Sun a kol., 2021).

Biochar je pórovitý materiál s alkalickým pH a vysokým obsahem uhlíku (Kumar a Bhattacharya, 2021). Tyto vlastnosti umožňují biocharu různé způsoby využití v půdě, jako je zvyšování zásob uhlíku, snížení vyplavování živin a kontaminantů (Jien a kol., 2021). Studie prokázaly, že biochar zlepšuje úrodnost půdy, podporuje zvýšenou mikrobiální aktivitu, růst rostlin a příjem živin (Rafael a kol., 2019). To je způsobeno modifikací půdních fyzikálních a chemických vlastností přidáním biocharu, jako je objemová hmotnost, pH, elektrická vodivost, kationtová výměnná kapacita, organický uhlík, dostupnost živin, vlhkost půdy a enzymová aktivita (Latini a kol., 2019).

Bylo zjištěno, že zlepšení jedné nebo více vlastností půdy má pozitivní dopad na výnosy pšenice a kukuřice (Abideen a kol., 2020; Rollon a kol., 2020). Nicméně byly zaznamenány i některé negativní dopady aplikace biocharu, jako je snížená dostupnost živin způsobená vysokou sorpční schopností biocharu (Zhao a kol., 2019). Například jedna studie, která porovnávala tři různé druhy biocharu, ukázala, že výsledné vlastnosti biocharu závisí na zdroji, ze kterého byl biochar vyroben. Biochar z borového dřeva nepřinesl žádné zlepšení růstu kukuřice a negativně ovlivnil dostupnost dusíku. Naopak biochar z kokosových slupek zlepšil růst kukuřice, ale snížil kvalitu hnojení, zatímco biochar z pomerančových výlisků byl schopen zlepšit růst kukuřice a efektivně regulovat dostupnost dusíku a fosforu (Gonzaga a kol., 2018).

Další studie ukázaly, že rok po aplikaci biocharu do půdy nebyl pozorován žádný významný efekt na růst ani příjem živin u žita (Reed a kol., 2017). Rovněž aplikace čtyř různých druhů biocharu ze statkového hnoje, drůbežního hnoje, dřevní štěpky a kuchyňského odpadu nevedla ke zlepšení kvality půdy, výnosům ani příjmu dusíku pšenicí, s výjimkou biocharu z drůbežního hnoje (Sadaf a kol., 2017). Z toho

vyplývá, že i když biochar obsahuje živiny, jejich dostupnost pro rostliny může být omezena jeho vysokou stabilitou (Galinato a kol., 2011).

Na rozdíl od biocharu obsahuje hnůj přirozeně vysoké množství labilních živin, které jsou rostlinám snadno dostupné. Aplikace hnoje do půdy může zvýšit její pórovitost a snížit objemovou hmotnost, což vede ke zvýšení obsahu přístupné vody a organické hmoty v půdě. Tato změna spolu s dodáním živin a zlepšením struktury půdy přispívá k zvýšení výnosů plodin (Wang a kol., 2017). Pro dosažení lepších výsledků při aplikaci na půdu lze biochar a hnůj také kombinovat. Kombinace těchto materiálů přináší lepší výsledky v podobě vyšší úrodnosti a kvality půdy než jejich samostatná aplikace. Tyto materiály vzájemně posilují své účinky a doplňují se, což vede k synergickým účinkům. Tato synergická interakce může následně zlepšit fyzikální, chemické nebo biologické vlastnosti půdy a přispět tak k větší účinnosti a produktivitě. V nedávné studii Banika a kolegů (2021) bylo zjištěno, že kombinace aplikace biocharu s hnojem může stabilizovat uvolňování fosforu a dusíku z hnoje, což vede ke snížení vyplavování živin. Tento výzkum naznačuje, že biochar může regulovat obsah živin v hnoji. Podobně, Adekiya a kolegové (2019) aplikovali biochar z tvrdého dřeva a drůbeží hnůj, ať už samostatně nebo v kombinaci a pozorovali významné interakce mezi biocharem a hnojem na zlepšení fyzikálních a chemických vlastností půdy, jako je objemová hmotnost, vlhkost půdy, pH, obsah organické hmoty a živin a na příjem živin rostlinami. Nakonec, Bohara a kolegové (2019) prokázali, že aplikace kombinace drůbeží podestýlky a biocharu na písčitohlinité půdě zlepšila schopnost žita odolávat suchu a stresu. I přestože má hnůj příznivé účinky na půdu, může obsahovat znečišťující látky, jako jsou kovy a metaloidy (Zhang a kol., 2012), které se mohou dostat do půdy po opakovaných úpravách. Studie ukázaly, že biochar může fixovat tyto potencionálně toxické prvky pocházející z aplikace jiných půdních doplňků, pokud jsou aplikovány společně (Chen a kol., 2019).

Cílem této diplomové práce bylo najít nejvhodnější kombinace úprav půdy z biocharu a hnoje, které by mohly vést ke snížení stresu suchem na výnos a kvalitu cukrové řepy. Konkrétně bylo předpokládáno, že kombinace biocharu a hnoje by mohla nejvíce zlepšit půdní vlhkost, regulovat únik živin z hnoje a udržet nebo zlepšit fyziologii a výnos cukrové řepy během vyvolaného půdního sucha.

2 Cíle práce

Cílem diplomové práce bylo sledovat a posoudit vliv biocharu na produkci živin a cukrů a zároveň ověřit a navrhnout optimální dávku vybraného biocharu v kombinaci s aplikací statkových hnojiv pro účely maximální produkce sledované plodiny. V rámci dlouhodobého testování aplikace biocharu do zemědělských půd byl založen nádobový experiment s cukrovou řepou v klimatizovaném skleníku v areálu Ústavu experimentální botaniky akademie věd ČR. Následně výzkum pokračoval v laboratorních podmínkách na České zemědělské univerzitě v Praze.

V práci byly stanoveny tyto cíle:

1. Posoudit, zda je obsah živin v nadzemní a podzemní biomase testované plodiny (cukrová řepa) ovlivněn různými typy substrátu (neošetřený substrát, substrát s přídavkem 2% a 5% biocharu, substrát s přídavkem 2% a 5% hnoje a v poslední řadě substrát ošetřený kombinací biocharu a statkového hnoje opět ve dvou odlišných dávkách 2% a 5% hmotnostně).
2. Vyhodnotit účinnost a kvalitu přídavku biocharu na obsah živin v nadzemní a podzemní biomase testované plodiny (cukrová řepa) a zároveň zhodnotit použití biocharu jakožto půdního aditiva pro zemědělské půdy.

3 Literární rešerše

3.1 Výživa rostlin

Nauka o výživě a hnojení rostlin má bohatou historii přesahující více než sto padesát let a je neodmyslitelnou součástí zemědělské praxe (Richter a Hlušek, 1994). Zabývá se procesem příjmu živin rostlinami a jejich následným využitím v rámci rostlinného organismu. Učí nás porozumět faktorům vnějšího prostředí, které ovlivňují výživu rostlin. Tato oblast studia také upozorňuje na genetické či získané vlastnosti semen rostlin a jejich význam z hlediska živinného zásobování a následného využití rostlinami. Dále definuje nutriční požadavky rostlin a způsoby, jak tyto potřeby naplnit pomocí hnojiv za účelem dosažení vysokých a kvalitních výnosů, které jsou cílem každého hospodářství (Ernest, 1917).

Pro svůj úspěšný růst a vývoj potřebují všechny rostliny nejen vnější růstové faktory jako je voda, světlo, vzduch a teplo, ale také další látky zvané živiny (Dolejší, 1982). Živiny jsou běžné chemické prvky, které však mají v organismu rostlin zásadní a nezastupitelnou roli. Látkové složení rostlinného těla je vskutku rozmanité. Velmi podstatnou složkou je voda, jejíž množství závisí nejen na druhu rostliny, ale také na vegetační fázi (stáří rostliny). Pokud rostlinu zbavíme veškeré vlhkosti sušením při teplotě 105 °C, získáme sušinu, jejíž obsah má zásadní vliv na výživnou hodnotu rostlin. Sušina se skládá převážně z organických látek, tedy sacharidů včetně cukrů a škrobů, a dále pak z tuků a bílkovin. Rostliny získávají své základní potřebné prvky z ovzduší, vody a půdy. Z ovzduší rostliny získávají potřebný uhlík (C), kyslík (O) a z části také síru (S), zatímco z přijaté vody pak získávají vodík (H). Všechny ostatní živiny, získává rostlina pomocí kořenového systému z půdy (Kalina, 2016).

Množství minerálních živin v půdě je relativně vysoké, ovšem mezi různými půdami se značně liší. Rostliny však přijímají jen malou část této zásoby, která v případě jednotlivých živin tvoří většinou jen pár desetin až 1 % z celkového obsahu v půdě (Jurčík, 1978). Tuto malou část minerálních živin představují především živiny rozpuštěné v půdním roztoku a vázané v půdních sorpčních komplexech. Část také představují živiny vázané v půdě ve sloučeninách, které jsou rozpustné v slabých kyselinách nebo zásadách (Richter a Hlušek, 1994).

Zbývajících 99 % minerálních živin v půdě je pak relativně pevně vázáno v minerální, organominerální a organické složce půdy a tvoří zásobu (rezervu) živin pro rostliny. Míra mobilizace této takzvané rezervy a její zpřístupnění rostlinám závisí především na pH prostředí, na velikosti, síle a pevnosti částic a procesu mineralizace. Mobilizace závisí také na intenzitě zvětrávání závislé na klimatických podmínkách a jejich případných změnách (Jurčík, 1978).

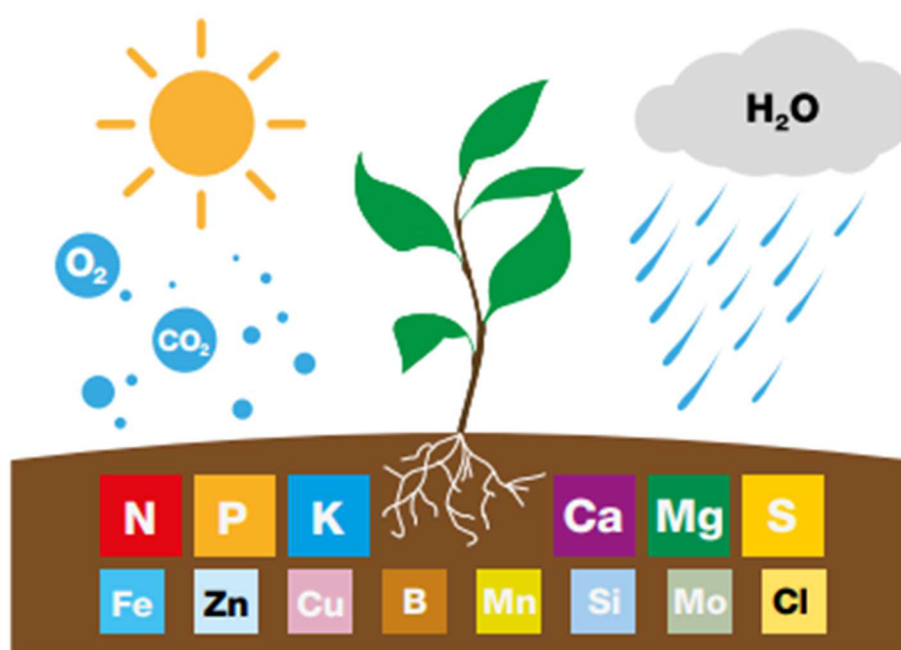
Jednotlivé živiny se v půdě vyskytují nejen v rozdílném množství, ale také v různých formách vzhledem k tomu, jak jsou pro rostliny přijatelné. Určení nedostatku konkrétního prvku v rostlinách je velmi obtížné, protože příznaky nedostatku jsou si natolik podobné, že je nelze spolehlivě určit ani na základě vizuálního posouzení (Kalina, 2005). Vztah mezi jednotlivými formami výživy není neměnný a lze jej speciálně zvolenými agrotechnickými zásahy, především hnojením, měnit ve prospěch rostlinných forem přijatelných pro rostliny (Jurčík, 1978).

3.1.1 Příjem živin

Znalost procesu přijímání živin je klíčem k úspěšnému růstu rostlin. Rostliny vyžadují správné množství živin pro optimální vývoj a vitalitu. Na stanovištích s bohatou zásobou živin se rostliny vyvíjejí daleko rychleji a lépe prosperují (Procházka a kol., 1998). Příjem živin je takový proces, při kterém rostlina přijímá živiny zejména z vnějšího prostředí (Kubát a kol., 2003). Hlavními zdroji živin pro rostliny jsou minerální látky, jednoduché výchozí sloučeniny a v poslední řadě také konečné iontové produkty. Po ukončení svého životního cyklu se tyto látky mohou stát základními stavebními prvky a mohou tak být znovu využity jako živiny pro další rostliny. Tento proces je důležitým prvkem v koloběhu života rostlin, kdy se odumřelý materiál proměňuje v složky buňky schopné další asimilace a dochází k tvorbě nové hmoty (Richter a Hlušek 1994).

Rostliny mohou absorbovat živiny prostřednictvím všech svých orgánů, včetně listů, stonků a květů (Kalina, 2005). Většina živin je absorbována rostlinami ve formě iontů skrz kořeny, pouze menší část je přijímána přes listy (Procházka a kol., 1998). Skrz listovou výživu, rostliny přijímají látky z ovzduší a prostřednictvím kořenové výživy, vstřebávají živiny z půdního roztoku (Kubát a kol., 2003). Pro zajištění optimální účinnosti každé živiny je důležité zajistit, aby se roztok dostal k co největší ploše rostliny a setrval tam co nejdéle (Kalina, 2005). Listová výživa umožňuje

roślinám přijímat převážně makrobiotické živiny (viz obrázek 1), jako je oxid uhličitý (CO_2), kyslík (O_2) a částečně i vodík (H_2). Živiny nejprve pronikají skrze kutikulu a dále jsou přijímány prostřednictvím listů, stonků nebo generativních orgánů ve formě molekul. Tímto způsobem mohou rostliny absorbovat také další látky, jako je dusík (N), fosfor (P), draslík (K), vápník (Ca), hořčík (Mg), železo (Fe) a mikrobiotické živiny, jako je měď (Cu), zinek (Zn), mangan (Mn) a bór (B), obvykle ve formě rozpustných solí. (Marschner a Marschner, 1995).



Obrázek 1. Příjem minerálních látek rostlinou (Čermák a kol., 2010)

Mimokořenová výživa však není schopna plně nahradit kořenovou výživu, ale je důležitá jako speciální opatření pro eliminaci nepříznivých podmínek, které mohou ovlivnit příjem živin kořeny v nepříznivých půdních podmínkách (např. nedostatek vláhy, špatné pH apod.), poškození kořenů, překonání kritických období růstu rostlin a prevenci možného poškození rostlin (např. mrazem). Mimokořenová výživa může být také využívána jako doplněk ke kořenové výživě, přičemž hlavní výhodou mimokořenové výživy je rychlost účinku a ekonomická efektivita, zejména v kombinaci s ochrannými přípravky pro rostliny (Kalina, 2005).

Kořenová absorpce živin u rostlin spočívá v příjmu půdních koloidů, které byly mineralizovány půdními mikroby a živočichy, prostřednictvím absorpčního povrchu kořenového systému. Tímto způsobem rostlina také přijímá většinu vody (H_2O) (Kubát a kol., 2003). Votrubová (2010) dále uvádí, že v půdním roztoku je vázáno pouze velmi malé množství živin z celkových zásob (méně než 0,2 %), většina živin, které jsou nezbytné pro život rostlin, se nachází v těžko rozpustných organických a anorganických sloučeninách a v organických zbytcích. Tyto zásoby tvoří rezervu živin, které se postupně dostávají do rostliny pomocí difuze iontů solí a vody.

Rostlinné buňky potřebují ke svému životu základní látky, které zahrnují nejen vodu a světlo, ale také živiny, které jsou nazývány elementárními prvky. Tyto prvky mohou být organické nebo anorganické (Kubát a kol., 2003). Organické sloučeniny obsahují uhlík (C), jako například oxid uhličitý (CO_2) z ovzduší, a jsou součástí živých organismů nebo jejich produkce. Naopak anorganické sloučeniny neobsahují uhlík, nejsou součástí živých organismů ani jimi nejsou produkovány. Tyto sloučeniny tvoří většinu půdního roztoku a označují se jako minerální látky (Votrubová, 2010). Mezi prvky, které jsou nezbytné pro strukturu a regulaci rostliny, patří například dusík (N) nebo draslík (K). Rychlost příjmu minerálních živin rostlinami je regulována obsahem iontů v rostlině a regulací recyklace iontů mezi nadzemními orgány a kořeny (Procházka a kol., 1998).

Objem rostlinné buňky je obvykle tvořen převážně z vody. V některých případech může voda tvořit až 90% z celkové hmotnosti rostliny. (Procházka a kol., 1998). Kořeny rostlin absorbují vodu a živiny z půdy pomocí kořenových vlásků. Během procesu transpirace dochází k odpařování vody z listů. Polarita molekul vody umožňuje vznik vodíkových vazeb, které následně přitahují další vodu z kořenů nahoru přes cévní systém xylému až do listů. Voda je pro rostliny nezbytná pro udržení buněčné struktury, metabolické funkce, přenos živin a samozřejmě také pro fotosyntézu (Votrubová, 2010).

Při příjmu živin se aktivně zapojují všechny mladé části kořenů, avšak největší význam má zóna kořenových vlásků, která může zvětšovat povrch kořenů až několikanásobně (Procházka a kol., 1998). Kořenové vlásky jsou klíčovými orgány pro příjem živin, které ovlivňují mnoho aspektů, spojených s kvalitou a efektivitou tohoto procesu (Drew, 1975). Životnost kořenových vlasů je obvykle omezena na 10 až 14 dnů. Díky postupnému nárůstu nových vlásků je umožněno neustálé propojení

s půdním prostředím (Procházka a kol., 1998). V některých případech však může prostředí ovlivnit růst kořenových vlásků a například zpomalit transport živin (Marschner a Marschner, 1995).

Proces transportu živin z půdy do kořenů může probíhat kontaktní výměnou nebo objemovým tokem a difuzí (Kubát a kol., 2003). Kontinuální oběh látek mezi pevnou fází půdy a půdním roztokem představuje hlavní zdroj živin pro rostlinu (Marschner a Marschner, 1995). Množství přijatých živin je ovlivněno různými faktory, včetně chemického potenciálu iontů, kapacity půdy vázat a uvolňovat ionty, celkového množství iontů v půdě, teploty a provzdušenosti. Provzdušenost hraje důležitou roli pro růst kořenových vlásků a efektivitu příjmu látek (Votrubová, 2010).

Rostliny se vyvíjejí s ohledem na rovnováhu mezi proporcemi listů, stonků, květů a kořenů. Tato rovnováha ovlivňuje schopnost rostliny získat vodu, živiny a uhlík podle potřeby prostředí, ve kterém roste. Každý orgán rostliny hraje specifickou roli a má svůj účel, a proto je důležité udržovat harmonický vývoj všech orgánů pro zajištění optimálního růstu a životaschopnosti rostliny v daném prostředí (Nilsen a Orcutt, 1996).

3.1.2 Vnější a vnitřní faktory příjmu

Faktory ovlivňující příjem živin rostliny lze rozdělit na vnitřní a vnější. Vnitřní faktory jsou geneticky předurčené a souvisejí s druhem rostliny. Charakteristickým znakem je příjmová kapacita daného druhu rostliny, která je určena velikostí kořenového systému a jeho rozložením v půdním prostoru. Bohatý kořenový systém má potenciál pro intenzivnější příjem živin a tím pádem zlepšuje zásobování rostlin potřebnými živinami (Kalina, 2005). Důležitou roli hrají také vlastnosti kořenů konkrétního druhu, které ovlivňují schopnost rostliny přijímat živiny, jako je fosfor (P), dusík (N) a draslík (K) (Kubát a kol., 2003). Nové studie naznačují, že novější odrůdy rostlin mají obvykle menší příjmovou kapacitu než starší odrůdy, ale zároveň mají lepší schopnost využít dostupné živiny efektivněji (Richter a Hlušek, 1994).

Vnější faktory mají významný vliv na příjem živin a jejich využití pro tvorbu výnosu a kvalitu produkce. Zahrnují půdní reakce, biologické procesy rostlin, sorpční vlastnosti půdy a klimatické vlivy jako teplota, sluneční záření, složení atmosféry a množství spadlých srážek (Pavlová, 2006). Půdní reakce a biologické procesy mohou

ovlivnit dostupnost živin v půdě. Půdní podmínky a vlastnosti mají vliv na množství jednotlivých iontů v půdním roztoku. To zahrnuje hodnotu pH, zrnitost, pórovitost a obsah organických látek v půdě (Kalina, 2005). Sorpční vlastnosti půdy pak mohou ovlivnit schopnost půdy vázat živiny a uvolňovat je pro rostliny, což umožňuje zásobování rostlin živinami i za nepříznivých podmínek (Aiken a kol., 1985).

Klimatické vlivy, jako je teplota, sluneční záření, složení atmosféry a množství srážek, mají také klíčový vliv na procesy příjmu živin rostlinami. Teplota ovlivňuje různé biologické procesy v rostlině (fotosyntézu, dýchání, transpiraci atd.), aktivitu enzymů a má vliv na příjem živin. U většiny prvků platí, že při teplotách pod 10°C se zhorší jejich příjem, nejvíce je teplotou ovlivněn příjem fosforu a nejlépe pak při nízkých teplotách prosperují vápník (Ca) a hořčík (Mg) (Procházka a kol., 1998). Vyšší teploty příznivě ovlivňují biologické procesy v půdě a zajišťují dostatečné uvolňování živin z půdní zásoby (Kalina, 2005).

Sluneční záření (doba záření, intenzita záření) může pozitivně ovlivnit příjem některých živin jako je dusík (N), síra (S), fosfor (P) a tvorbu cukrů, zatímco složení atmosféry může mít jak pozitivní, tak negativní dopad na schopnost rostlin přijímat živiny (Urban, 2013). Nejhorším atmosférickým jevem je spad tuhých částic, kdy dochází k přesycení půdy prvky, které mohou být pro půdu toxické jako je rtuť (Hg), olovo (Pb), nikl (Ni) a zinek (Zn) (Procházka a kol., 1998).

Srážky jsou důležitým zdrojem živin pro rostliny a mohou ovlivnit celkovou produktivitu rostlin. Například při dosažení dostatečné závlahy se zvyšuje obsah hořčíku (Mg), fosforu (P), draslíku (K) a bóru (B) v půdě (Richter a Hlušek, 1994). Naopak během sucha se zvyšuje příjem sodíku (Na) a vápníku (Ca) (Kalina, 2005).

Celkově lze tedy říci, že kombinace vnitřních a vnějších faktorů má zásadní vliv na příjem živin rostlinami a může ovlivnit celkovou produktivitu a zdraví rostlin. Je důležité tyto faktory zohlednit při pěstování rostlin, aby byl zajištěn optimální růst a vývoj rostlin a bylo dosaženo maximálního výnosu. Tato interakce mezi vnitřními a vnějšími faktory je klíčová pro efektivní využití živin a dosažení maximálního potenciálu rostlin v produkci plodů a udržitelnosti půdy. Optimální výživou u zemědělsky pěstovaných plodin můžeme pozitivně ovlivnit spotřebu vody, zvýšit produkci sušiny a zvýšit odolnost proti suchu (Richter a Škarpa, 2013).

3.1.3 Zdroj živin v půdách

Všechny rostliny, včetně zemědělských plodin, potřebují bohaté společenstvo půdních organismů, které jim pomáhají zabezpečovat živiny a vodu pro růst a vývoj. Organická část půdy, složená ze živé a neživé části, je klíčovým zdrojem živin pro rostliny. Tyto dvě části spolu kooperují a podílejí se na rozkladných a transformačních procesech, čímž vytvářejí souvislý a funkční systém půdních procesů (Šimek a kol., 2021).

Mezi nejvýznamnější živé organismy v půdě patří mikroedafon, který se dělí na fytoedafon a zooedafon. Fytoedafon tvoří mikroskopické organismy jako sinice, řasy, houby, bakterie a prvoky, kteří hrají klíčovou roli při rozkladu organických látek a transformaci živin. Zooedafon zahrnuje především heterotrofní prvoky, kteří získávají živiny konzumací organického materiálu jiných organismů (Krpeš, 2005).

Neživá složka půdy pak obsahuje primární organickou hmotu a humusové látky (humus) s rozdílnými funkcemi a uplatněním (Vrba a Huleš, 2007).

Primární organická hmota v půdě je tvořena zejména odumřelými částmi rostlin a mikroflórou. Kromě toho obsahuje různé druhy proteinů, polysacharidů, organické molekuly, lignin a další látky, které procházejí různými fázemi mineralizace nebo humifikace. Primární směs může dále integrovat s již humifikovanými produkty, jako jsou fulvové a huminové kyseliny a jejich soli (Jandák a kol., 2004).

Většina primární organické hmoty se mineralizuje, ale část zůstává v půdě a postupně se mění v humusové látky (Vrba a Huleš, 2007). Mineralizace produkuje vodu, oxid uhličitý a minerální živiny pro rostliny. Primární organická hmota je klíčovým zdrojem živin pro mikroflóru, podporuje aktivity prospěšných organismů v půdě a detoxikuje ji od škodlivých organismů a znečišťujících látek (Krpeš, 2005). Při umělém přidávání organických látek do půdy je nutné zohlednit klimatické podmínky, složení půdy a druh pěstovaných rostlin, aby nedocházelo k poškození půdy a zhoršení jejích vlastností (Kalinová a kol., 2007).

Humus je komplexem organických látek pocházejících ze zbytků rostlin, kořenů, živočichů a mikroorganismů, které jsou vázány na minerální látky v různých stádiích transformace (Vrba a Huleš, 2007). Humusové látky vznikají pomocí humifikace jednoduchých organických látek, což je proces, během kterého se zpracovává energie. Tento proces transformuje primární organickou hmotu do humusových látek, které jsou klíčové pro udržení půdního ekosystému a poskytují živiny pro rostliny (Černý a kol., 2019).

Část humusu, nazývaná živný humus, je postupně spotřebovávána procesem mineralizace. Tento živný humus je důležitým zdrojem živin pro půdní organismy a má vliv na výživu rostlin. Při transformaci půdními organismy a mineralizací se uvolňují živiny jako dusík (N), fosfor (P), síra (S) a stopové prvky ve formě, kterou rostliny mohou snadno vstřebat. Kromě toho se vytvářejí rostlinné hormony a antibiotika, které mohou přímo ovlivňovat rostliny. Tyto účinné látky pomáhají zvyšovat odolnost rostlin vůči chorobám a škůdcům a podporují zdravý růst a kvalitu rostlin (Kalina, 2005). Humus je produkt dlouhodobé transformace organické hmoty, která může trvat tisíce let, zatímco primární organické látky jsou velmi proměnlivou složkou půdy, která se může rychle měnit v závislosti na podmínkách půdy pro mineralizaci (Jandák a kol., 2004).

Minerální živiny rostliny získávají z půdotvorných minerálů a biomasy, která je doplňována hnojivy v zemědělských půdách. Činnost půdních organismů je klíčová pro koloběh živin a zabezpečení dostatečného množství živin pro rostliny. Například bakterie a houby zvyšují přístupnost živin pro rostliny a fixují vzdušný dusík (N₂), který je důležitým zdrojem dusíku (N) pro rostliny. Bez činnosti půdních organismů by se posklizňové zbytky hromadily a živiny pro rostliny by se rychle vyčerpaly. Význam půdních organismů pro rostliny a celý půdní ekosystém je nesmírně důležitý. Bez bohatého společenství mikroorganismů a jiných živých organismů by rostliny nemohly efektivně získávat potřebné živiny pro svůj růst a vývoj. Je tedy klíčové zachovat a podporovat biodiverzitu v půdě a využívat organické látky a hnojiva s rozvahou, aby se udržela půdní produktivita a stabilita ekosystému (Šimek a kol., 2021).

3.2 Minerální výživa rostlin

Příznivé účinky přidávání minerálních prvků do půdy na podporu růstu rostlin jsou v zemědělství známé již více než 2000 let. Zásadní průlom v této oblasti učinil Justos von Liebig (1803-1873), díky kterému se podařilo získat rozsáhlejší informace o významu minerálních prvků pro růst a vývoj rostlin. Marschner a Marschner (1995) dále uvádějí, že v posledních desetiletích došlo k významnému pokroku v našem chápání mechanismů příjmu živin a jejich funkcí v metabolismu rostlin, stejně jako k pokroku ve zvyšování výnosů plodin dodáváním minerálních živin prostřednictvím hnojiv.

Minerální živiny jsou nezbytné pro správný růst a vývoj rostlin a mají speciální funkci v metabolismu rostlin (Votrubová, 2010). Rostliny mají omezenou schopnost selektivně absorbovat minerální prvky, které potřebují pro svůj životní cyklus. Zároveň ale přijímají i minerální prvky, které nejsou pro jejich růst nezbytné a jsou pro ně dokonce potencionálně toxické. Minerální složení tudíž nelze použít k posouzení, zda je minerální prvek pro určitou rostlinu skutečně potřebný či nikoli (Marschner a Marschner, 1995). Arnon a Stout (1939) pak dále uvádějí, že má-li být prvek považován za významný, musí být splněna následující tři kritéria. Prvním kritériem je, že daná rostlina nesmí být schopna dokončit svůj životní cyklus bez konkrétního minerálního prvku. Dále nesmí být funkce prvku nahraditelná jiným minerálním prvkem a v poslední řadě se musí příslušný prvek přímo podílet na metabolismu rostlin nebo musí být přímo vyžadován k určitému metabolickému kroku.

V závislosti na tom, jak velké množství určité živiny rostlina potřebuje pro svůj růst, se tato živina nazývá makroživina či mikroživina (Hejnák a kol., 2007). Další možná klasifikace rozděluje živiny na kovy (železo, měď, zinek, mangan, molybden, nikl, hořčík, draslík, vápník) a nekovy (dusík, fosfor, síra, chlor, bor) na základě jejich fyzikálně-chemických vlastností. Minerální živiny mají různé funkce a mohou tak sloužit jako složky organických struktur, aktivátory enzymatických reakcí, volné nosiče náboje a regulátory osmotického tlaku (Šetlík a kol., 2004).

3.2.1 Makroživiny

Makroživiny řadíme mezi ty prvky, které rostliny potřebují v relativně značném množství pro svůj zdárný růst a vývoj. V minerální výživě rostlin mají nenahraditelnou roli, jako základní stavební jednotky všech hlavních látek, z nichž je tělo rostlin postaveno, jako jsou koenzymy, nukleové kyseliny, hormony, dále pak proteiny, enzymy, lipidy, vitamíny či sacharidy, bez kterých by rostliny nemohly dlouhodobě existovat. Rostliny odčerpávají zhruba až tisíckrát větší množství těchto prvků ve srovnání s mikroživinami (Richter a Hlušek, 1994). Přestože jsou v půdě přítomny, jak v organické, tak anorganické formě, rostliny je mohou přijímat pouze ve formě anorganické (Hlušek a kol., 2015). Jejich absence způsobuje nedostatek rostlinných živin, což následně vyvolává oslabení metabolismu a funkce rostlin (Richter a Hlušek, 1994).

Pokud mají rostliny nedostatek makroživin, může dojít k zpomalení jejich růstu, slábne také odolnost vůči suchu a chladu a zvyšuje se náchylnost k chorobám. V extrémních případech může dokonce dojít k úhynu rostliny (Hlušek a kol., 2015). Mezi makroživiny řadíme především uhlík (C), dusík (N), vodík (H), kyslík (O), fosfor (P), draslík (K), vápník (Ca), hořčík (Mg) a v poslední řadě také síru (S) (viz tabulka 1). Kromě těchto prvků obsahují také organické sloučeniny a ionty vápníku (Ca^{2+}), hořčíku (Mg^{2+}) a draslíku (K^+). Každá makroživina i molekulový iont plní v rostlině svou specifickou úlohu. Ionty vápníku mají regulační funkci a svazují polysacharidové řetězce pektinů. Ionty hořčíku plní funkci aktivátorů velkého množství enzymů a kompenzují pohyby vodíkových kationtů (H^+) mezi jednotlivými buněčnými částmi. Ionty draslíku pak slouží jako významné regulátory osmotického tlaku uvnitř buněk (Šetlík a kol., 2004).

Tabulka 1. Průměrné hodnoty obsahu jednotlivých prvků makroživin v sušině těl rostlin (Šetlík a kol., 2004)

Prvek	Atomová hmotnost	Obsah v sušině		Poměrný počet atomů
		$\mu\text{mol.g}^{-1}$	ppm nebo %	
makroživiny			%	
síra	32,07	30	0,1	$30,0 \times 10^3$
fosfor	30,98	60	0,2	$60,0 \times 10^3$
hořčík	24,32	80	0,2	$80,0 \times 10^3$
vápník	40,08	125	0,5	$125,0 \times 10^3$
draslík	39,10	250	1,0	$250,0 \times 10^3$
dusík	14,01	1 000	1,5	$1,0 \times 10^6$
kyslík	16,00	30 000	45	$30,0 \times 10^6$
uhlík	12,01	40 000	45	$40,0 \times 10^6$
vodík	1,01	60 000	6	$60,0 \times 10^6$

- **Dusík** (N)

Dusík má ve výživě rostlin velmi významné postavení, jelikož je součástí základních organických sloučenin, jako jsou bílkoviny a nukleové kyseliny, které podmiňují existenci života. Rovněž je jednou ze základních složek chlorofylu a zaujímá čtvrté místo v pořadí podle množství mezi biogenními prvky (Hejnák a kol., 2007). Obvykle všechny rostliny obsahují uhlík, vodík, kyslík, dusík a další prvky v tomto pořadí. Tato skutečnost naznačuje, že dusík je nezbytným prvkem pro růst rostlin a je potřebný ve velkém množství. Dusík je po uhlíku druhým nejdůležitějším prvkem a hraje zásadní roli v metabolismu rostlin jako součást proteinů, nukleových kyselin, chlorofylu, rostlinných hormonů (fytohormony), koenzymů a sekundárních metabolitů (Hawkesford a kol., 2012). Jeho význam spočívá v zajištění úspěšného růstu a vývoje rostlin, kdy zároveň tak výrazně zvyšuje jejich celkový výnos.

Dusík je v půdě vázán na aromatická jádra huminových a fulvových kyselin a huminů, což zajišťuje jeho stabilitu a obtížnou rozložitelnost mikroorganismy. Rostlinám je tak dusík k dispozici pro jejich živný metabolismus, což má zásadní vliv na dostupnost tohoto prvku pro rostliny. Toto spojení s organickými sloučeninami také přispívá k udržení relativně konstantního obsahu celkového dusíku v půdě, protože jsou tyto sloučeniny chemicky a mikrobiologicky obtížně rozložitelné. Tímto způsobem je dusík v půdě stabilizován a udržován v rovnováze pro potřeby růstu rostlin (Richter a Hlušek, 1994).

Rostliny přijímají dusík ve formách NO_3^- (dusičnan) a NH_4^+ (amonium) (Leghari a kol., 2016). V kořenech a výhoncích je dusík následně přeměňován na aminokyseliny a ve formě dusičnanů nebo aminokyselin přenesen do dalších částí rostlinného těla, jako jsou listy a květy (Hawkesford a kol. 2023). Okamžitě po přijetí nitrátů kořeny začíná základní kontrola správného zpracovávání dusíku. Příjem dusičnanů kořeny rostlin a jejich následná redukce a vstřebávání jsou hlavními způsoby přeměny anorganického dusíku na dusík organický. Rostliny mají vyvinuté regulační mechanismy, které jim umožňují upravovat příjem dusíku podle svých vlastních potřeb (Procházka a kol., 1998).

Hodnota pH půdního roztoku má zásadní vliv na příjem dusíku z půdního prostředí. Když se pH zvýší z neutrální na zásaditou reakci, absorpce amoniakálních iontů se prudce zvýší, zatímco příjem NO_3^- klesá. Obecně se má za to, že kyselost půdy je pro růst rostlin mnohem toxičtější než zásaditá půdní reakce, a to z důvodu toho, že nadměrně kyselé prostředí může brzdit látkový metabolismus a snižovat příjem živin (Hejnák a kol., 2007).

Nedostatek dusíku omezuje růst rostlin a může dokonce způsobit úplné zastavení růstu kořenů. Důsledkem může být menší velikost listů a nižší produkce plodů. Listy jsou zpočátku světle zelené, později se objevují žlutozelené skvrny. Rostlina není optimálně vyživena a starší listy tak předčasně opadávají. Při silném nedostatku dusíku může později zežloutnou celá rostlina (Kalina, 2005).

Naopak přebytek dusíku se projevuje především v bujném růstu rostlin. Listy mají daleko větší asimilační plochu, postupně se objevují vodnaté skvrny a mají tmavě zelenou až namodralou barvu. Spodní listy obvykle žloutnou kvůli nedostatečnému přísunu světla (Richter a Hlušek, 1994). Listová tkáň je řídká a dřevnatá část stonku je špatně vyzrálá. Vysoký obsah dusičnanů často způsobuje zvýšenou náchylnost rostlin

k různým chorobám a škůdcům, prodlužuje jejich vegetační dobu, což následně může vést k předčasnému úhynu rostlin (Kalina, 2005).

Cukrová řepa a dusík: cukrová řepa je rostlina s vysokými nároky na živiny, zejména na dusík. Bez dusíku nelze dosáhnout optimálních výnosů cukrovky (Bittner, 2012). Pro dosažení maximálních výnosů cukru potřebuje rostlina přibližně 230 kg.ha⁻¹ dusíku, který přijímá většinou v nitrátové formě. Nitráty jsou rychle transportovány do listů, kde se nachází většina aktivity nitrátoreduktázy. Nadměrné hnojení dusíkem může vést ke snížení obsahu cukru, a dokonce i k nižším výnosům cukrové řepy. Nedostatek dusíku se projevuje zesvětlením listů, malými listy s tenkými řapíky a rychlým stárnutím vnějších listů (viz obrázek 2). Nadbytek dusíku pak způsobuje temně zelenou barvu listů a zvlnění listových čepelí (Pulkrábek a kol., 2007).



Obrázek 2. Symptomy nedostatku dusíku u cukrové řepy (Bittner, 2012)

- **Fosfor (P)**

Fosfor je důležitou živinou potřebnou pro správný růst rostlin a jeho příjem z půdy je ovlivněn různými faktory, jako je světlo, teplota a obsah kyslíku v půdě (Vaněk a kol., 2016). Rostliny přijímají fosfor ve formě anionů H₂PO₄⁻ (Dihydrogenfosforečnan) a HPO₄²⁻ (Hydrogenfosforečnan) a jeho příjem je vzhledem ke špatné rozpustnosti v půdě relativně nízký (Hejnák a kol., 2007). V rostlinách je přítomen ve formě organických i anorganických sloučenin a hraje důležitou roli v procesech, jako je fotosyntéza, transport cukrů, stabilizace DNA a RNA a udržování stabilního pH v organismu (Pavlová, 2006).

Fosfor je také klíčovým prvkem, který se nachází v nukleových kyselinách, sloučeninách ATP a ADP, fosfolipidech, sacharidech a bílkovinách, což dále zdůrazňuje jeho ústřední roli v buněčných procesech rostlin (Procházka a kol., 1998). Rostliny přijímají fosfor ze zásob v raných fázích růstu z fyтину v semenech nebo ze snadno dostupných forem fosforu v půdě, aby zajistily jeho optimální transport do všech částí rostliny (Richter a Škarpa, 2013).

Nedostatek fosforu se projevuje již v raných fázích vývoje. Rostliny trpí nedostatkem živin, což má za následek jejich zpomalený růst, slabost a zakrnělost (Vaněk a kol., 2016). Stonky rostlin jsou velmi křehké a mají málo postranních výhonků. Starší listy vykazují známky nedostatku fosforu prostřednictvím změny zbarvení. Mají modrozelené nebo šedozelené až načervenalé zbarvení a předčasně opadávají. Rostliny jsou náchylnější k různým chorobám, zpomaluje se proces opylení a dozrávání plodů a vývoj kořenového systému zaostává. Vzhledem k tomu dochází také ke snížené odolnosti rostlin vůči mrazu (Kalina, 2005).

Optimální obsah fosforu v nadzemních částech rostlin se obvykle pohybuje od 0,1 do 0,5 % v poměru k sušině rostliny. Pokud tato hodnota klesne pod 0,1 %, dochází k nedostatku této živiny (Hejnák a kol., 2007). S nadbytkem fosforu se setkáváme velmi výjimečně. Avšak pokud k takovému stavu dojde, projevuje se nedostatkem železa či zinku v rostlině, jejichž příjem může nadbytečný obsah fosforu blokovat (Kalina, 2005).

Cukrová řepa a fosfor: Fosfor je esenciálním prvkem pro cukrovou řepu, který se přijímá ve formě ortofosfátu a hraje klíčovou roli v biochemické fosforylaci, což je základní mechanismus přenosu energie v rostlině. Rostliny přijímají fosfor rovnoměrně až do srpna, a i v září, kdy je stále potřeba energie pro tvorbu a transport sacharózy (Pulkrábek a kol., 2007). Zejména v raných fázích vývoje je cukrovka zvláště citlivá na dostupnost fosforu v půdě (Bittner, 2012). Pro účinné doplnění fosforu se někdy doporučuje aplikace fosforečného hnojiva postřikem na listy. Příznaky nedostatku fosforu se projevují temně zelenou barvou listů, zpomalením růstu, načervenalým zbarvením starších listů, vztyčenými řapíky a výskytem nekrózy s hnědou síťovitou kresbou na čepelích (viz obrázek 3). Na kořenech může být pozorována vousatost (Pulkrábek a kol., 2007).



Obrázek 3. Symptomy nedostatku fosforu u cukrové řepy (Bittner, 2012)

- **Draslík (K)**

Draslík je rostlinami efektivně přijímán ve formě monovalentního kationu K^+ (iontu s jedním pozitivním nábojem) a je velmi rychle transportován přes membrány (Hlušek a kol., 2002). V rostlinách se pohybuje skrz různá pletiva, konkrétně přes apoplast (mezibuněčný prostor, kde se látky pohybují kolem buněčných stěn), symplast (prostor uvnitř buněk, kde se látky volně pohybují skrz plazmatisk), xylém (pletivo pro transport vody a minerálních látek) a floém (pletivo pro transport organických látek z místa fotosyntézy). Nejvyšší koncentrace draslíku se nachází uvnitř cytoplazmy, kde plní důležité funkce související s regulací vodního hospodaření a zvyšováním odolnosti rostlin vůči nízkým teplotám (Hejtnák a kol., 2007). Draslík je důležitým osmotickým činidlem v rostlinách a hraje zásadní roli při otevírání průduchů. Podílí se na růstu buněk a pomáhá udržovat vnitrobuněčnou iontovou rovnováhu a elektroneutralitu (Procházka a kol., 1998).

Spolupracuje s více než 60 enzymy a má významný podíl na tvorbě cukrů, škrobu, bílkovin a na zvyšování cukernatosti plodů. Draslík je klíčovým prvkem pro biosyntézu chlorofylu a vitamínů a zajišťuje efektivnější využití železa při tvorbě chlorofylu (Vaněk a kol., 2016). Podobně důležitou úlohu hraje i ve fotosyntéze, kde reguluje syntézu bílkovin, zejména enzym Rubisco, a je klíčový pro správné fungování procesů fotosyntézy a dýchání rostlin (Procházka a kol., 1998).

Optimální hladiny draslíku v sušině rostlin přesahují 1 %, a v některých případech mohou dosahovat až 5 %, v závislosti na konkrétní části rostliny a fázi růstu. S postupujícím stárnutím dané části rostliny se obsah draslíku v sušině snižuje. Příznaky nedostatku draslíku jsou obvykle viditelné u rostlin s obsahem pod 1 % (Hejnák a kol., 2007). Symptomy nedostatku draslíku se projevují suchými okraji spodních listů, objevuje se takzvaná okrajová spála a listové pletivo začíná odumírat, což může vést k vadnutí a předčasnému opadu listů. Tyto symptomy jsou podobné u většiny rostlin. Změna barvy a časně opadávání listů jsou podobné normálním změnám na konci vegetačního období. Zřejmým příznakem nedostatku draslíku na konci vegetačního období, zejména v létě u rostlin s velkými a širšími listy, je časně vadnutí, které souvisí s nedostatečným zásobováním rostlin vodou (Kalina, 2005).

V důsledku nadbytečného množství draslíku v půdě může dojít k negativnímu ovlivnění výnosu plodin. Nadměrné množství tohoto živného prvku vede k narušení rovnováhy živin v půdě a ovlivňuje schopnost rostlin absorbovat další důležité živiny (Braun a Vanek., 1985). U rostlin se obvykle projevuje omezeným vstřebáváním hořčíku a vápníku, což způsobuje příznaky nedostatku těchto dvou živin. Používání draselných hnojiv může vést k nepříznivému působení doprovodných chloridových iontů. U rostlin citlivých na chlor (např. plodová zelenina, cibuloviny, brambory atd.) může dojít k poškození a zhoršení kvality, pokud nejsou dodrženy správné zásady použití hnojiv na bázi síranů nebo dostatečně dlouhý interval mezi aplikací hnojiv a růstem rostlin (Kalina, 2005).

Cukrová řepa a draslík: nedostatek draslíku se u cukrové řepy projevuje zakrsnutím a žloutnutím listů, které postupně usychají a od okrajů se tvoří nekrózy (viz. obrázek 4). Tím dochází ke snížení fotosyntézy a obsahu cukru v bulvách (Bittner, 2012). Cukrová řepa přijímá draslík po celé vegetační období, přičemž se hromadí především v listech, ale také v kořenech. Nedostatek draslíku v půdě může negativně ovlivnit cukernatost, a to bez ohledu na výnos. Naopak nadměrné hnojení dusíkem způsobuje nadbytečné hromadění draslíku v hlízách, což zvyšuje obsah popela ve šťávě a cukru v melase (Čermák a kol., 2010).



Obrázek 4. Symptomy nedostatku draslíku u cukrové řepy (Čermák a kol., 2010)

- **Vápník** (Ca)

V rostlinách se vápník nachází v různých formách, jako jsou ionty, uhličitany, fosforečnany a vápník vázaný na kyseliny (Hejnák a kol., 2007). Transport vápníku v rostlinách je velmi omezený. Aby rostliny průběžně přijímaly potřebný vápník, je důležité jim zajistit pravidelné zásoby z vnějšího prostředí po celé vegetační období (Jursík, 2002).

Nejvíce vápníku se vyskytuje v buněčné stěně, kde spolu s pektiny (složitými polysacharidy) tvoří gelovou strukturu (matrici) (Procházka a kol., 1998). Vápník je klíčovým prvkem, který posiluje rostlinná pletiva a hraje zásadní roli při tvorbě buněčných stěn rostlin, buněčných membrán a protoplastů. Funguje jako hlavní regulátor enzymatické aktivity v rostlinách a také pomáhá neutralizovat nadbytečné organické karboxylové kyseliny (Braun a Vanek., 1985). Má také vliv na regulaci pH půdy, zlepšuje celkový výsledný stav jejích fyzikálních vlastností (Hronský, 2015) a významnou měrou se podílí na přenosu signálu v rostlinách (Procházka a kol., 1998).

Příjem vápníku rostlinou závisí na různých faktorech, jako je intenzita osvětlení, vlhkost půdy a teplota. K dosažení správné absorpce vápníku jsou potřebné optimální podmínky, které pomáhají rostlině účinně vstřebávat vápník z prostředí. Při nedostatečné půdní vlhkosti je přijímán v poměrně vysokých koncentracích (Richter a Škarpa, 2013). Příjem vápníku je složitý, přestože snadno proniká z půdy do prostoru

kořenových buněk, jeho aktivní transport přes membrány je omezený (Hejnák a kol., 2007). Požadavky na příjem se mohou lišit v závislosti na konkrétním druhu rostliny a jsou také ovlivněny tolerancí druhu k pH půdy (Kalinová a kol., 2007).

V případě nedostatku vápníku je velmi důležité rozeznávat, zda se jedná o nedostatek v těle rostlin či o nedostatek vápníku v půdě. Nedostatek v půdě může vést k okyselování půd, což následně vyvolá řadu příčin, které mohou negativně ovlivnit růst a zdravý vývoj rostlin (Kalina, 2005). Rostliny nedostatek projevují skrze slabý a pomalý růst kořenových vlásků. Kořenové vlásky se rychle rozkládají a vytvářejí slizovitý povlak. Příznaky se objevují rychleji na kořenech než na nadzemních částech rostliny, později tak může dojít k postupnému blednutí a odumírání listů (Kubát a kol., 2003). Nedostatek vápníku často souvisí také s nedostatečnou závlahou nebo nadměrným přidáváním dusíku a draslíku do půdy, což způsobuje zhoršený transport vápníku v rostlinném těle.

Při relativním nedostatku vápníku, tak může dojít k nekrotickým pohlíž špiček plodů. Ačkoli jeho nedostatek v rostlinách málokdy souvisí s nedostatečnou zásobou vápníku v půdě, s výjimkou vysoce kyselých půd, není obvykle možné vápník doplnit pouhým přidáním půdní zásoby. Pro zamezení nedostatku vápníku se doporučuje aplikace chloridu vápenatého (CaCl_2) na listy rostlin, který se běžně používá v zemědělství jako listové hnojivo (Kalina, 2005).

Při nadbytku vápníku se negativní účinky na růstové procesy rostlin obvykle neprojevují nebo jsou zcela minimální. Je však prokázáno, že příliš vysoký obsah vápníku v půdě nebo nadměrné používání vápenatých hnojiv může způsobit přehnojení rostlin. V důsledku toho může dojít k řadě škod, které se projevují potlačeným příjmem hořčíku, draslíku a zejména některých mikroživin, a to převážně železa, manganu a boru (Kalina, 2005). Rostliny pak mohou trpět žloutenkou (chlorózou), při které se mění barva listů, nebo hnilobou, která postihuje různé části rostlin (Košťál, 1960).

Správná hladina vápníku v rostlinách by se měla pohybovat mezi 0,5 až 1% sušiny, v některých případech může dosahovat až 3 %. Pokud je hladina vápníku nižší než 0,2 %, hovoříme o nedostatku tohoto prvku (Hejnák a kol., 2007).

Cukrová řepa a vápník: vápník je pro cukrovou řepu důležitý zejména pro zdravé zelené olistění. Nedostatek vápníku se u cukrové řepy projevuje převážně u mladých listů, kdy vykazují deformace, jako kroucení. Čepele mladých listů jsou lehce vybledlé se žlutými okraji. Při silném nedostatku vápníku může dojít k zhoršení kvality a výnosů bulev (Hřivna a kol., 2003).

- **Hořčík** (Mg)

Úloha hořčíku v rostlinách je velmi důležitá v souvislosti s fotosyntézou. Kromě toho, že se podílí na tvorbě grana struktur a světlosběrných pigmentů v chloroplastech, kde se nachází až 20 % veškerého hořčíku, je také klíčovým prvkem chlorofylu (Procházka a kol., 1998). Při fotosyntéze hořčík pohlcuje energii ze slunečního záření, kterou následně využívá k syntéze sacharidů z oxidu uhličitého (CO₂) a vody (H₂O). Hořčík podporuje syntézu bílkovin a je zásadním činitelem při tvorbě aminokyselin. Kromě toho pozitivně ovlivňuje průběh asimilace živin, látkové výměny a rychlost enzymových reakcí (Kraus a kol., 2010). Rostliny přijímají hořčík ve formě kationtu Mg²⁺ (Vaněk a kol., 2016) a potřebují jej nepřetržitě po celou dobu svého života (Křepeš, 2005).

Nedostatek hořčíku se projevuje částečnou světle zelenou barvou listů. Tato takzvaná fyziologická žloutenka se objevuje nejprve na nejstarších spodních listech rostliny (Kalina, 2005). V listech dochází k poklesu obsahu fotosyntetických aktivních pigmentů, konkrétně chlorofylu a karotenoidů (Vaněk a kol., 2016). Mezi žilkami čepele se vedle tmavě zelených skvrn objevují žluté skvrny a chlorofyl se začne koncentrovat zejména do střední oblasti okolo žilek listů (Kalina, 2005). Listy jsou následně velmi křehké, drolí se a začínají brzy opadávat (Procházka a kol., 1998). V důsledku toho rostliny zpomalují svůj růst a kvetou opožděně (Kalina, 2005).

S nadbytkem hořčíku se setkáme zcela výjimečně. V případě že tento stav přeci jen nastane a v rostlinách se tento prvek začne objevovat ve vysokých koncentracích je pro rostlinu toxický a začne negativně ovlivňovat především kořeny (Kraus, 2012). Nicméně nadbytek hořčíku je spíše spojován s nedostatkem jiných důležitých prvků, a to s nedostatkem vápníku, železa, a také draslíku. Následně se vlivem deficitu začnou objevovat negativní následky spojené s nedostatkem těchto konkrétních živin (Kalina, 2005).

Vzhledem k tomu, že se hořčík v rostlině nepohybuje příliš snadno, jako jiné živiny je důležité zajistit jeho dostatečný přísun prostřednictvím hnojení kořenů nebo listů (Pavloušek, 2011). Hořčík je v rostlinách transportován především xylémem, který je zodpovědný za distribuci minerálních látek a vody z kořenového systému do celého těla rostliny. Naopak, transport hořčíku přes floém, který rozvádí organické živiny, jako je například sacharóza, je výrazně pomalejší (Vaněk a kol., 2016). Doporučené množství hořčíku na hektar půdy se obvykle pohybuje mezi 20 až 30 kg, přičemž se nejčastěji používá síran hořečnatý. Pro zvýšení obsahu makroprvků v rostlině prostřednictvím listové výživy je vhodné používat hnojivý roztok o koncentraci 2 % (Pavloušek, 2011). Optimální koncentrace hořčíku v sušině by se měla pohybovat okolo 0,5 až 0,6 %, pokles pod 0,2 % je již známkou deficitu (Hejnák a kol., 2007).

Cukrová řepa a hořčík: Nedostatek hořčíku brání tvorbě chlorofylu, snižuje aktivitu enzymů a fosforylační procesy v rostlině spojené s transportem cukrů z listů do bulv. Nedostatek hořčíku může snížit výnos cukrové řepy a cukernatost bulv (Čermák a kol., 2010). Rostliny s nedostatkem hořčíku mají žloutnoucí listy mezi listovou žilnatinou (viz obrázek 5), které postupně odumírají, často zůstává zelená pouze nervatura (Bittner, 2012). Tento nedostatek je často doprovázen purpurovým zabarvením, podobně jako u nedostatku fosforu. Na půdách s nízkým obsahem hořčíku je vhodné doplnit výživu rostlin hnojivy s vysokým obsahem hořčíku (Čermák a kol., 2010).



Obrázek 5. Symptomy nedostatku hořčíku u cukrové řepy (Bittner, 2012)

- **Síra (S)**

Síra je důležitým prvkem potřebným pro správný vývoj živých organismů a sehrává klíčovou úlohu v metabolických procesech a růstu rostlin. Rostliny jí získávají především z půdy ve formě síranového anionu SO_4^{2-} (Procházka a kol., 1998). Zásobování půdy sírou je nezbytné, protože organismus si tento prvek nedokáže sám syntetizovat. Přispívá k tvorbě a správnému fungování různých aminokyselin, enzymů, peptidů, bílkovin a vitamínů v organismech (Vaněk a kol., 2016).

Nedostatek síry se převážně projevuje omezenou schopností syntetizovat bílkoviny a další látky včetně enzymů (Hlušek a kol., 2002). Prvním viditelným projevem nedostatku je žloutnutí listů, které začíná na nejmladších listech a s přetrvávajícím nedostatkem se přesouvá také na starší spodní listy. Mladé listy jsou zpočátku světle zelené a později zcela žloutnou. V důsledku nedostatku síry je omezen také jejich růst do šířky, vznikají tak úzké a podlouhlé listy. Jejich vzhled tak působí poměrně strnule a jednotvárně. Velmi vysoký obsah síry potřebuje zejména košťálová zelenina (např. cibule, zelí, hrách a česnek), která vyžaduje podobné množství síry jako fosforu (Kalina, 2005). Množství síry v sušině rostlin se obvykle pohybuje v rozmezí 0,2 až 0,5 % (Hejnák a kol., 2007).

Cukrová řepa a síra: nedostatek síry omezuje syntézu bílkovin a enzymatické reakce spojené s metabolismem dusíkatých látek. Snížená fotosyntéza způsobuje žloutnutí nejmladších listů (viz obrázek 6), což má za následek nižší tvorbu cukru a negativní vliv na výnos a kvalitu bulev. Při nedostatku síry se zvyšuje obsah alfa-aminodusíku v bulvách a nitrátů. Tento stav následně zvyšuje obsah aminokyselin, což snižuje výtěžnost bílého cukru (Čermák a kol., 2010).



Obrázek 6. Symptomy nedostatku síry u cukrové řepy (Čermák a kol., 2010)

3.2.2 Mikroživiny

Mikroživiny naopak řadíme mezi prvky, které jsou potřebné pro růst a vývoj rostlin v daleko menší míře, než jak tomu bylo v případě makroživin. Do skupiny mikroživin řadíme zejména těžké kovy, které jsou nedílnou součástí prostetických skupin enzymů, které mají katalytickou úlohu v rostlinách. Mikroživiny ovlivňují fyziologické procesy rostlin a podporují tvorbu chlorofylu. Většina z těchto prvků zvyšuje absorpci důležitých makroživin (dusík, fosfor, vápník, hořčík a síra), podporuje zdravý růst a prodlužuje celkovou životnost rostliny (Richter a Hlušek, 1994). Díky vyváženému příjmu mikroživin rostliny lépe rostou, mají více energie k tvorbě květenství a plodů a jsou také odolnější vůči nepříznivým podmínkám, jako je mráz, škůdci a časté choroby. Mezi klíčové mikroživiny (viz tabulka 2) pro rostliny patří železo (Fe), mangan (Mn), zinek (Zn), měď (Cu), bór (B), molybden (Mo), kobalt (Co) a v některých případech také chlór (Cl) (Šetlík a kol., 2004). V tabulce 3 jsou uvedené obecné údaje o obsahu jednotlivých prvků v rostlinách a půdě.

Tabulka 2. Průměrné hodnoty obsahu jednotlivých prvků mikroživin v sušině těl rostlin (Šetlík a kol., 2004)

Prvek	Atomová hmotnost	Obsah v sušině		Poměrný počet atomů
		$\mu\text{mol.g}^{-1}$	ppm nebo %	
mikroživiny			ppm	
molybden	95,95	0,001	0,1	1
měď	63,54	0,10	6	100
zinek	65,38	0,30	20	300
mangan	54,94	1,0	50	1 000
železo	55,85	2,0	100	2 000
bór	10,82	2,0	20	2 000
chlor	35,46	3,0	100	3 000

Tabulka 3. Průměrné obsahy prvků v rostlinách a v půdě (Šetlík a kol., 2004)

Prvek	Obsah prvku [g.kg^{-1} sušiny]		
	Rostliny rozmezí	Rostliny průměr	Půda průměr
dusík	10 - 50	20,0	1,0
fosfor	1 - 8	2,0	0,7
síra	0,5 - 8	1,0	0,7
draslík	5 - 50	10,0	14,0
vápník	5 - 50	10,0	14,0
hořčík	1 - 10	2,0	5,0
železo	0,05 - 1	0,1	38,0
mangan	0,02 - 0,3	0,05	0,9
zinek	0,01 - 0,1	0,02	0,05
měď	0,002 - 0,02	0,006	0,02
molybden	0,0001 - 0,001	0,0002	0,002
bór	0,005 - 0,1	0,02	0,01

- **Železo** (Fe)

V rostlinné výživě hraje železo klíčovou roli, zejména při syntéze chlorofylu. Je součástí cytochromů a má významný vliv na fotosyntézu, stabilizaci proteinů a dýchání rostlin, kde funguje jako nosič elektronů v dýchacím řetězci (Hlušek a kol., 2015). Taktéž se nachází v enzymech peroxidáza, kataláza a je součástí ferredoxinu (Procházka a kol., 1998). Železo je obvykle přijímáno rostlinami v komplexní formě, a jeho pohyblivost v rostlinách je poměrně omezená. Je zadržován mladými částmi kořenů ve formách Fe^{2+} , Fe^{3+} nebo v chelátové formě. Spolu s dalšími minerály je železo absorbováno rostlinami z půdy spolu s vodou. Ionty Fe^{3+} se špatně rozpouštějí v půdě, a proto rostliny vylučují do prostředí organické látky, které reagují s železem a vytvářejí tak cheláty. Největší část železa je následně ukládána v listech rostliny (Vaněk a kol., 2016).

Nedostatek železa v rostlinách je často způsoben nedostatečným příjmem tohoto minerálu z půdy. Půda má ve většině případů dostatečné zásoby železa pro potřeby rostliny, s výjimkou uměle připravených substrátů organického původu, kde může nastat nedostatek. Problémy mohou nastat i při hydroponickém pěstování rostlin, kde je obtížné udržet železo v rozpustné formě v živném roztoku. Nedostatek železa se často projevuje na alkalických půdách s vysokým obsahem uhličitanu vápenatého nebo po jejich převápnění. Typickými příznaky nedostatku jsou světle zelené a později žloutnoucí nejmladší listy, což naznačuje závažné onemocnění rostliny chlorózou (Kalina, 2005). V případě silného nedostatku železa může dojít k nízkému obsahu chlorofylu v listech a poškození vegetačního vrcholu rostliny (Vaněk a kol., 2016).

Přebytek železa je obvykle problematický pouze na půdách s vysokou kyselostí, kde vysoká rozpustnost železa může způsobit toxicitu, obvykle spolu s manganem a hliníkem (Kalina, 2005).

- **Mangan** (Mn)

Rostliny přijímají mangan ve formě Mn^{2+} nebo v podobě chelátových vazeb (Košťiř, 1960). Jeho pohyblivost v rostlinách je velmi nízká a je značně omezená zejména ve floému, který je zodpovědný za transport organických látek, jako jsou cukry a aminokyseliny, do různých částí rostliny (Vaněk a kol., 2016). Mangan aktivuje mnoho enzymatických reakcí a hraje důležitou roli v procesech biosyntézy chlorofylu, proteosyntézy, asimilace dusíku a syntézy některých vitamínů (Šafránková, 2007). Významnou roli hraje také při fotosyntéze, kde aktivně podporuje fotolýzu vody a štěpí ji na kyslík, vodík a elektrony (Hejnák a kol., 2007).

Nedostatek manganu je často způsoben spíše podmínkami daného stanoviště než samotnou absencí manganu v půdě. Při nadměrném zvápenatění půdy se mangan přeměňuje na formu, kterou rostliny obtížně využívají (Kalina, 2005). Nedostatek tohoto důležitého prvku vede k oslabení fotosyntézy a narušení procesu dýchání rostlin (Vaněk a kol., 2016). Viditelné příznaky nedostatku se obvykle projevují na mladých a středně starých listech, kde se začínají objevovat chlorotické nebo hnědé skvrny (Kalina, 2005). Následně dochází k zpomalení či zastavení růstu rostlin, a dokonce může dojít k odumírání buněčné tkáně na listech. Tento stav ovlivňuje schopnost rostliny absorbovat živiny a může vést k předčasnému opadávání listů (Vaněk a kol., 2016).

Vysoká hladina manganu se obvykle objevuje pouze ve velmi kyselých půdách a u rostlin, které nemají rády takto kyselé prostředí. Rostliny reagují na nadbytek manganu obdobně jako při jeho deficitu (Kalina, 2005).

- **Zinek** (Zn)

Zinek se v rostlinném organismu vyskytuje v poměrně nízkých hladinách, přičemž jeho pohyblivost je značně omezena. Někdy dokonce v rostlinách vůbec nekoluje (Košťiř, 1960). Navzdory své nízké koncentraci zastává v těle rostlin důležité funkce. Je klíčový při syntéze chlorofylu a má významný vliv na metabolismu nukleových kyselin, metabolismu dusíku a regulaci cukrů (Hlušek a kol., 2002). Zinek je nezbytný pro tvorbu rostlinných růstových hormonů, podporuje syntézu bílkovin, syntézu fotosyntetických pigmentů a ovlivňuje enzymatickou aktivitu. Na dostatečném obsahu zinku je závislá aktivita desítek enzymů (Procházka a kol., 1998). Rostliny přijímají

zinek v podobě iontů Zn^{2+} nebo ZnO^{2-} a dostává se do rostlinného těla skrze kořenový systém (Vaněk a kol., 2016).

Nedostatek zinku může vést k zakrslému růstu rostlin. Listy dosahují menšího vzrůstu, jsou příliš úzké a jejich zbarvení se mění na šedozelené. V některých případech mohou být listy také chlorotické. Tento stav signalizuje nízký obsah chlorofylu v listech a projevuje se světlejším až žlutým zbarvením listů, v důsledku toho následně dochází k předčasnému opadu listů. Na žilnatině listů se objevují světlé až bělavé skvrny. Mladé výhonky jsou náchylné k namrzání a mohou předčasně odumírat (Kalina, 2005). Nedostatek zinku také může způsobit poruchy plodnosti rostlin (Hejnák a kol., 2007).

Nadměrný obsah zinku a jeho možné toxické účinky jsou v přírodním prostředí vzácné (Kalina, 2005). Pokud k takovému stavu přece jen dojde, může se projevit sníženým růstem kořenů a listů. Tento jev se často projevuje v oblastech zasažených průmyslovými emisemi (Richter a kol., 2004). Nadměrný příjem zinku z půdy lze snížit vápenatěním (Kalina, 2005).

- **Měď** (Cu)

Měď je přijímána rostlinami ve formě Cu^{2+} nebo jako Cu-cheláty a hraje klíčovou roli v primárních metabolických procesech, včetně fotosyntézy a oxidázy, metabolismu dusíku a stejně tak v sekundárních metabolických procesech (Vaněk a kol., 2016). Je nezbytná pro tvorbu chlorofylu, působí jako součást enzymů, ovlivňuje biochemické reakce a má významný vliv na tvorbu sacharidů (Pavloušek, 2011).

Nedostatek mědi může být patrný zejména na slabě kyselých půdách a půdách s vysokým obsahem organické hmoty. Většinou je však obsah mědi v našich půdách dostačující (Kalina, 2005). Projevy nedostatku mědi se typicky projevují chlorotickými skvrnami a nekrózami na okrajích listů, které mohou být navíc deformované (viz obrázek 7) (Hejnák a kol., 2007). Rostliny jako hlávkový salát, cibule, špenát, mrkev a červená řepa jsou zvláště citlivé na nedostatek mědi.

Nadbytek mědi se u rostlin vyskytuje jen zřídka, jelikož je měď silně vstřebávána půdou a při vysokých koncentracích nepřechází do půdního roztoku ani není významně transportována do nadzemních orgánů (Kalina, 2005).



Obrázek 7. Symptomy nedostatku mědi u cukrové řepy (yaraagri, ©2023)

- **Bór** (B)

Bór je důležitou rostlinnou živinou, která hraje klíčovou roli v růstu rostlin. Přestože je považován za mikroživinu, jeho význam je srovnatelný s významem makroživin (Černý a kol., 2016). Rostliny absorbují bór ve formě anionů kyseliny borité, konkrétně ve formách HBO_3^{2-} a H_2BO_3^- . Schopnost pohybu bóru mezi jednotlivými částmi rostliny je velmi omezená (Vaněk a kol., 2016). Rostliny jsou závislé na bóru jakožto na klíčovém prvku, který plní důležité stavební funkce, jako je jeho úloha při tvorbě a stabilitě buněčné stěny. Až 90 % bóru obsaženého v rostlinách je vázáno v buněčných stěnách, což také vysvětluje jeho omezenou schopnost pohybu uvnitř rostliny. Bór nejen nepřímo podporuje tvorbu buněčné stěny, ale také se aktivně podílí na její struktuře spojením pektinů a vytvořením příčných vazeb mezi různými složkami buněčné stěny (Černý a kol., 2016). Kromě toho se bór podílí na tvorbě organických látek, jako jsou nukleové kyseliny, bílkoviny a sacharidy, a také ovlivňuje produkci růstových hormonů rostlin (Braun a Vanek, 1985). Jeho účinkem je ovlivňován zejména transport sacharidů z listů do zásobních orgánů, což ovlivňuje jak rychlost fotosyntézy, tak vývoj zásobních orgánů, jako jsou kořeny a plody (Černý a kol., 2016). Jednou z dalších významných funkcí bóru je jeho účinek na reprodukční procesy rostlin, jako je například klíčení pylu a další procesy oplodnění (Procházka a kol., 1998).

Nedostatek bóru se obvykle projevuje krytou formou snižující kvalitu produkce. Rostliny dvouděložné (*Dicotyledoneae*) vyžadují daleko více bóru než rostliny jednoděložné (*Monocots*) (Procházka a kol., 1998). Typickým příznakem nedostatku bóru je zpomalený růst vegetačních vrcholů. Se zvyšujícím se nedostatkem bóru odumírají vrcholy a horní listy a rostlina následně zcela zakrní. Nedostatek bóru je často způsoben nadměrnou kalcifikací (vápněním) a je umocněn nedostatkem závlahy (Kalina, 2005). Nejčastějším příznakem nedostatku bóru je takzvaná srdéčková hniloba (viz obrázek 8), která se projevuje již v počáteční fázi růstu listové růžice. Vyskytuje se zejména na rostlinách řepy, celeru a také na brukvovitých bulevných rostlinách. Nedostatek bóru může u některých rostlin způsobit slabý růst mladých listů a nepravidelný růst plodů (Hejnák a kol., 2007).



Obrázek 8. Srdéčková hniloba u cukrové řepy (Čermák a kol., 2010)

Nadbytek boru se nejčastěji projevuje poškozením vrchních listů, zasycháním jejich okrajů a postupným žloutnutím celého listu. Vzniká pouze v důsledku nesprávného hnojení nebo pěstování rostlin v květináčích s vysokým obsahem boru. Podobné příznaky může způsobit také nesprávné zalévání a přemokření rostliny (Kalina, 2005). Nadměrné hladiny boru mohou být pro rostliny toxické (Richter a Hlušek, 1994).

Cukrová řepa a bór: Bór je pro cukrovou řepu nejdůležitější mikroživinou. Jeho silný nedostatek může způsobit již zmíněnou srdéčkovou hnilobu. Nejmladší srdéčkové listy bývají zkrácené, jejich barva se postupně mění ze žluté na hnědnou (viz obrázek 9) a mohou se na nich objevit také praskliny. K jeho nedostatku dochází nejčastěji následkem sucha nebo na alkalických zásaditých půdách. Nedostatek bóru lze účinně odstranit, jak přímou aplikací do půdy, tak i pomocí mimokořenové výživy, pokud je listový aparát rostlin dostatečně vyvinutý (Čermák a kol., 2010).



Obrázek 9. Symptomy nedostatku bóru u cukrové řepy (Hřivna a kol., 2014)

- **Molybden** (Mo)

Rostliny pro svůj metabolismus přijímají molybden ve formě MoO_4^{2-} a ukládají ho především do listů, kde je omezena jeho pohyblivost (Vaněk a kol., 2016). Molybden je klíčový pro aktivaci enzymu redukujícího dusičnany, známého jako nitrátreduktáza a jeho aktivity jsou obvykle spojeny s metabolismem dusíku (Procházka a kol., 1998). Pro normální fyziologické funkce potřebuje většina rostlin jen velmi malé množství molybdenu (Hejnák a kol., 2007).

Nedostatek molybdenu se nejčastěji projevuje deformací a kroucením listů. Listy mají tendenci nabývat lžicovitého tvaru, svinují se nahoru (viz obrázek 10) a jsou velmi křehké (Kalina, 2005). Zvláště vysoké požadavky na molybden mají brukvovité rostliny

(ředkev, květák, kapusta, kedluben, zelí atd.). Při silnějším nedostatku může být u některých rostlin omezena také tvorba květenství (Vaněk a kol., 2016).

Nadměrné množství molybdenu v půdě a jeho toxické účinky na okolí jsou v běžných podmínkách velmi neobvyklé a téměř nepravděpodobné (Kalina, 2005).



Obrázek 10. Symptomy nedostatku molybdenu u cukrové řepy (yaraagri, ©2023)

- **Kobalt** (Co)

Kobalt není obvykle považován za zcela nezbytný prvek pro život rostlin, nicméně jeho přítomnost může pozitivně ovlivnit složení půdy. Standardní koncentrace kobaltu v rostlinách se obvykle pohybují v rozmezí 0,03-1 mikrogramů na gram hmotnosti ($\mu\text{g/g}$) (Baker a Brooks, 1989). Rostliny mohou absorbovat kobalt z půdy pomocí kořenů, ale také ho mohou vstřebávat prostřednictvím listů. Mohou ho získávat, jak z okolního prostředí skrze listové póry, tak i z ekologických postřiků a hnojiv. Kobalt vytváří ionty CO^{2+} , CO^{3+} a CO^{4+} a má pozitivní vliv na biosyntézu a stabilitu chlorofylu, aktivně působí na enzymové systémy, společně s organickými radikály tvoří různé sloučeniny a je součástí vitamínů (Pavlová, 2006). Je především klíčovou složkou kobaltaminu, známého též jako vitamín B₁₂. Dále hraje důležitou roli při fixaci dusíku a aktivaci oxidáz, čímž podporuje respiraci rostlin (Vaněk a kol., 2016)

3.2.3 Užitečné prvky

Do této skupiny řadíme takové prvky, které nemají pro všechny druhy rostlin stejný a jasný význam (Richter a Hlušek., 1994). Pro některé druhy rostlin jsou užitečné prvky velmi důležité a jsou nezbytné pro jejich správný růst a vývoj. Nejčastěji jsou zodpovědné za správné fungování rostlinných enzymů a metabolických procesů. Bez těchto prvků by rostliny nedosahovaly optimálních podmínek a byly by náchylnější k různým chorobám. Zatím co takovéto druhy rostlin nemohou bez těchto živin přežít, jiné druhy tyto prvky nepotřebují a dokáží se bez nich zcela obejít po celý svůj život (Richter a kol., 2004). I v případě dlouhodobého nedostatku těchto živin je rostlina schopna přežít a projít bez problémů celým svým vývoje bez jakýchkoliv negativních důsledků. V této skupině jsou jednoznačně nejdůležitějšími prvky chlór (Cl), sodík (Na), křemík (Si), hliník (Al), jód (I), fluor (F), selen (Se), chrom (Cr), vanad (V) a titan (Ti) (Richter a Hlušek., 1994).

- **Chlór** (Cl)

V případě, že je chlór přirozeně obsažen v živném prostředí rostliny jej přijímají ve formě aniontu Cl^- ve velkém množství (Vaněk a kol., 2016). Tento prvek se uvolňuje do rozpustných forem prostřednictvím zvětrávání hornin, vulkanické aktivity a aplikace draselných hnojiv (Richter a Hlušek, 1994). Chlór hraje klíčovou roli v komplexu fotosystému II, který je zodpovědný za rozklad vody (Procházka a kol., 1998) a také ovlivňuje otevření průduchů. Fyziologická potřeba chlóru u rostlin se obvykle pohybuje na velmi nízké úrovni (Hejnák a kol., 2007).

- **Sodík** (Na)

Sodík je rostlinami přijímán ve formě Na^+ a do půdy se dostává prostřednictvím průmyslových hnojiv a závlahové vody (Richter a Hlušek, 1994). Nachází se převážně v cytoplazmě buněk rostlin a podílí se na regulaci osmotického potenciálu, což je schopnost prostředí přitahovat vodu prostřednictvím osmotického tlaku. Sodík, podobně jako křemík a chlór, není považován za typickou živinu pro rostliny. Existuje závislost některých rostlinných druhů na příjmu sodíku, kde je požadavek sodíku zahrnut v genetickém kódu dané rostliny (Vaněk a kol., 2016).

Například u cukrové řepy (*Beta vulgaris*) lze nahradit část draslíku sodíkem bez jakéhokoli negativního vlivu na její růst nebo produktivitu (Procházka a kol., 1998).

- **Křemík** (Si)

Křemík je druhý nejrozšířenější prvek v litosféře po kyslíku a je obsažen ve všech minerálech (Richter a Hlušek, 1994). V rostlinách je křemík zařazován mezi makroživiny, ale jeho přítomnost je spíše dána vysokým obsahem v půdě než skutečnou potřebou rostlin (Hejnák a kol., 2007). Existují druhy rostlin, které obsahují významné množství křemíku, ale jeho nezbytnost v rostlinném metabolismu dosud není jednoznačně prokázána. Přidání křemíku do půdy však některým rostlinám urychlí růst, což naznačuje, že jeho přítomnost může zvýšit odolnost rostliny vůči mechanickému namáhání pletiv a přispívat k jejich zpevnění (Procházka a kol., 1998).

- **Hliník** (Al)

Hliník je přítomen v půdě jako součást primárních a sekundární jílových minerálů. Při neutrální nebo alkalické reakci se hliník rozpouští v půdním roztoku jen v malé míře. S rostoucí kyselostí se však množství dostupného hliníku výrazně zvyšuje, až do takových úrovní, které mohou být pro rostliny toxické (Richter a Hlušek, 1994).

3.2.4 **Ostatní (cizorodé) prvky**

Skupina cizorodých látek obsahuje především těžké kovy, které mohou významně přispívat k znečištění zemědělských půd. Tyto látky se v přírodních podmínkách vyskytují v malém množství, ale jejich koncentrace v půdách se v důsledku lidské činnosti zvyšuje (Richter a Hlušek, 1994). Rostliny tyto prvky přijímají z prostředí, ale nejsou schopny je efektivně využít, což může vést k toxickým reakcím, které ovlivňují nejen rostliny, ale i živočichy. Tento jev se nazývá zootoxicity, kdy přítomnost těchto prvků v potravě zvířat představuje toxické riziko (Lhotský, 1994).

Cizorodé látky se mohou do půdy dostat prostřednictvím nezemědělských činností nebo z nezávislých zdrojů, jako jsou toxické látky, pesticidy a uhlovodíky. Mezi nebezpečné prvky patří kadmium (Cd), olovo (Pb), rtuť (Hg) a arsen (As) (Cibulka a kol., 1991). Protože tyto prvky mohou působit jako karcinogeny a mutageny, je důležité monitorovat jejich koncentrace v půdě. Rostliny mohou tyto prvky ukládat ve svých vakuolách nebo je neutralizovat jinými prvky, ale stále existuje riziko jejich přenosu (Richter a Hlušek, 1994).

Kromě těžkých kovů mezi cizorodé prvky patří také některé mikroživiny, jako je železo(Fe), zinek (Zn), měď (Cu) a molybden (Mo), které mohou působit toxicky pouze ve vyšších koncentracích. Mezi další cizorodé prvky pak můžeme zařadit také hliník (Al), nikl (Ni), chróm (Cr), selén (Se) a v poslední řadě beryllium (Be) (Richter a Hlušek, 1994).

- **Kadmium** (Cd)

Rostliny přijímají kadmium z půdy a atmosféry především jako kationty Cd^{2+} , přičemž vyšší obsah kadmia v půdě a kyselější pH vedou k vyššímu příjmu z půdy. Kadmium se velmi obtížně přemísťuje z kořenů do nadzemních částí rostliny. Při nižších koncentracích je kadmium běžnou součástí rostlinných tkání a akumuluje se v bílkovinné frakci rostlin. Kadmium vede u některých rostlin k syntéze cysteinu a methioninu, ale jeho účinek závisí na citlivosti rostliny k tomuto prvku. Mezi příznaky otravy kadmiem patří omezení růstu, poškození kořenů, červenohnědé zbarvení listů až chloróza a inhibice aktivity nitrátreduktázy. Citlivost rostlin na kadmium se liší, přičemž citlivé jsou zejména druhy jako špenát, sója a okopaniny (Richter a Hlušek, 1994).

- **Olovo** (Pb)

V přirozených podmínkách je olovo přítomno ve všech rostlinných organismech a jeho typické množství je 2-3 mg Pb.kg⁻¹. Rostliny přijímají olovo pasivně a jeho příjem je ovlivněn pH a teplotou. Rostliny mohou přijímat značné množství olova z půdních roztoků, to je však v rostlině pevně fixováno a je nepohyblivé. V rostlinách je olovo uloženo ve formě pyrofosforečnanu v buněčné stěně rostlin, což vysvětluje jeho malou pohyblivost. Nízké koncentrace olovnatých solí mohou stimulovat růst

rostlin. Ve vyšších koncentracích však může interagovat s jinými prvky, narušovat metabolismus vápníku, inhibovat enzymové systémy, snižovat příjem oxidu uhličitého (CO₂) a omezovat příjem vody (Richter a Hlušek, 1994).

Při nadměrných koncentracích olova mohou rostliny trpět chlorózou. Listy se zbarví do žlutozelená a často zakrní. Zvýšené koncentrace olova jsou často způsobeny kontaminací povrchu rostlin. Zvýšené koncentrace olova v některých rostlinách, jako jsou brambory, špenát a salát, mohou snížit produkci až o 20 %, přičemž listová zelenina je na akumulaci olova nejnáchylnější (Richter a Hlušek, 1994).

- **Rtuť** (Hg)

Rostliny mají schopnost snadno přijímat rtuť díky vysokému akumulacímu koeficientu tohoto prvku. Rtuť, která je přijata z půdy, se hromadí v kořenech rostlin a může být transportována do nadzemních částí. Obsah rtuti v rostlinách nezávisí přímo na množství rtuti v půdě, ale spíše na obsahu rtuti ve vzduchu. Rostliny dokážou přijímat rtuť ze vzduchu ve formě páry.

V rostlinách se rtuť přemísťuje do různých tkání a váže se na atomy síry obsažené v aminokyselinách, bílkovinách a enzymech. Rtuť může negativně ovlivnit růst rostlin, vývoj kořenů a proces fotosyntézy. Kontaminace prostředí rtutí se může vyskytnout v blízkosti průmyslových zón, kde se zpracovávají těžké kovy nebo chemikálie, a také při používání přípravků obsahujících rtuť, jako jsou například fungicidy (Richter a Hlušek, 1994).

- **Arsen** (As)

Arsen je přirozenou složkou několika rostlin, přičemž nejvyšší koncentrace arsenu se vyskytuje zejména u listové zeleniny. V rostlinách se arsen šíří mezi jednotlivými částmi relativně snadno a jeho množství se nejčastěji pohybuje v rozmezí 0,09 až 1,5 ppm (parts per million) na sušinu. Toxické účinky arsenu se zejména projevují u rostlin, které rostou v bezprostřední blízkosti dolů nebo při použití znečištěných odpadních vod, které obsahují hrubé nečistoty, při závlaze zemědělských plodin. Prvním známkou toxicity je vadnutí a fialové zbarvení listů, následované zpomalením růstu a snížením výnosu rostlin. Nejúčinnějším způsobem, jak snížit toxicitu arsenu,

je správná výživa rostlin sírou a fosforem, které výrazně redukuje jeho škodlivé účinky (Richter a Hlušek, 1994).

3.3 Sacharidy

Rostliny jsou organismy, které se musí účinně přizpůsobovat svému prostředí a vyvíjet se podle potřeb fotosyntézy, získávání živin a řízení polohy těla. Mají schopnost vnímat změny v dostupnosti živin a reagovat na ně, což je důležité pro správnou regulaci růstu kořenů a výhonků. Jejich vývoj je citlivý na řadu faktorů, které ovlivňují jejich růstovou reakci, včetně hladiny cukru v rostlině, hladiny vnějších a vnitřních živin a dostupnosti vody. Tato schopnost regulace tvorby výhonků a kořenového růstu závisí také na sacharidech, zejména na hladině cukru obsaženého v rostlině. Sacharidy jsou nepostradatelnými molekulami pro optimální růst a vývoj rostlin, a jejich důležitost je klíčová také při správné regulaci rostlinných hormonů. Koordinace těchto růstových reakcí je částečně řízena rostlinnými fytohormony, malými molekulami schopnými cestovat na velké vzdálenosti a ovlivňovat metabolické a vývojové reakce rostlin. Pochopení účinků sacharidů na fyziologii a růst rostlin je klíčem k zajištění správné funkce rostlin (Göbel a Fichtner, 2023).

Sacharidy jsou nejhojnější přírodní látkou, která je přítomná ve všech rostlinných ale i živočišných buňkách a slouží jako důležitý zdroj energie pro všechny živé organismy (Ball, 1993). Skládají se z nejméně tří atomů uhlíku spojených alifatickými vazbami, které se mohou spojit a vytvořit acetalovou vazbu. Vzhledem k tomu, že se sacharidy mohou navzájem kondenzovat a vytvářet složitější struktury, mohou fungovat jako okamžitý zdroj energie i jako dlouhodobá zásobárna energie pro organismy (Černý a kol., 2010). Z toho důvodu jsou sacharidy důležitou složkou živých organismů a nacházejí se v tělech rostlin a zvířat v poměrně velkém množství. Živočišné tkáně obsahují asi 2 % sacharidů v sušině, zatímco tělo rostlin je jimi tvořeno až z 90 % (Ferenčík a kol., 2000).

V zelených částech rostlin vznikají sacharidy prostřednictvím biochemického procesu fotosyntézy, která je způsobena slunečním zářením a účinkem chlorofylu. Během tohoto procesu se atmosférický oxid uhličitý (CO_2) a voda (H_2O) přeměňují na cukry a jako vedlejší produkt vzniká také kyslík (O_2) (Jursík a kol., 2010). Awramik (1992), známý svou prací v oblasti studia nejstarších záznamů fotosyntézy, ve své práci uvádí, že se na Zemi ročně vyprodukuje obrovské množství uhlíku spojeného se

sloučeninami sacharidů, a to ve velikostech až 1,5 milionu tun, zatímco se do ovzduší uvolní přibližně 400 miliard tun kyslíku. Samotná produkce sacharidů prostřednictvím fotosyntézy je základním a nezbytným procesem pro přežití a reprodukci rostlin (Siddiqui a kol., 2020).

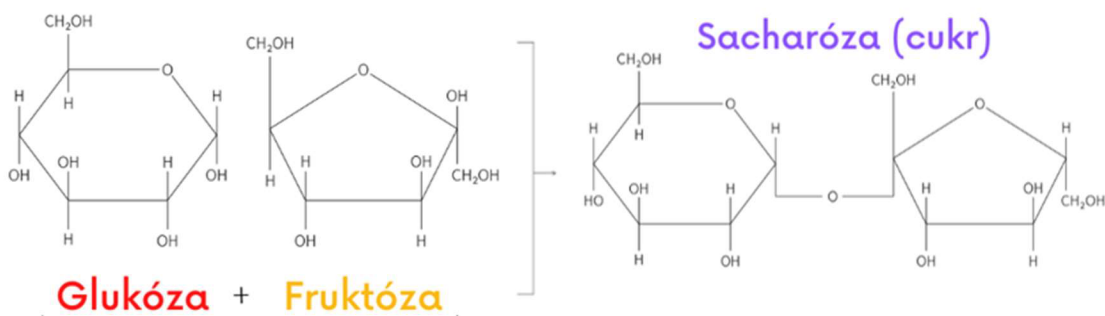
Bez tohoto procesu nemá rostlina dostatek energie k udržení svého růstu a důležitých funkcí. Rostliny mají schopnost monitorovat hladinu sacharidů a reagovat na ni pomocí složitého kontrolního systému, který propojuje vlivy vnějších podmínek, jako jsou například biotické a abiotické stresové faktory, světlo, živiny společně s vnitřními vývojovými programy, řízenými hormony. Tato schopnost zajišťuje nejen správnou syntézu, ale také transport, využití a skladování sacharidů v rostlinném organismu. Jde o dynamické procesy ovlivněné fyziologií buněk, rostlinnými orgány, podmínkami prostředí a vývojovými stádii rostlin (Morkunas a kol., 2012).

Syntéza sacharidů představuje proces, při kterém rostliny vytvářejí sacharidy, konkrétně glukózu a další typy cukrů. Jakmile jsou sacharidy syntetizovány, jsou transportovány přes floém (cévní systém rostlin) do různých částí rostlin, jako jsou kořeny, květy nebo plody. Zde jsou využívány k poskytování energie, stavbě buněk a dalším metabolickým procesům. Rostliny regulují tento transport tak, aby zajistily co nejoptimálnější distribuci sacharidů tam, kde jsou nejpotřebnější pro růst, výživu a zásobování energií. Rostliny také dokážou ukládat sacharidy ve formě škrobu a dalších cukrů, které slouží jako rezervní zdroj energie v době nedostatku slunečního záření nebo jiných nepříznivých podmínek. Během noci při nedostatku světla probíhá v rostlinném těle proces přeměny glukózy na celulózu, další složky rostlinných pletiv a škrob, který slouží jako rezerva pro metabolické procesy (Šebánek a kol., 1983). Tato schopnost je důležitá pro dlouhodobé přežití a adaptaci rostliny na různé podmínky. Obecně lze říci, že rostliny ukládají a využívají všechny druhy sacharidů získané při fotosyntéze velmi efektivně pro potřeby růstu a přežití.

Sacharidy se dělí do tří základních skupin podle jejich relativní molekulové hmotnosti. Monosacharidy jsou nejjednodušší formou sacharidů a během kyselé hydrolýzy se rozkládají na nižší sacharidové jednotky (Černý a kol., 2010). Mnoho těchto sloučenin vzniká během procesu glukoneogeneze, zatímco jiné jsou výsledkem fotosyntézy. Metabolický rozklad monosacharidů poskytuje většinu energie, která je potřebná pro průběh biologických procesů. Monosacharidy také tvoří nukleové kyseliny a jsou klíčovou složkou lipidů (Voet a kol., 1995). Oligosacharidy obsahují

2- 10 monosacharidů spojených glykosidickými vazbami a lze je rozložit na monosacharidy hydrolýzou (Černý a kol., 2010). Oligosacharidy často interagují s proteiny a lipidy, kde plní jak stavební, tak regulační funkce (Voet a kol., 1995). Naopak polysacharidy obsahují více než 10 monosacharidů (Černý a kol., 2010). Do skupiny polysacharidů řadíme celulózu, škrob a glykogen. Tyto látky mají klíčovou strukturální roli pro všechny organismy, zejména pak pro rostliny, kde je celulóza základním stavebním materiálem (Voet a kol., 1995).

V této práci se zaměřuji na vliv biocharu na obsah cukrů u cukrové řepy. Vzhledem k tomu, že je cukrová řepa významným zdrojem sacharózy, která je složená z fruktózy a glukózy (viz obrázek 11), budu se dále v práci zabývat pouze těmito třemi sacharidy. Kromě toho, jednou z možných výhod aplikace biocharu do půdy je zvyšování zadržky živin. Biochar může zlepšit strukturu půdy a zvýšit schopnost půdy udržovat vodu a potřebné živiny, což může vést k lepší absorpci živin rostlinami (Thies a kol., 2009). Tím dochází k zvýšení obsahu sacharidů v rostlinách a zlepšení metabolismu sacharidů.



Obrázek 11. Syntéza sacharózy (nutrim, ©2024)

3.3.1 Glukóza (Glc)

Glukóza je ve vodě rozpustný jednoduchý cukr, přítomný v tělech všech rostlin jako látka nezbytná pro ukládání energie (Dostál a kol., 2003). Kromě toho že je obecným zdrojem uhlíku, působí také jako signální molekula, ovlivňující různé metabolické procesy rostlin, včetně těch, které jsou ovlivněny nedostatkem vody v půdě a mohou vést k oslabení růstu a vývoje rostlin. Mezi ovlivněné procesy patří například fotosyntéza, dýchání rostlin a metabolismus dusíku. Při nedostatku vody je koncentrace glukózy výrazně ovlivněna, což se projeví na výnosech a celkové vitalitě rostlin. Rostliny jsou schopny efektivně reagovat na abiotický stres. Ve chvíli, kdy je rostlina vystavena stresovým podmínkám, začíná zvyšovat obsah glukózy, což je důležité pro adaptaci a snižování negativních účinků stresu. Tato akumulace glukózy podporuje tvorbu antioxidantů a dalších látek, které pomáhají rostlinám přežít v nepříznivých podmínkách (Siddiqui a kol., 2020).

Rostliny tak mohou glukózu využívat jako ochranný prostředek před negativními účinky nedostatku vody v půdě, čímž zvyšují svoji odolnost vůči stresu (Sami a kol., 2019). Glukóza působí v rostlinách také jako významné osmotikum, které napomáhá udržovat správnou rovnováhu vody a živin, udržuje osmotický tlak uvnitř buněk, snižuje propustnost buněčných membrán a pomáhá regulovat stabilní pH, což přispívá k udržení homeostázy v rostlině během dlouhodobého stresu. Tímto způsobem glukóza pomáhá udržovat stabilitu buněčného prostředí (Siddiqui a kol., 2020).

Rostliny využívají vytvořenou glukózu pro tvorbu dalších látek. Například si ji přemění na celulózu nebo jiné složky rostlinných pletiv a také na škrob, který slouží jako zásobní látka pro metabolismus. Rostliny vytvářejí glukózu fotosyntézou a následně ji přeměňují na škrob, který se ukládá do zásobních orgánů, jako jsou semena, kořeny nebo hlízy. Škrob slouží jako zdroj energie pro rostlinu během období nedostupnosti světla nebo při potřebě rychlého uvolnění energie pro růst nebo reprodukci. Snímání a signalizace cukru, včetně glukózy, hrají důležitou roli při vyrovnávání požadavků na živiny, hormony a signály z prostředí v rostlinách. Glukóza pomáhá regulovat různé procesy v rostlinách, jako je klíčení semen, vývoj, fotosyntéza, kvetení a stárnutí. Je to důležitá molekula, která zprostředkovává komunikaci mezi různými částmi rostliny a jejím vnějším prostředím (Sami a kol., 2019).

3.3.2 Fruktóza (Fru)

Fruktóza patří mezi ketohexosy a je druhým nejrozšířenějším monosacharidem. Vyskytuje se volně v ovoci a medu v podobě pyranosy, zatímco ve složených formách je obsažena v sacharóze a inulinu. Kvůli své obtížné krystalizaci se fruktóza získává v sirupovité kapalině. V roztoku je nejčastěji přítomna v cyklické formě (Jindra a kol., 1966). Rostliny vytvářejí fruktózu během procesu fotosyntézy. Fruktóza hraje klíčovou roli v metabolismu rostlin, poskytuje energii pro jejich růst a vývoj a také reguluje další metabolické procesy. Navíc interaguje s rostlinnými hormony a pomáhá při koordinaci růstu semenáčků po klíčení (Cho a Yoo, 2011). Zvýšený obsah fruktózy, prostřednictvím různých fyziologických mechanismů, chrání rostliny před stresujícími podmínkami spojenými s chladem. Tato neenzymatická obrana je klíčová pro udržení stability vnitřního prostředí rostlin a ochranu před nepříznivými účinky stresu (Bogdanović a kol., 2008).

3.3.3 Sacharóza

Optimalizace technologické kvality cukrovky, vytváří ideální podmínky pro získání cukrové řepy (*Beta vulgaris*) s požadovanými vlastnostmi. Tyto vlastnosti zahrnují chemické složení, biologické, fyzikálně-chemické a mechanické vlastnosti řepy. Důležitým faktorem je obsah sacharózy a vhodný poměr melasotvorných látek, jako jsou sodné a draselné soli, které ovlivňují výslednou kvalitu řepy. Tento proces je důležitý pro zajištění technické kvality řepy a jejího využití při výrobě cukru (Kadlec, 2000).

Sacharóza je jedním z nejběžnějších sacharidů v rostlinné říši a zastává roli hlavního transportního cukru ve všech vyšších rostlinách (Goddijn a van Dun, 1999). Nachází se také u řas a některých druhů sinic. Tento hlavní cukr v rostlinné říši vzniká spojením D-fruktózy a D-glukózy a je získáván z cukrové řepy nebo cukrové třtiny. V České republice je hlavním zdrojem sacharózy právě cukrová řepa (*Beta vulgaris*), která obsahuje velké množství tohoto sacharidu (Pokorná a kol., 2011).

Pro maximální výtěžek cukru se řepa řeže na úzké proužky. Ty se následně extrahují horkou vodou, aby došlo k uvolnění sacharózy. Vzniklá surová šťáva očištěná od organických a anorganických látek se poté zahušťuje a krystalizuje. Jako vedlejší produkt krystalizace vzniká melasa, která obsahuje vysoké množství vápníku a hořčiku (Kadlec, 2000).

Sacharóza je klíčová zejména pro přenos živin a energie v rostlinných tkáních a orgánech a poskytuje rostlinám potřebný uhlík, což z ní činí důležitý prvek pro správný růst a fungování rostlin. Jako signální molekula pomáhá zvyšovat odolnost rostlin při abiotickém stresu, vyvolaném nepříznivými klimatickými podmínkami (Smeekens, 2000). K její akumulaci dochází vlivem stresových faktorů, jako jsou zejména vyskytující se extrémně nízké teploty nebo dlouhá přetrvávající suchá období (Guy a kol., 1992). Hraje také důležitou roli při osmotickém přizpůsobení rostlinných buněk, když jsou buňky vystaveny nedostatku vody nebo jiným stresovým podmínkám. Navíc slouží jako ochranný prvek a stabilizátor buněčných membrán prostřednictvím interakce hydroxylových skupin s fosfolipidy. Sacharóza tedy může významně chránit rostlinné buňky před negativními dopady sucha nebo jiných podmínek, které by mohly narušit jejich funkci (Salerno a Curatti, 2003).

3.4 Biochar

Změny klimatu jsou v současné době silně debatovaným tématem, neboť mají zásadní dopad nejen na společnost, ale především na ekosystémy. Historicky se klima na Zemi měnilo z různých přírodních důvodů, jako jsou změny slunečního cyklu, oběžné dráhy Země nebo pohybu tektonických desek, avšak tyto změny probíhaly během dlouhých časových období (Žalud a kol., 2020). V dnešní době však dochází k rychlým globálním změnám klimatu, které jsou daleko rychlejší než kdy dříve. Hladina moří nadále rychle stoupá, ledovce na Antarktidě a Grónsku se rychle zmenšují a emise skleníkových plynů, zejména oxidu uhličitého (CO₂) a methanu (CH₄), neustále rostou v atmosféře (Hollan a Klusák, 2009). Extrémní výkyvy teplot a přetrvávající sucho zvyšují riziko přírodních požárů, což vede k dalšímu uvolňování skleníkových plynů, zvyšujícímu se oteplování a nevyhnutelně k dalšímu zvyšování emisí oxidu uhličitého a methanu (Hollan, 2015).

Ačkoli snižování emisí skleníkových plynů může působit, jako obtížný úkol, je nezbytné jednat rychle, abychom zabránili devastujícím dopadům změn klimatu. Jedním z efektivních způsobů, jak zpomalit uvolňování oxidu uhličitého z biomasy, je využití mikrobiálního rozkladu. Tímto způsobem můžeme dlouhodobě a spolehlivě snižovat koncentraci CO₂ ve vzduchu, což je klíčový krok k ochraně klimatu a životního prostředí. Postupným snižováním rychlosti uvolňování uhlíku z biomasy do ovzduší a jeho zachycováním a ukládáním do sedimentů, například pomocí

technologie CCS (záchyt a ukládání uhlíku), můžeme účinně bojovat proti změnám klimatu a ochránit naši planetu pro budoucí generace. Pokud by palivem byla biomasa, která se brzy zoxiduje v přírodě, část uhlíku by zůstala uložena v biomase a neodešla by do atmosféry (Hollan a Klusák, 2009). Technologie CCS je žádoucí pro velká zařízení spalující biomasu, i když není ideální pro uhlí, které by se mělo postupně přestat používat úplně. CCS je náročná kvůli potřebě dopravit CO₂ z místa záchytu do úložiště a přináší další spotřebu energie a náklady (Singh a kol., 2011).

Existuje naštěstí ještě druhá, snazší cesta, která transport a vtlačování CO₂ do hlubokých sedimentů nevyžaduje. Ta spočívá v postupu, kdy se biomasa nepromění na popel, ale jen zuhelnatí. Je to obdoba postupu, jímž se vyrábí dřevěné uhlí. Rozdíl je jen v tom, že se výsledný produkt - uhlí - nepoužije jako palivo (nedojde k jeho rychlé oxidaci), ale vpraví se v jemnozrnné formě do půdy (viz obrázek 12). V tomto případě jej označujeme jako biochar (Hollan a Klusák, 2009).

Jedná se o materiál bohatý na uhlík, který je vyroben pomocí tepelného rozkladu organického materiálu získaného ze zemědělské a lesnické biomasy (Verheijen a kol., 2010). Biomasa je získávána z různých zdrojů, a to například z čistírenských kalů odpadních vod, rýžových slupek, ořechových skořápek, chlévské mrvy, slámy, dřevního odpadu, kukuřičných klasů, sóji a tak dále (Gembalová a kol., 2017). Rozklad biomasy neboli pyrolýza probíhá za nepřítomnosti kyslíku a při vysokých teplotách (Lehmann a Joseph, 2009). Struktura biocharu je velmi rozmanitá a zahrnuje jak pevné, tak i nestabilní složky. Jeho hlavními složkami jsou pevný uhlík (C), minerály, těkavé látky a vlhkost (Verheijen a kol., 2010). Jelikož se vyznačuje přítomností relativně stabilních forem uhlíku může v půdě přetrvávat i několik let (Ok a kol., 2016). Biochar je možné využít v široké škále aplikací, a to od úpravy půdních vlastností až po využití biocharu k výrobě elektrické energie a tepla (Weber a Quicker, 2018).



Obrázek 12. Biochar (biocharinternational, ©2024)

3.4.1 Výroba biocharu a jeho druhy podle pyrolýzní teploty

Jak bylo již zmíněno v předchozí kapitole způsob výroby biocharu je založen na termochemické přeměně biomasy za nepřítomnosti kyslíku (Sohi a kol., 2010). Biochar lze vyrábět z různých typů biomasy. Jedná se například o odpady ze zemědělského provozu a lesnictví, energetické rostliny (řepka, kukuřice, slunečnice), ale také o hnůj a čistírenský kal (Nartey a Zhao, 2014 ; Filiberto a Gaunt 2013).

V současné době jsou to právě zemědělské odpady, které slouží jako primární surovina používaná pro výrobu biocharu. Biochar lze vyrábět čtyřmi termochemickými cestami, a to pomocí procesu pyrolýzy, torifikace, hydrotermální karbonizace a zplyňování (Bartoli a kol., 2020). Typ zvolené vstupní suroviny pak udává nejen obsah hlavních biogenních prvků, ale také určuje, jaké bude mít biochar vlastnosti (Lee a kol., 2019).

- Pyrolýza

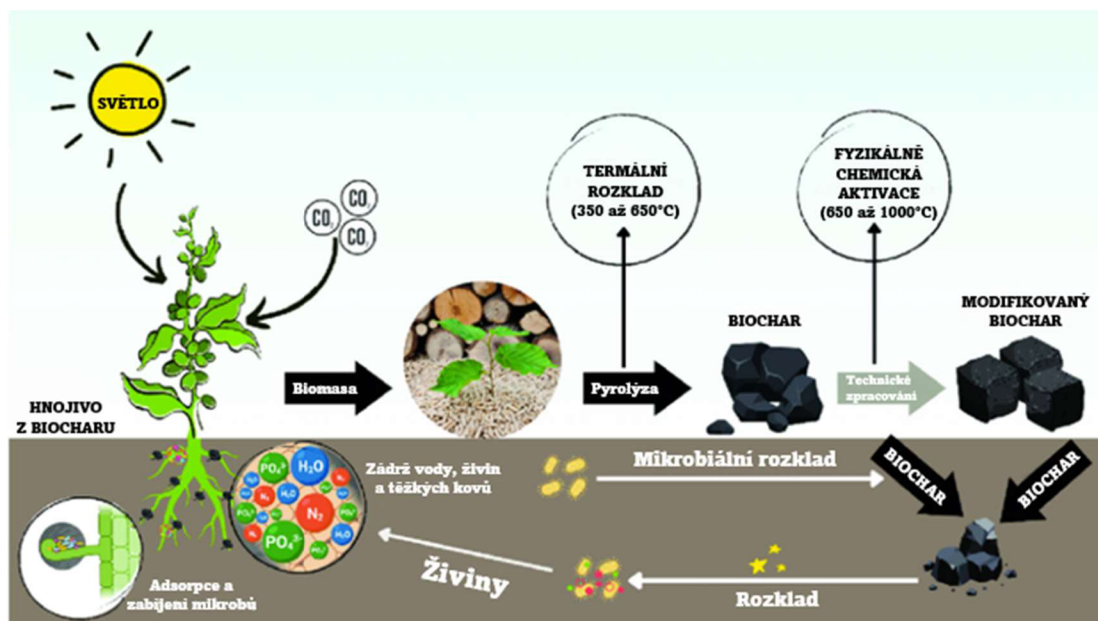
Pyrolýza neboli tepelný rozklad organického materiálu (viz obrázek 13), se provádí za nepřístupu oxidačního media a za zvýšené teploty (Capodaglio a kol, 2016). Pyrolýza produkuje kromě tuhého uhlíkatého zbytku (biochar) také kondenzovanou kapalinu v podobě biooleje a pyrolýzní plyn (Lehmann, 2007). Distribuce výtěžku závisí na zvoleném typu pyrolýzního procesu. Podle dosažených teplot lze pyrolýzu rozdělit do tří skupin, rozlišujeme tedy nízkoteplotní pyrolýzu (pod 500 °C), středněteplotní pyrolýzu (rozmezí 500-800 °C) a vysokoteplotní pyrolýzu (nad 800 °C) (Staf, 2005). Pyrolýzu však můžeme dělit také podle doby zdržení na pomalou (stovky sekund), rychlou (jednotky až desítky sekund) a v poslední řadě na bleskovou (méně než 0,5 sekund) (Yadav a Jagadevan, 2019).

Zvolený typ pyrolýzní teploty při výrobě může zásadně ovlivnit vlastnosti biocharu (Weber a Quicker, 2018). Z tohoto důvodu se vždy hledá taková výrobní teplota, při které bude mít biochar co nejvhodnější parametry. Podle již zmíněné pyrolýzní teploty můžeme biochar rozdělit do tří skupin. Rozlišujeme tedy nízkoteplotní, středně-teplotní a vysoko-teplotní biochar. Jednotlivé skupiny mají své vlastní specifické vlastnosti a každá z nich má jisté výhody a nevýhody (Pohořelý a kol., 2019).

Nízko-teplotní biochar je vyráběn jednoduchou výrobní metodou při teplotách pod 500 °C (Srinivasan a kol., 2015). Jeho typickými vlastnostmi jsou nízká stabilita v půdě, malý povrch, nízká pH hodnota, vysoká kapacita výměny kationtů (KVK), vyšší výnos a v poslední řadě silná hydrofobnost, která se vyznačuje neochotou interagovat s vodou. Hydrofobicita je způsobena početným podílem alifatických skupin. Póry jsou obvykle ucpány primárními dehty. Ty se při tak nízkých teplotách nejsou schopny přeměnit z primárních dehtů na dehty terciární a kvartérní. Skládají se z takzvaného rozpustného uhlíku, který podporuje růst mikroorganismů v půdě. Půdní mikroorganismy jsou spolu s půdními živočichy důležitou součástí půdy. V půdě totiž zajišťují nepřetržitý tok energie a koloběh látek (Pohořelý a kol., 2019).

Dalším typem je středně-teplotní biochar, který byl kdysi považován za kompromisní variantu. Dnes je známo, že tento typ neobsahuje významné výhody nízkoteplotních nebo vysoko-teplotních variant biocharu (Pohořelý a kol., 2019).

Posledním typem je vysoko-teplotní biochar, který vzniká při teplotách nad 800 °C a jeho velkou výhodou je dlouhodobá stabilita v půdě (Sun a kol., 2017). Zároveň má oproti prvním výše uvedenému biocharu také vyšší vodní kapacitu, vyšší hodnotu pH a velkou vodní kapacitu (velký povrch). Vysoko-teplotní biochar má také nižší hydrofobnost, díky nižšímu počtu alifatických funkčních skupin. Sedmíhrádká s kolegy (2021) uvádí, že nejvhodnější procesní teplota pro výrobu biocharu se pohybuje okolo 600 stupňů Celsia.



Obrázek 13. Cyklus výroby biocharu, jeho modifikace a použití v půdě a mechanismus ochrany před chorobami (Castillo a kol., 2022)

- Torifikace

Torifikace neboli mírná pyrolýza je termochemický proces, který probíhá při teplotách 200-300 °C, při atmosférickém tlaku a inertní atmosféře. Torifikace není podle některých studií příliš vhodnou metodou pro výrobu biocharu, bez ohledu na vyšší výtěžnost produktu, a to z důvodu, že torifikovaná biomasa obsahuje stále významný podíl těkavých složek ze surové biomasy (Dhungana, 2011). Navíc poměr kyslíku k uhlíku (O/C) torifikované biomasy je menší než 0,4, což je v rozporu s evropskou certifikací biocharu. Z tohoto důvodu se samotný proces využívá spíše na předúpravu pro odstranění vlhkosti, k zhuštění biomasy a pro zlepšení vlastností biomasy (Mitchel a Elder, 2010).

- Hydrotermální karbonizace

Hydrotermální karbonizace se nazývá také jako mokrá pyrolýza, jelikož se provádí v roztoku biomasa a voda při teplotě 180-220 °C při vysokém tlaku po dobu několika hodin (Libra a kol., 2011). Podobně jako u pyrolýzy je pomocí hydrotermální karbonizace produkován pevný zuhelnatělý produkt (uhel), syntetický plyn, a to převážně CO₂ a směs biooleje a vody. Hlavní výhodou této technologie při výrobě biocharu je, že se na rozdíl od pyrolýzy vyhne energeticky náročnému procesu sušení, čímž se sníží také provozní náklady (Marsh a kol., 2006).

- Zplyňování

Při procesu zplyňování dochází ke změně organického materiálu na hořlavý plyn (Neubaur, 2013). Probíhá při teplotě 600-1200 °C a rychlosti ohřevu 50-100 °C za minutu. Na rozdíl od pyrolýzy se proces zplyňování provádí za přítomnosti kyslíku. Jak bylo již zmíněno primárně se tento proces využívá na výrobu syntetického plynu, namísto produkce biocharu. Podle některých studií, však existuje možnost, jak zplyňováním biochar přece jen vyrobit. Výtěžek biocharu je ovšem minimální (Lee a kol. 2019). Wang a Wang (2019) dokonce uvádí, že výsledný zuhelnatělý produkt z procesu zplyňování nesplňuje typické vlastnosti biocharu až na totožnou přítomnost nebezpečných uhlovodíků a alkalických těžkých kovů v jeho struktuře.

3.4.2 **Základní vlastnosti biocharu**

Vlastnosti biocharu závisí především na výběru vstupní suroviny a na podmínkách výrobního procesu. Z tohoto důvodu je nutné nejen kvantitativně, ale také kvalitativně pochopit závislosti a ovlivňující faktory, aby bylo možné zvolit co nejvhodnější podmínky pro výrobu biocharu s požadovanými vlastnostmi. Využití biocharu je velmi rozmanité, od výroby tepla a energie, čištění spalin, metalurgických aplikací, využití v zemědělství a při chovu zvířat, využití v stavebnictví až po použití v lékařství (Ahmadvand, 2018).

Ve snaze snížit emise skleníkových plynů si v posledních letech získal stále větší oblibu jako náhrada za nosiče fosilního uhlíku v několika z těchto aplikací (Weber a Quicker, 2018). Shackley a kolektiv (2012) uvádějí, že má biochar vhodné fyzikálně-

chemické vlastnosti pro bezpečné, a především dlouhodobé ukládání uhlíku v životním prostředí. Biochar aplikovaný do půdy může účinně sekvestrovat uhlík a zároveň může přispět k udržení nárůstu globální teploty.

Mezi další potenciální přínosy biocharu aplikovaného do půdy patří také celkové zlepšení půdní úrodnosti a produktivity plodin, zvýšení retence vody a živin v zemědělské půdě a v další řadě snížení emisí dalších skleníkových plynů vyskytujících se v půdě (Lehmann a kol., 2006). Kromě jeho využití při sekvestraci uhlíku a zkvalitňování půdy byl prokázán i jeho potenciál jakožto přírodního adsorbentu. Ten na sebe navazují škodlivé a chemické látky, které ohrožují životní prostředí. Ukázalo se, že různé druhy biocharů, které byly zároveň připraveny z odlišných vstupních surovin mají silnou sorpci vůči pesticidům a organickým kontaminantům (Inyang a kol., 2016).

3.4.3 Biochar a jeho užití v zemědělství

Využívání biocharu v zemědělství je známé již po dlouhá staletí (Lehmann, 2007). Biochar se používá v zemědělství převážně jako půdní přísada na bázi stabilizované organické hmoty za účelem zlepšování kvality, zdraví a produkční schopnosti zemědělských půd. Nicméně v případě že biochar dosahuje stále a vysoké kvality lze jej využít také ke krmení hospodářských zvířat (Schmidt a kol., 2021). Po přidání do půdy pomáhá udržovat vlhkost půdy, zvyšovat příjem živin a zvětšovat pórovitost (Lehmann a Joseph, 2009; Mukherjee a kol., 2014). Schopnost biocharu zadržovat vodu a živiny v půdě pomáhá rostlinám zvládat období sucha (Suliman a kol., 2017). Jeho vpravením do zemědělské půdy se také sekvestruje poměrně velké množství uhlíku, u kterého by jinak hrozilo, že se uvolní do atmosféry. Aplikace biocharu do půdy může tedy významně pomoci v boji proti rostoucímu skleníkovému efektu (Pohořelý a kol., 2019).

Dle Yanga a kol. (2016) můžeme pozitivní vlivy biocharu rozdělit do několika hlavních oblastí. Jedním z hlavních pozitivních vlivů je schopnost biocharu vytvářet přirozený rezervoár s pomalým uvolňováním a současně také schopnost sloužit jako zdroj dostupných živin. Biochar v půdě zlepšuje fyzikální a chemické vlastnosti půd, čímž se zvyšuje také dostupnost a obsah živin. Fyzikální a chemické vlastnosti půdy pak významně zabraňují zbytečným ztrátám živin z půdy v důsledku vyplavení. V poslední řadě pozitivně působí na půdní mikroorganismy, poskytuje jim bezpečný

úkryt a vytváří pro ně vhodné prostředí pro život. Přítomnost biocharu v půdě, jakožto stabilní organické hmoty společně s činností půdních mikroorganismů jsou důležitými předpoklady pro půdní úrodnost, optimální vlastnosti půdy a pro zvýšení dostupnosti živin.

3.4.4 Dostupné živiny v biocharu

Produkce biouhlu vede ke koncentraci živin, zejména fosforu (P), draslíku (K), síry (S) a hořčíku (Mg) přítomných v surovině. V důsledku toho má biochar velkou hodnotu jako hnojivo a může tak významně přispět k obnově a opětovnému využití rostlinných živin (Camps-Arbestain a kol. 2017). Celkový obsah živin v biocharu se značně liší. Do značné míry totiž závisí na elementárním složení vstupní suroviny a v menší míře i na pyrolýzních podmínkách (Zhang a kol., 2017). Dostupnost živin v biocharu souvisí s povahou složek, jejichž jsou součástí, a také s jejich sekvestrací v pórech (Kammann a kol., 2015).

Znalost množství dostupných živin obsažených v biocharu je zásadní pro posouzení jejich přínosu k úrodnosti půdy, zejména pokud je biochar přidáván do půdy společně s anorganickými hnojivy (Camps-Arbestain a kol. 2017). V biocharu je značné množství živin obsaženo buďto ve formě vodorozpustných nebo nerozpustných sloučenin, nicméně o uvolňování těchto živin do půdy je známo jen málo informací (Limwikrana a kol., 2018). Biochar obsahuje různé formy organického a anorganického dusíku a fosforu (dusičnan, amonium, orthofosforečnan, amidové skupiny) (Jindo a kol., 2014).

Kromě toho se dostupnost makroživin, jako je dusík a fosfor a stejně tak dostupnost některých kovových iontů, jako je například vápník a hořčík bude lišit v souvislosti na využití surovin biocharu při jejich začlenění do půdy (Major a kol., 2010). Například biochar bohatý na živiny vyrobený z rostlinných zbytků má obecně vyšší obsah živin než biochar vyrobený z lignocelulóзовých surovin. Výrobní teplota může ovlivnit formu dusíku v biocharu, kdy biochar vyrobený při vyšších teplotách obsahuje více NO_3^- (dusičnan), zatímco biochar produkovaný při nižších teplotách obsahuje více NH_4^+ (amonium) (DeLuca a kol., 2014). Konzervace hnojiv v biocharu nesouvisí pouze s jeho porézní strukturou, ale také s jeho adsorpčními vlastnostmi a předpokládá se, že lepší využití živin rostlinami je podporováno adsorpcí živin. Jako

příklad lze uvést adsorpční kapacitu pro dusík (N) a fosfor (P), kterou biochar zvyšuje díky své struktuře pórů a dobře vyvinutému specifickému povrchu (Yu a kol., 2018).

V této souvislosti Bruun a kolegové (2012) zjistili, že biochar může ovlivnit mineralizaci a imobilizaci půdního dusíku. V případě čerstvého pyrolýzního biocharu je imobilizováno až 43 % půdního dusíku, zatímco v případě pomalé pyrolýzy biocharu je mineralizováno 7 % dusíku v upravené půdě. V případě rychlého pyrolýzního biocharu jsou ztráty uhlíku podstatně vyšší a mají silnější dopad na půdní mikrobiální společenstva. Při aplikaci do půdy je biochar rovněž považován za zdroj rozpustného fosforu (Parvage a kol., 2013).

Během procesu pyrolýzy biochar asimiluje fosfor a další přeměna vede k obohacení biocharu o fosfor (Rehman a kol., 2018). Aplikace biocharu do půdy snižuje sorpční kapacitu fosforu a umožňuje rostlinám přijímat dostupný fosfor půdním roztokem (Qayyum a kol., 2015). Přídavek biocharu v množství přibližně 10 tun na hektar zemědělské půdy poskytuje rostlinám velké množství základních živin. To je zvláště důležité v ekologickém zemědělství, kde je užívání chemických hnojiv zakázáno (Oshunsanya a kol., 2016). Liang a kolegové (2014) naznačují, že aplikace biocharu společně se statkovými hnojivy je pro zemědělství daleko přínosnější než pouhé přidávání jednotlivých půdních doplňků zvláště a také značně snižuje náklady na aplikaci.

3.4.5 Negativní atributy biocharu

Přestože je biochar považován za remediální prostředek pro zlepšení kvality půdy, existuje mnoho environmentálních aspektů, které je třeba vzít v úvahu při jeho využívání. První problém nastává při samotném výrobním procesu, kdy během procesu pyrolýzy biocharu vznikají značné emise oxidu uhličitého (CO₂), které mohou být následkem zvýšení skleníkových plynů (GHG) v ovzduší (Spokas a kol., 2009).

Druhý podstatný problémem souvisí s degradací biocharu v zemědělské půdě, při které dochází ke ztrátě půdní úrodnosti. Podle studií bylo prokázáno, že vlivem biocharu byla v některých klimaticky teplejších oblastech naměřena vysoká degradace půdy. Půdy, které byly ošetřeny biocharem, by tak mohly vytvářet další emise skleníkových plynů (Lyu a kol., 2016).

Další problém se týká ethanolu (C_2H_6O), který vzniká jako vedlejší produkt při procesu pyrolýzy biocharu (Spokas a kol., 2009).

3.4.6 Využití půdních aditiv k úpravě půdních vlastností

Za půdní aditivum označujeme takovou látku, která může pozitivně ovlivnit fyzikální a chemické vlastnosti půdy. Tyto změny mohou přispět ke zlepšení zadržování vody v půdě, zvýšení výnosů plodin, ochraně proti erozi a uchování uhlíku v půdě (Břendová a kol., 2014). Kalina (2005) zdůrazňuje, že pro získání kvalitního konečného produktu, je nezbytné aplikovat přídatek do půdy. Kromě biocharu může být půdním aditivem také běžné půdní hnojivo (Břendová a kol., 2014).

Biochar má schopnost efektivně zadržovat vodu a živiny v půdě, což brání jejich unikání do okolí a poskytuje rostlinám potřebné živiny (Yang a kol., 2016). Spojení biocharu s dalšími půdními přísadami, jako je hnůj nebo kompost, zvyšuje jeho účinnost díky synergii s těmito doplňky. Tato symbióza zajišťuje okamžitý nárůst účinnosti po aplikaci do půdy (Liu a kol., 2012).

Pro účely tohoto experimentu byl biochar smíchán s organickým hnojivem obsahujícím směs kravských výkalů a podestýlky. Tato kombinace byla zkoumána s cílem analyzovat synergický účinek biocharu a organického hnojiva na vlastnosti půdy a růst cukrové řepy.

Spojení biocharu s organickými hnojivy má pozitivní dopad na životní prostředí. Tato kombinace pomáhá minimalizovat negativní účinky nadměrného používání anorganických hnojiv a zároveň zvyšuje potencionální hodnotu biocharu. Propojení biocharu a organických hnojiv zvyšuje aktivitu půdních mikroorganismů a enzymů, což vede k vylepšení fyzikálních i chemických vlastností půdy. Je důležité zajistit, aby směs biocharu a hnoje pronikla do hloubky, kde rostliny koření. U některých rostlin je možné směs pouze přihodit na povrch. Dále je vhodné přidávat biochar do půdy postupně v průběhu několika let (Fanish, 2017).

Organická hnojiva jsou klíčovým prvkem pro udržení trvalé úrodnosti půdy a nedají se ničím nahradit (Kalina, 2005). Hnůj je důležitým materiálem bohatým na živiny, který pomáhá zlepšovat úrodnost půdy a zvyšuje výnos a kvalitu produkce (Soetan a kol., 2010).

Rostliny potřebují vyváženou výživu pro svůj zdravý růst, a aplikace organických hnojiv je jedním ze způsobů, jak jim poskytnout potřebné živiny ve snadno dostupné formě. Hnojení je klíčovým prvkem pro dosažení optimálního výnosu a kvality plodin. Když rostlinám chybí živiny v půdě, nedosahují dostatečné produkce a kvality, a dochází k poklesu obsahu důležitých látek jako jsou výživové a energetické látky, makroživiny a mikroživiny (Graham a kol., 2001).

Je však důležité zmínit, že vliv na produktivitu rostlin závisí na správném množství aplikovaného biocharu (Kammann a kol., 2016) a hnoje. Proto je nezbytné pečlivě kontrolovat dávkování těchto látek, abychom předešli negativním účinkům.

4 Metodika

4.1 Charakteristika vybrané zemědělské plodiny

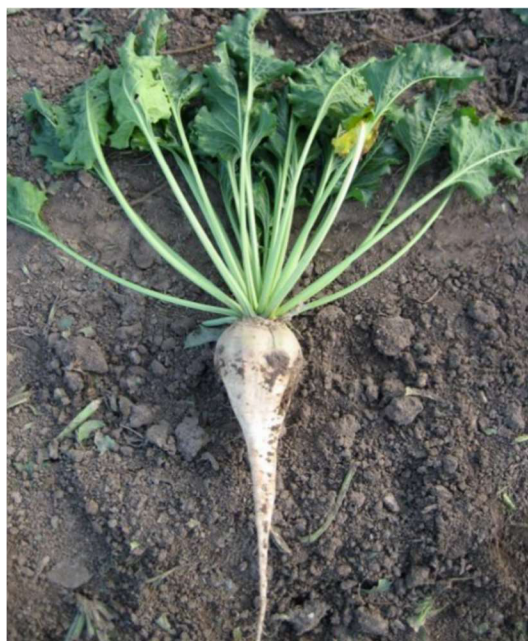
4.1.1 Cukrová řepa (*Beta vulgaris var. altissima*)

Dostupné informace naznačují, že nejstarší druh řepy byl pravděpodobně pěstován, jako zahradnická plodina na Sicílii již 2 tisíce let před naším letopočtem. V antickém Řecku a Římě se řepa pěstovala dokonce jako léčivá plodina. Do našich zemí byla cukrová řepa poprvé dovezena z Francie, a to konkrétně z oblasti Burgundska, kde byla pěstována, jako krmivo pro hospodářská zvířata. Využití cukrové řepy, jakožto technické plodiny začalo zhruba před 200 lety (Jůzl a kol., 2000). Je považována za jednu z nejmladších kulturních plodin. Pěstování cukrové řepy pro produkci cukru začalo na území Čech a Moravy v období kolem roku 1831 (Švachula a kol., 2006). Cukrová řepa má široké využití. Používá se jak v cukrovarnickém průmyslu a v průmyslových odvětvích, která zpracovávají produkty z cukru (např. melasový líh), tak také jako krmivo pro hospodářská zvířata poskytující řepný chrast, řepné řízky a v poslední řadě řepnou melasu (Hamerník 1960). V současné době má velký význam zpracování cukrové řepy na bioetanol a bioplyn (Pulkrábek a Šroller, 1993). Cukrová řepa patří mezi plodiny s nejvyššími energetickými výnosy, oproti ostatním plodinám produkuje největší množství živin a sušiny, zdaleka tak předčí například obilí nebo brambory (Hamerník 1960). Chemické složení cukrové řepy významně ovlivňuje technický proces získávání cukru a určuje nejen výnos cukru, ale také výtěžnost řepné melasy. Zároveň je silně ovlivněno půdními podmínkami (např. půdním škraloupem, strukturou, salinitou nebo zhutněním půdy), použitou zemědělskou technologií, výběrem odrůdy, množstvím hnojiv a mnoha dalšími faktory. Cukrová řepa je nejdůležitějším biologickým zdrojem pro výrobu sacharózy, která je tvořena molekulami glukózy a fruktózy. V cukrové řepě se koncentrace sacharózy pohybuje většinou mezi 15 % až 18 %. Sacharóza je opticky aktivní, přičemž rotačním pohybem otáčí rovinu polarizovaného světla směrem doprava o zhruba 66,54°. Vlivem sacharidů je ve šťávě v malém množství přítomen invertovaný cukr (ekvimolární směs glukózy a fruktózy) a také rafinóza (trisacharid skládající se z galaktózy, glukózy a fruktózy), která je obsažena především v řepné melase (Pelikán a kol., 1999).

Cukrová řepa (viz obrázek 14) je dvouletá zemědělská plodina z čeledi laskavcovitých, která se řadí mezi nejdůležitější pěstované okopaniny (Pulkrábek a kol., 2007). Z biologického hlediska se cukrová řepa řadí mezi opakovaně plodící

rostliny, vytvářející jednoplodící stonky. Prvním rokem vytváří podzemní zásobní kořen (bulvu).

Bulva se skládá z hlavy (epikotyl), krku (hypokotyl) a z vlastního kořene (radix). Druhým rokem vegetace pak vytváří listovou růžici na zmiňované hlavě bulvy (Diviš a kol., 2000). Po opadu děložních listů rostou takzvané pravé listy sestavené ve spirále. Během vegetace se tvoří zhruba 44 až 55 listů, se silnými stonky a silně zvlněnou čepelí (Jůzl a kol., 2000). Řapíkaté listy mají jasně zelenou barvu. Cukrová řepa dorůstá do výšky až 100 cm (Diviš a kol., 2000). Je velmi náročnou plodinou na pěstování. Negativní vliv na její správný vývoj mají nejen škůdci a choroby, ale také nepříznivé počasí. Je citlivá zejména na sucho, vysoké sluneční záření a vysoké mrazy (Urban, 2013). Nejvýznamnějšími škůdci a chorobami cukrové řepy jsou maločlenec čárkovitý, dřepčik řepný, dřepčik rdesnový, květilka řepná, mšice, háďátko řepné, spála řepná, virová žloutenka, skvrničnatka řepná, padlí řepné, plíseň řepná, ramularie, fóma a rizomanie (Pulkrábek a kol., 2007). Pro svůj zdárný růst potřebuje nejen kvalitní půdu ale také dostatečné množství srážek (Urban, 2013). Při vodním stresu rostliny podléhají adaptačním změnám v metabolismu bílkovin a aminokyselin. V důsledku vodního deficitu následně nedochází ke zvyšování sacharózy v hlízách. Vodní stres také značně brzdí růst cukrové řepy a ovlivňuje její produktivitu. Rostliny pak rychleji stárnou, zvyšuje se poměr kořenů k listům, dochází k uzavírání průduchů, omezuje se výměna plynů a zároveň se snižuje celková technická kvalita sklizených hlíz (Prugar a kol., 2008).



Obrázek 14. Cukrová řepa (Agrobiologie, ©2023)

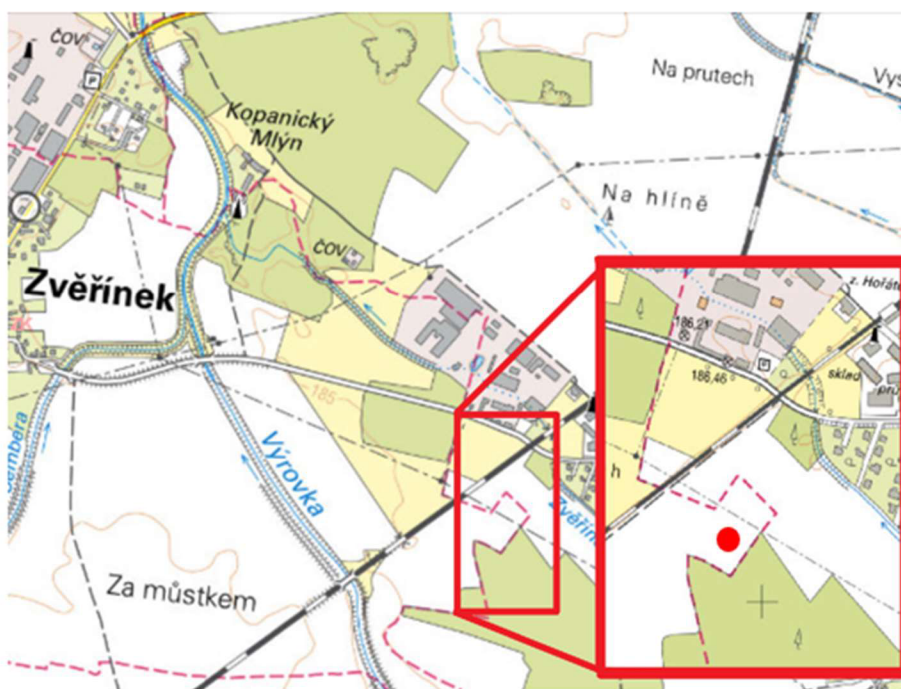
4.2 Půda a bioaditiva

Pro tento experiment byla zvolena zemědělská Regozem odebraná na farmě Noll v blízkosti obce Zvěříněk, Česká republika (viz obrázek 15). Jedná se o minerálně chudý půdotvorný substrát, který vzniká ze sypkých sedimentů, jako je například písek. Díky jeho zrnitosti a minerální síle velmi kolísá obsah živin a kvalita humusu.

Z agronomického chovu ve Zvěřínku byl dále pro účely tohoto experimentu sbírán hnůj (M), který byl vybrán jako běžné organické hnojivo. Hnůj byl směsí kravských výkalů a podestýlky a byl smíchán se zemědělskou regozemí.

Půdní přísada v podobě biocharu (B) byla vyrobena pomocí zplyňování. V termochemickém procesu gasifikace byly použity surové dřevěné štěpky s vysokou počáteční vlhkostí. Technologie zplyňování probíhala ve vícestupňovém zplyňovacím generátoru s pevným ložem.

Následně byla s obou komponentů vytvořena směs (MB) v poměru 90 % hnoje a 10 % biocharu v sušině. Aby spolu hnůj a biochar dobře reagovaly byla jejich směs důkladně promíchána a poté ponechána po dobu 1 měsíce zcela v klidu. Po uplynutí jednoho měsíce byla tato směšná úprava (MB) společně s biocharem (B) a hnojem (M) usušena, proseta a připravena na jejich následné použití.



Obrázek 15. Vybraná lokalita (ČÚZK, 2023)

4.3 Popis experimentu

4.3.1 Skleníkový experiment s cukrovou řepou

V rámci projektu „Dlouhodobý test aplikace biocharu do zemědělské půdy“ byl založen nádobový pokus v klimatizovaném skleníku (viz obrázek 16). Několikaměsíční experiment probíhal v areálu Ústavu experimentální botaniky AV ČR.



Obrázek 16. Klimatizovaný skleník v ÚEB AV ČR

Za účelem zkoumání fyziologických parametrů byla vybrána jedna odrůda cukrové řepy, jakožto pěstitelsky náročná plodina citlivá zejména na sucho. Jak bylo již zmíněno, pro testování byla zvolena zemědělská Regozem (Zvěřinec). Jelikož byla zvolena taková půda, která snižuje schopnost zadržovat vodu a zároveň obsahuje nevalné množství organické hmoty byl k ní za účelem zlepšení fyzikálních vlastností půdy přimíchán biochar (biouhel – B) v kombinaci se statkovým hnojem (hnůj – M) (viz tabulka 4), a to ve dvou odlišných dávkách 2% a 5% hmotnostně.

Tabulka 4. Použité přísady

	Popis
B	Biochar
M	Hnůj
MB	Kombinace biocharu a hnoje

Bylo testováno sedm úprav půdy, tedy neošetřená Regozem (kontrola – C), Regozem s přimíchaným 2% nebo 5% biocharem (B2, B5), Regozem ošetřená aplikací 2% a 5% hnojem (M2, M5) a v poslední řadě Regozem do které byl přidán biochar v kombinaci se statkovým hnojem v poměru 1:10 v/v (MB2, MB5). Takto předem připravené směsi byly vloženy do litrových nádob. Vzniklo tak sedm variant v podobě C, B2%, B5%, M2%, M5%, MB2% a MB5%, každá v pěti replikách (viz tabulka 5 a obrázek 17).

Tabulka 5. Experimentální design

Varianta	Popis
C	Regozem neošetřená (kontrola)
B2	Regozem ošetřená 2% biocharem
B5	Regozem ošetřená 5% biocharem
M2	Regozem ošetřená 2% hnojem
M5	Regozem ošetřená 5% hnojem
MB2	Regozem v kombinaci s 2% biocharem a hnojem
MB5	Regozem v kombinaci s 5% biocharem a hnojem



Obrázek 17. Testované varianty

Do každého květináče bylo následně vloženo pět semen cukrové řepy. Počet rostlin byl po vyklíčení snížen na dva kusy. Do jednotlivých květináčů byly instalovány vlhkostní senzory FDR 5TM (Decagon, USA), díky kterým bylo možné v průběhu experimentu sledovat vlhkost půdy. Po dobu čtyřměsíčního experimentu probíhala pravidelná zálivka, která byla rozdělena na tři fáze. Během prvních devíti týdnů probíhalo pravidelné zavlažování dvakrát týdně se 100 ml vody. Následující tři týdny byla zálivka zredukována na 25 ml vody. Před ukončením experimentu po dobu cca čtyř týdnů byla zálivka opět navýšena na 75 ml vody.

4.4 Sklizeň rostlin

Samotná sklizeň rostlin cukrové řepy (viz obrázek 18) byla provedena na konci období rehydratace. Následně byly sklizené rostliny omyty destilovanou vodou, aby byly odstraněny všechny půdní částice. Takto omyté rostliny byly zváženy na laboratorních vahách (Ohaus Adventurer Pro) v čerstvém stavu a byly stanoveny hmotnosti hlíz a listů jednotlivě pro každou rostlinu. Materiál byl pomocí procesu lyofilizace usušen a poté důkladně uschován až do biochemické analýzy.



Obrázek 18. Sklizeň rostlin

4.5 Chemická analýza rostlin

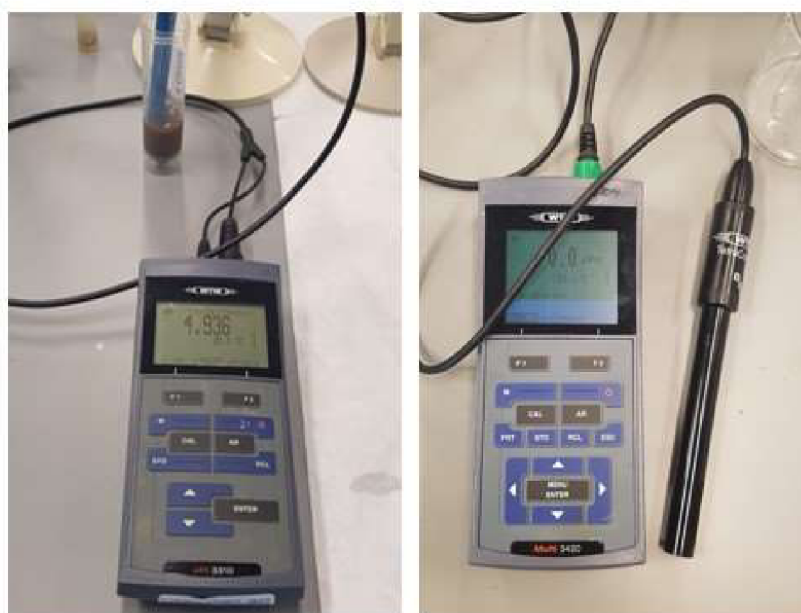
Po dokončení sklizně byly jednotlivé části rostlin (listy a hlízy) analyzovány na obsah živin (N, P, K, Na, S, Mg, Ca a C) a obsah cukru. Obsah dusíku (N) v rostlinném materiálu byl stanoven pomocí elementárního analyzátoru CHNS Vario MACRO. Pro stanovení ostatních obsahů živin byla použita vysoce oxidační směs Aqua regia (Lučavka královská). Jedná se o směs koncentrované kyseliny dusičné (HNO_3) a kyseliny chlorovodíkové (HCl), ve které byly vzorky vyluhovány v poměru 1:3 (V/V). Směs byla zahřívána 35 minut v mikrovlnném systému při vysoké teplotě 210 °C.

4.6 Chemická analýza půdy

Jak bylo již zmíněno po celou dobu nádobového experimentu (4 měsíce) byla monitorována vlhkost půdy pomocí senzorů půdní vlhkosti. Do každého květináče byl vložen jeden senzor (FDR 5TM), který detekoval procentuální obsah vody v půdě. Zároveň byl odebírán půdní roztok. Vzorkování půdního roztoku bylo provedeno pomocí Rhizon vzorkovačů (Eijkelkamp) s konektorem pro připojení injekční stříkačky (viz obrázek 19). Odebrané vzorky byly následně testovány na pH a elektrickou vodivost (EC). Měření pH hodnot probíhalo na pH metru 3310 a elektrická vodivost byla měřena pomocí multimetru Multi 3420 (viz obrázek 20). Měření celkových obsahů uhlíku (C) a dusíku (N) bylo prováděno pomocí elementárního makroanalyzátoru CHNS Vario MACRO (analyzátor uhlíku, vodíku a síry). Stejným způsobem byl stanoven také obsah dusíku (N) v rostlinném materiálu. Analýza rozpuštěného organického uhlíku byla provedena pomocí analyzátoru celkového organického uhlíku TOC-L CPH/CPN a analyzátoru segmentovaného toku TNM-L od značky Shimadzu. Pro stanovení dusičnanů (NO_3), síranů (SO_4) a fosfátů (PO_4) byl použit iontový chromatografický systém Dionex ICS-5000. V závěru byly měřeny koncentrace makroživin a to draslíku (K), hořčíku (Mg), sodíku (Na) a vápníku (Ca) pomocí spektrometru ICP-EOS 720 ES.



Obrázek 19. Zabudovaný vlhkostí senzor a rhizon vzorkovač



Obrázek 20. pH metr 3310 a multimetr Multi 3420

- **ICP – EOS = Atomová optická spektrometrie**

Jedná se o citlivou metodu optické emisní spektrometrie s indukčně vázanou plazmou, která se využívá především k víceprvkové analýze minerálních extraktů a organických hnojiv (Zbíral, 2020). Umožňuje rychlé a účinné stanovení koncentrace prvků ve vzorku (Lech a Lachowicz, 2009). Hlavní výhodou této metody je možnost stanovení až 70 prvků současně (Otruba, 2015).

Metoda je založena na měření charakteristického záření emitovaného atomy a ionty při přechodu z excitovaného stavu do stavu základního. Pro vyvolání plazmového výboje se využívá krátkodobý samostatný jiskrový výboj. V plazmovém výboji následně částice dosahují potřebné energie, kterou získávají z vnějšího zdroje. Zdrojem energie je v tomto případě elektromagnetické pole generované pomocí indukční cívky s několika závitů, které jsou napojeny na vysokofrekvenční ICP generátor. Frekvence generátoru je ve značné míře zodpovědná za vlastnosti výboje, jako je například teplota a také za poměry intenzit atomových a iontových čar (Otruba, 2015).

Emisní spektrometrie se využívá především k analýze roztoků. Homogenní směs (vzorek) je pomocí peristaltického čerpadla (pumpy) s pružnou silikonovou hadičkou přečerpána do rozprašovače. Silikonová hadička čerpadla je napojena na sací kapiláru s filtrem pevných částic, který zachytává drobné částice. Směs je poté převedena do ICP výboje, a to v podobě aerosolu. Následně se aerosol společně s pracovním plynem neboli argonem (Ar) mísí v mlžné komoře odkud je dále přenesen do plazmové hlavice ICP. Právě celkový průtok argonu (10–15 l/min) je nezbytný pro vytvoření podmínek k iniciaci a udržení stabilního výboje (Otruba, 2015).

Na začátku měření je velmi důležitá laboratorní příprava vzorků k analýze a stejně tak příprava takzvaného slepého vzorku (Blank), který slouží k podchycení a minimalizaci vlivů cizích a nepatrně působících činitelů na konečný výsledek měření (Zbíral, 2020). Před použitím optického emisního spektrometru musí být všechny vzorky rostlinného materiálu nejprve mineralizovány (Bartoš a kol., 2004).

4.7 Stanovení dostupných živin v půdě podle extrakční metody Mehlich 3

Pro stanovení obsahu přístupných živin v půdě (P, K, Ca, Mg, S, Na) bylo použito extrakční činidlo Mehlich III (viz tabulka 6). Do uzavíratelných extrakčních nádob o objemu 50ml byly na technické váze (Mettler Toledo) (viz příloha 6) naváženy 3 gramy upravených půdních vzorků C, B2%, B5%, M2%, M5%, MB2% a MB5% (viz příloha 7). Následně bylo pomocí manuálního dávkovače přidáno 30 ml extrakčního roztoku Mehlich III (viz příloha 8). Po uzavření nádob byly vzorky půdy umístěny na horizontální třepačku (GFL 3005) (viz příloha 9) a extrahovány po dobu 10 minut. Po extrakci byla suspenze přefiltrována přes hustý filtrační papír (Papírna Perštejn spol. s r.o.) (viz obrázek 21 a příloha 10).

Tabulka 6. Obsah extrakčního činidla Mehlich III.

Extrakční činidlo Mehlich III	
CH ₃ COOH	Kyselina octová
NH ₄ F	Fluorid amonný
HNO ₃	Kyselina dusičná
NH ₄ NO ₃	Dusičnan amonný
EDTA	Organická sloučenina kyseliny ethylendiamintetraoctové

Příprava extrakčního činidla:

Na 2000 ml - 40 g NH₄NO₃

- 80 ml zásobního roztoku: 6,95 g NH₄F + 3,67 g EDTA do 500 ml H₂O

- 23 ml CH₃COOH

- 1,6 ml HNO₃

+ destilovaná voda



Obrázek 21. Metoda Mehlich III.

4.8 Stanovení obsahu sacharidů metodou HPLC

Pro stanovení obsahu monosacharidů a disacharidů, jako je sacharóza (řepný cukr), fruktóza (ovocný cukr) a glukóza (hroznový cukr) v hlízách cukrové řepy byla použita chromatografická metoda HPLC. Do 100 ml laboratorní varné baňky bylo naváženo 2,5 g zlyofilizovaného rozmixovaného vzorku. Následně byl vzorek smíchán s 50 ml 80 % ethanolu (C_2H_6O). Po smíchání byla baňka uzavřena pomocí termoplastické krycí fólie. Takto připravená směs se promíchala a byla ponechána po dobu 30 minut na orbitální třepačce zhruba při 150 otáčkách za minutu. Vzniklá homogenní směs byla přefiltrována přes nylonové síto o průměru 11 cm a přemístěna do skleněné kádinky. V dalším kroku bylo pomocí rotačního výparníku odpařeno 25 ml supernatantu při teplotě 25 °C po dobu 20 minut. Výsledný odparek byl rozpuštěn v 5 ml deionizované vody a byla provedena mikrofiltrace. Po mikrofiltraci byla směs převedena do uzavíratelné sterilní nádoby. V závěru byla přidána kapka isopropylalkoholu (C_3H_8O) jako konzervační činidlo. U každého vzorku proběhla tři opakování.

4.9 Zpracování dat

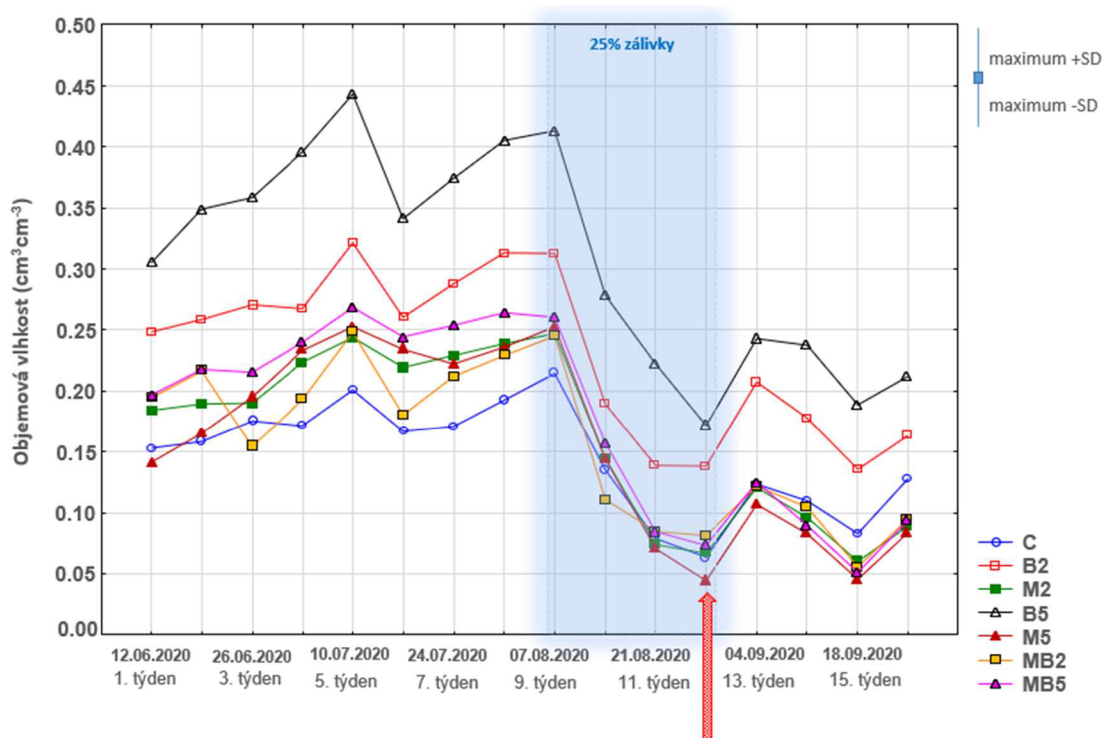
Data v práci byla analyzována pomocí jednorozměrných i mnohorozměrných analýz. Charakteristika jednotlivých experimentálních ošetření půdy (treatmenty) byla provedena pomocí PCA, kdy byla ošetření rozdělena dle chemického složení vody v půdních pórech. U jednorozměrných analýz byly závislé proměnné biomasa, obsahy měřených makro a mikroživin a cukrů. Jako nezávislá proměnná bylo použito ošetření půdy. Analýza byla provedena pomocí modelů ANOVA či GLM s Gamma rozdělením závislé proměnné. Testy mnohonásobného srovnání byly provedeny pomocí Tukeyho HSD testu nebo Dunettova testu ošetření proti kontrole. Druhá mnohorozměrná analýza (RDA) byla provedena pro zjištění závislosti obsahu cukrů na ošetření půdy (jednotlivé treatmenty). Data byla zpracována v programu Statistica[©], R a Canoco[©].

5 Výsledky

5.1 Parametry půdy

5.1.1 Změna půdní vlhkosti

Z dosažených výsledků vlhkostních senzorů (FDR) (viz příloha 1) vyplývá že, během prvních devíti týdnů pravidelné zálivky měla varianta B5 (Regozem ošetřená aplikací 5% biocharu) nejvyšší obsah vody a to kolem $0,30\text{--}0,45\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, za níž následovala skupina B2 (Regozem ošetřená aplikací 2% biocharu) s obsahem vody kolem $0,25\text{--}0,35\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, zatímco ostatní testované varianty vykazovaly obsah vody kolem $0,15\text{--}0,25\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (graf 1). Když byly rostliny vystaveny nedostatku vody (modrý sloupec na grafu 1), došlo k celkovému snížení obsahu vody v půdě. Skupiny B2 a B5 si však dokázaly udržet hodnoty až do $0,15\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, které byly v porovnání s ostatními zkoumanými variantami podstatně vyšší. Obsah vody klesal po celou dobu sucha až do zahájení rehydratace (12. týden), kdy se obsah vody v půdě stabilizoval nebo začal opět stoupat. Žádná varianta s přidavkem hnoje neprokázala výrazné zvýšení obsahu vody v půdě ve srovnání s kontrolní variantou (C) po dobu celého experimentu.



Graf 1. Průběh půdní vlhkosti během experimentu pro jednotlivá ošetření. Modrý sloupec označuje období snížené zálivky pouze na 25 % a červená šipka ukazuje čas, kdy byla provedena fyziologická analýza rostlin. Uvedená data jsou průměry z 5 opakování; každý týden zobrazuje průměrnou hodnotu všech dat, která byla kontinuálně zaznamenána během týdne pro jednotlivá ošetření.

5.1.2 Chemické složení vody v půdních pórech

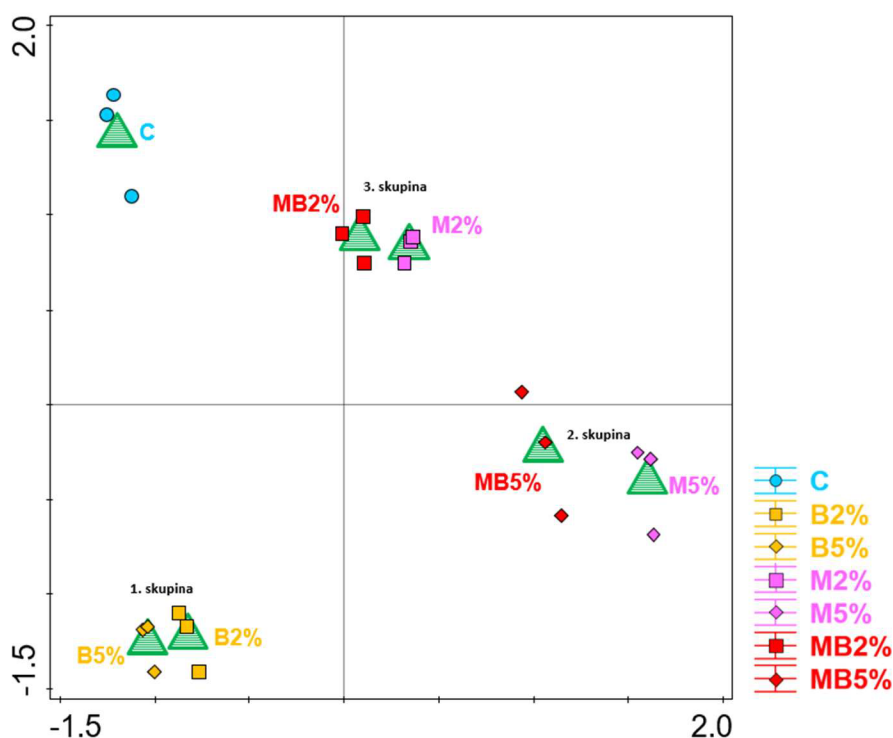
Půdní roztok byl odebrán pomocí rhizonů (Eijkelkamp, NED) před zahájením vodního stresu, aby bylo možné získat dostatečný vzorek pro vyhodnocení vlivu změn na chemické vlastnosti půdy (viz Tabulka 7 a příloha 2). Výsledky ukázaly, že aplikace doplňků zvýšila hodnotu pH, elektrickou vodivost (EC), koncentraci síranů (SO_4^{2-}) a také koncentraci sodíku (Na). Biochar bez přídavku hnoje snížil celkový obsah labilního dusíku (TN), koncentraci dusičnanů (NO_3^-) a fosforečnanů (PO_4^{3-}), celkový obsah uhlíku (TC) v půdním roztoku, obsah rozpuštěného organického uhlíku (DOC) a draslíkových iontů (K^+) a v poslední řadě také koncentrace iontů hořčíku (Mg^{2+}) a vápníku (Ca^{2+}), zatímco ošetření obsahující hnůj tyto parametry zvýšila.

Tabulka 7. Charakteristiky vody v půdních pórech pro jednotlivá ošetření měřené na začátku experimentu, průměr \pm SD.

	C	B2	B5	M2	M5	MB2	MB5
pH (-)	4,57 \pm 0,23	5,73 \pm 0,01	6,73 \pm 0,14	5,57 \pm 0,03	6,32 \pm 0,28	5,24 \pm 0,06	6,28 \pm 0,27
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	783 \pm 3	1015 \pm 32	875 \pm 18	1413 \pm 88	2117 \pm 87	1518 \pm 163	1824 \pm 117
TN (mg/l)	63,4 \pm 3,6	51,3 \pm 4,5	25,4 \pm 2,8	142 \pm 5	203 \pm 5	127 \pm 4	150 \pm 5
NO_3 (mg/l)	6,63 \pm 1,00	16,8 \pm 0,9	1,91 \pm 0,66	28,5 \pm 1,9	54,1 \pm 2,9	4,98 \pm 0,05	13,6 \pm 1,0
PO_4 (mg/l)	1,55 \pm 0,10	1,16 \pm 0,04	0,60 \pm 0,05	5,56 \pm 0,07	7,46 \pm 0,14	4,45 \pm 0,27	6,53 \pm 0,21
SO_4 (mg/l)	169 \pm 19	279 \pm 8	229 \pm 6	188 \pm 3	278 \pm 6	187 \pm 6	258 \pm 9
TC (mg/l)	33,8 \pm 2,4	22,8 \pm 0,6	28,1 \pm 0,3	113 \pm 2	171 \pm 5	128 \pm 1	190 \pm 4
DOC (mg/l)	31,9 \pm 1,9	21,2 \pm 1,0	11,9 \pm 0,4	111 \pm 4	167 \pm 7	112 \pm 4	154 \pm 9
K (mg/l)	5,97 \pm 0,19	1,64 \pm 0,13	2,11 \pm 0,75	76,1 \pm 9,4	288 \pm 21	67,7 \pm 4,0	210 \pm 14
Mg (mg/l)	17,3 \pm 0,9	10,8 \pm 0,7	12,7 \pm 0,6	30,3 \pm 0,04	31,6 \pm 3,4	23,3 \pm 2,8	31,6 \pm 1,4
Na (mg/l)	36,9 \pm 0,1	87,5 \pm 5,0	78,9 \pm 2,2	89,7 \pm 0,7	104 \pm 4	91,8 \pm 3,3	108 \pm 7
Ca (mg/l)	73,6 \pm 1,2	69,4 \pm 3,6	67,4 \pm 4,1	82,6 \pm 6,2	97,2 \pm 5,2	121 \pm 0,2	85,9 \pm 4,7

Kromě odběru půdního roztoku byla provedena také analýza hlavních komponent (PCA), aby bylo možné zhodnotit, jak se jednotlivá ošetření liší v závislosti na vlastnostech půdy (graf 2). Výsledky ukázaly, že upravená ošetření se odlišovala od kontrolní varianty (neošetřená Regozem). Varianty s přídavkem hnoje se podél první osy výrazně lišily od variant obsahujících pouze biochar. Upravená ošetření byla rozdělena do tří skupin. První skupinou bylo ošetření pouze s přídavkem biocharu (varianty B2 a B5), které se vyznačovalo nejvyššími hodnotami pH a snížením obsahu fosforečnanů (PO_4^{3-}), celkového uhlíku (TC), rozpuštěného organického uhlíku (DOC), iontů draslíku (K^+), iontů hořčíku (Mg^{2+}) a vápníku (Ca^{2+}). Druhou skupinou bylo ošetření s 5% přídavkem hnoje (varianty M5 a MB5), které bylo charakterizováno

nejvyššími hodnotami v obsahu elektrické vodivosti (EC), celkového dusíku (TN), fosforečnanů (PO_4^{3-}), celkového uhlíku (TC), rozpuštěného organického uhlíku (DOC), iontů draslíku (K^+) a obsahu sodíku (Na). Poslední skupinou bylo ošetření s 2% přídatkem hnoje (varianty M2 a MB2), které vykazovalo střední hodnoty. Nakonec nebyl zjištěn žádný významný rozdíl mezi dvěma aplikačními dávkami biocharu (2%, 5%), zatímco ošetření s 5% hnojem mělo vyšší hodnoty měřených parametrů než ošetření s 2% přídatkem hnoje. Dodatečná aplikace biocharu neměla žádný další vliv na sledované parametry (nebyl rozdíl mezi M2 a MB2 a mezi M5 a MB5).



Graf 2. Charakteristiky eluce půdy a jednotlivá ošetření (projektované jako doplňkové proměnné) rozdělené analýzou PCA. Vlastní hodnoty jsou 0,707 pro první osu a 0,169 pro druhou osu. Pozice jsou zobrazeny jako korelační koeficienty. Střední hodnoty pro ošetření jsou zobrazeny jako trojúhelníky směřující nahoru, měření jsou označena symboly podle legendy.

5.2 Reakce rostlin na vodní stres a změny

5.2.1 Fyziologická odezva během období sucha

Během období sucha dochází k ovlivnění fyziologie rostlin a zejména k výměně plynů mezi atmosférou a listem. Proto bylo pro kvantifikaci úrovně stresu uvnitř rostliny provedeno měření výměny plynů v listech. Měření čisté fotosyntetické rychlosti (P_n ; $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), rychlosti transpirace (E ; $\text{mmol}/\text{m}^2/\text{s}$), stomatální vodivosti (g ; $\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) a substomatální koncentrace CO_2 (C_i ; $\mu\text{mol}/\text{mol}$) byly prováděny na plně vyvinutých listech s použitím přenosného systému výměny plynů LCpro+. Tato měření probíhala uprostřed suchého období a ukázala, že úpravy ovlivnily fyziologickou reakci listů na nedostatek vody. Konkrétně byla vnitřní koncentrace CO_2 (C_i) snížena o 19 % s přidáním 5% hnoje (varianta M5) ve srovnání s kontrolní variantou (C), zatímco ostatní ošetření neměla na vnitřní koncentraci CO_2 (C_i) vliv. Ve všech úpravách byla rychlost transpirace (E) vyšší než u kontrolních variant a nebyl zjištěn rozdíl mezi jednotlivými typy úprav. Stomatální vodivost (G_s) se zvýšila pouze při individuálním použití biocharu a hnoje, zatímco jejich kombinace neměla žádný efekt. Zvýšení G_s bylo stejné u biocharu a hnoje a aplikační dávka neměla žádný účinek. Zvýšení stomatální vodivosti (G_s) bylo vypočteno mezi 13 % až 18 %. Čistá asimilace CO_2 (A) byla záporná ve všech případech, což naznačuje, že za testovaných podmínek byla respirace vyšší než hrubá fotosyntéza. Asimilace byla ovlivněna pouze aplikací 2% biocharu (B2) s negativním vlivem. Vnitřní účinnost využití vody (WUE_i) ukázala méně záporných hodnot pouze u rostlin pěstovaných na 5% hnoji (M5) (-337,94) ve srovnání s kontrolními variantami (C) (-442,47) (Tabulka 8).

Tabulka 8. Výměna plynů v listech rostlin cukrové řepy pěstovaných na různých substrátech, průměry \pm SD jsou uvedeny pro konkrétní parametry. Stejná písmena ukazují homogenní skupiny v (ANOVA, Tukeyho testu, $p < 0,05$).

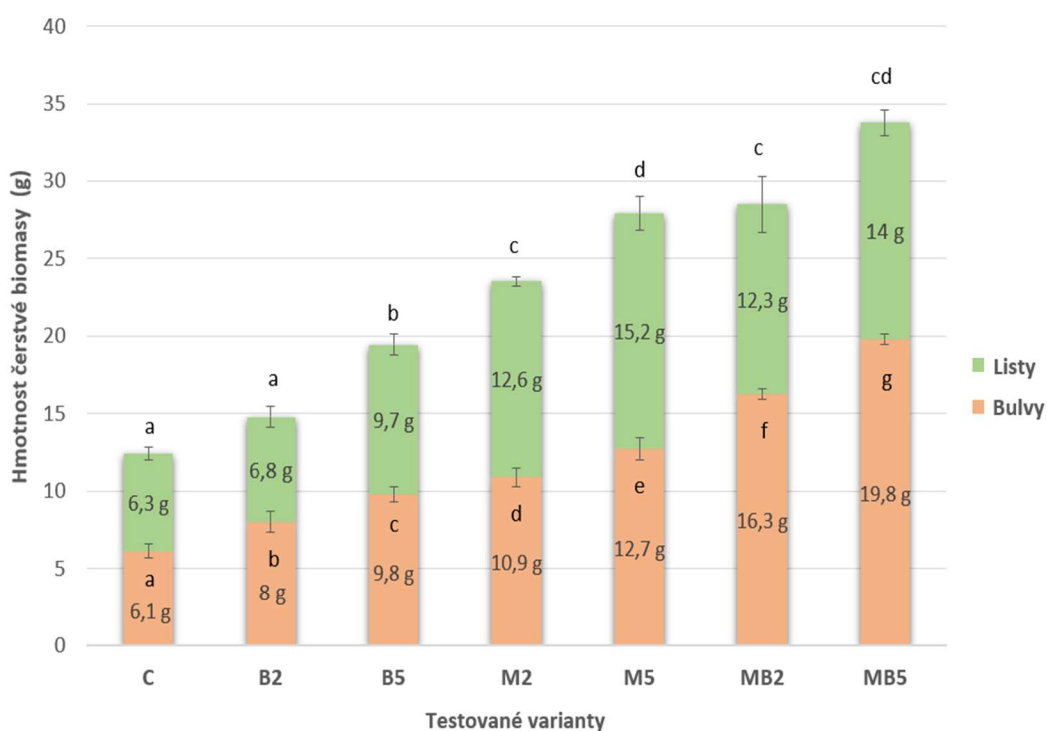
Varianta	C_i	E	G_s	A	WUE_i
Control	911,8 \pm 50,7 ^{ab}	1,60 \pm 0,04 ^a	0,066 \pm 0,002 ^a	-31,56 \pm 1,93 ^{ab}	-442,47 \pm 28,58 ^{ab}
B2	1005,7 \pm 36,2 ^a	1,83 \pm 0,04 ^b	0,075 \pm 0,002 ^{bc}	-39,52 \pm 1,76 ^c	-485,64 \pm 21,88 ^a
B5	805,7 \pm 38,4 ^{bc}	1,91 \pm 0,05 ^b	0,078 \pm 0,003 ^c	-31,77 \pm 1,65 ^{abc}	-399,15 \pm 21,80 ^{abc}
M2	902,0 \pm 38,1 ^{ab}	1,90 \pm 0,05 ^b	0,078 \pm 0,003 ^c	-37,12 \pm 1,78 ^{bc}	-425,98 \pm 21,98 ^{abc}
M5	739,2 \pm 30,2 ^c	1,88 \pm 0,04 ^b	0,078 \pm 0,003 ^c	-30,29 \pm 1,63 ^a	-337,94 \pm 18,5 ^c
MB2	948,4 \pm 39,1 ^{ab}	1,66 \pm 0,05 ^b	0,065 \pm 0,002 ^{ab}	-33,60 \pm 1,88 ^{bc}	-449,86 \pm 22,51 ^{ab}
MB5	725,5 \pm 33,9 ^c	1,76 \pm 0,05 ^b	0,067 \pm 0,002 ^{ab}	-25,59 \pm 1,51 ^a	-355,76 \pm 19,85 ^{bc}

A - asimilace ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$); E - rychlost transpirace ($\text{mmol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$); C_i - vnitřní koncentrace CO_2 (mol/m^2); G_s - stomatální vodivost ($\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$); WUE_i - účinnost využití vody

5.3 Parametry sklizně

5.3.1 Hmotnost biomasy

Výsledky sklizně ukázaly, že přidání biocharu, hnojiva nebo jejich kombinace zvýšilo produkci čerstvé biomasy ve srovnání s neupravenou kontrolní půdou. V kontrolní variantě rostliny vyprodukovaly 6,3 g listů a 6,1 g hlíz. Všechny upravené varianty zvýšily biomasu listů, s výjimkou biocharu přidaného samostatně ve 2% dávce. Největší nárůst byl zaznamenán při přidání 5% hnoje, buď samostatně (varianta M5) nebo ve spojení s biocharem (varianta MB5), následovaný hnojem o 2%, opět buď samostatně (varianta M2) nebo ve spojení s biocharem (varianta MB2), a nakonec při přidání 5% biocharu (B5). Čerstvá hmotnost hlíz byla zlepšena ve všech upravených ošetřeních ve srovnání s kontrolou, přičemž nejvyšší nárůst byl pozorován po aplikaci kombinace hnojiva a biocharu o 5% dávce a nejnižší u biocharu ve výši 2% (Graf 3).



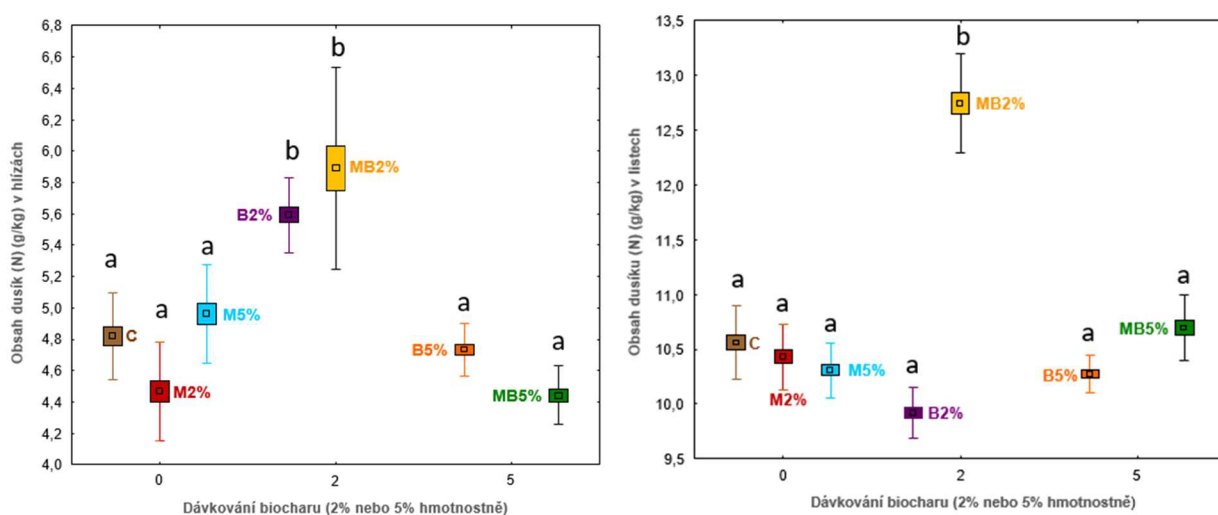
Graf 3. Průměrná čerstvá hmotnost v různých částech cukrové řepy v gramech. Jedná se o průměrné hodnoty získané z pěti rostlin \pm SD. Různá písmena označují statisticky významný rozdíl v Tukeyho HSD testu ($\alpha < 0,05$).

5.3.2 Elementární složení rostlin

Obsahy dusíku (N), fosforu (P), draslíku (K), uhlíku (C), vápníku (Ca), síry (S), hořčíku (Mg) a sodíku (Na) byly stanoveny zvlášť v hlízách a listech (viz příloha 3 a 4). Všechny koncentrace byly vyšší v listech než v hlízách cukrové řepy.

- **Dusík (N)**

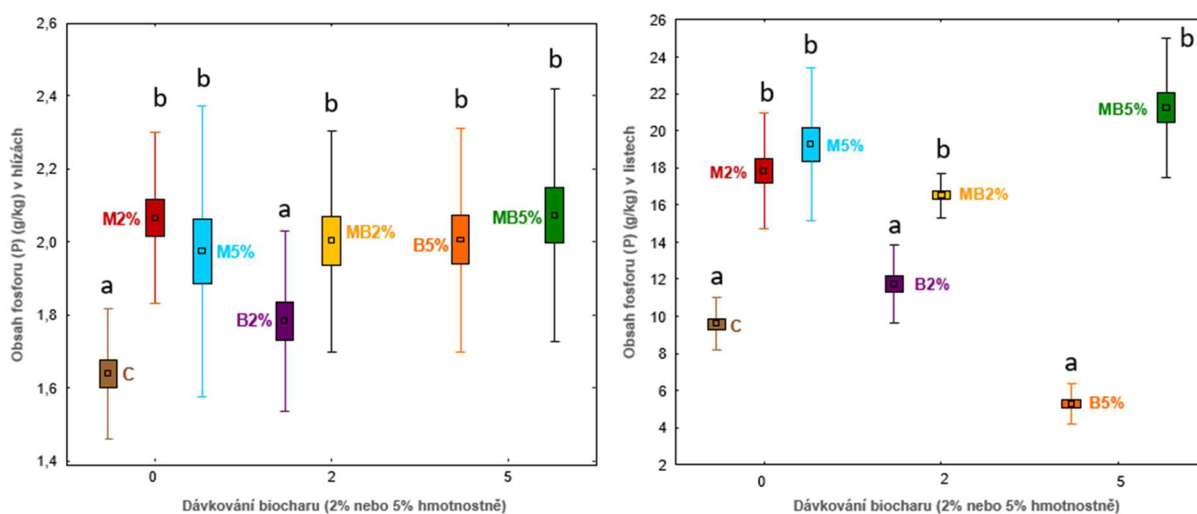
Obsah dusíku v hlízách byl v kontrolní variantě (neošetřená půda) 4,82 g/kg. Tento obsah se zvýšil pouze s přidavkem biocharu ve 2% (B2), buď samostatně nebo ve spojení s hnojem. Obsah dusíku v listech byl 10,51 g/kg v kontrolní skupině a pouze ošetření MB2 zvýšilo obsah dusíku v listech o 1,2násobek (Graf 4).



Graf 4. Obsah dusíku (N) v cukrové řepě (hlízách a listech samostatně), různá písmena označují statisticky významný rozdíl v testu Dunnetta ($\alpha < 0,05$).

- **Fosfor (P)**

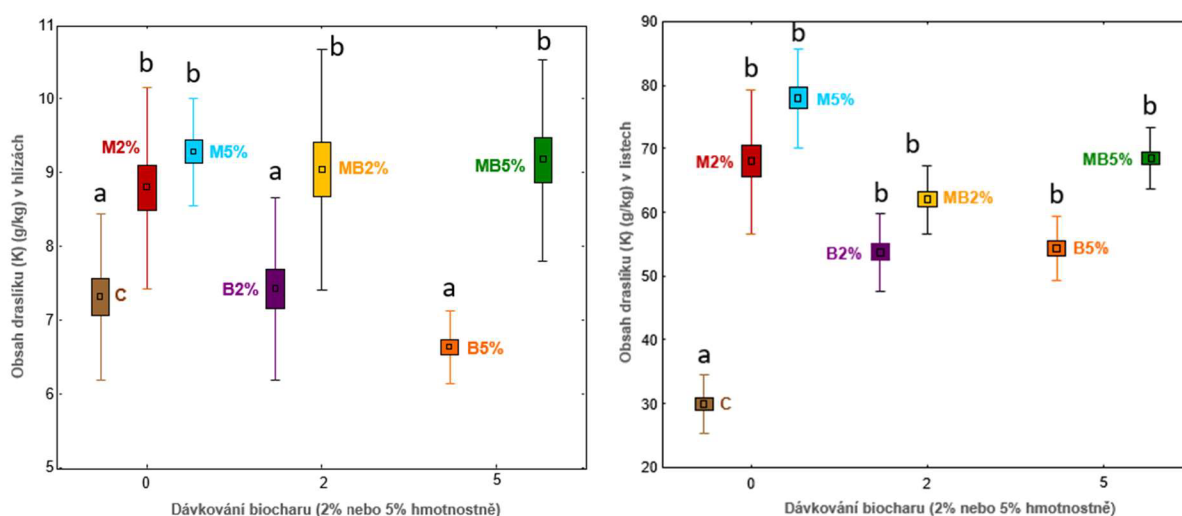
Obsah fosforu byl vyšší v upravených variantách než v kontrolní variantě (1,64 g/kg), s výjimkou varianty B2, která neměla žádný účinek. Průměrně tyto úpravy zvýšily obsah fosforu v hlízách o 1,3násobek. Koncentrace fosforu v listech dosáhla 9,58 g/kg u rostlin pěstovaných na neošetřené půdě a všechna ošetření obsahující hnůj zvýšila obsah fosforu v listech průměrně o 2násobek (Graf 5).



Graf 5. Obsah fosforu (P) v cukrové řepě (hlízách a listech samostatně), různá písmena označují statisticky významný rozdíl v testu Dunnetta ($\alpha < 0,05$).

- **Draslík (K)**

Obsah draslíku v hlízách dosáhl hodnoty 7,32 g/kg a byl ovlivněn pouze ošetřeními obsahujícími hnůj (M,MB). Všechna ošetření s hnojem, ať už samostatně nebo ve spojení s biocharem, a bez ohledu na aplikační dávku, vedla k podobnému průměrnému nárůstu o 1,25násobek. Koncentrace draslíku v listech rostlin pěstovaných na neošetřené kontrolní půdě dosahovala hodnot 29,84 g/kg. Všechny úpravy zvýšily obsah draslíku v listech, s průměrným nárůstem o 2násobek a bez významného rozdílu mezi jednotlivými ošetřeními (Graf 6).



Graf 6. Obsah draslíku (K) v cukrové řepě (hlízách a listech samostatně), různá písmena označují statisticky významný rozdíl v testu Dunnetta ($\alpha < 0,05$).

- **Uhlík (C)**

Obsah uhlíku v hlízách dosáhl hodnoty 421 g/kg, zatímco v listech rostlin pěstovaných na neošetřené půdě byl obsah uhlíku 388 g/kg (viz tabulka 9). Pouze aplikace úprav ovlivnila obsah uhlíku v listech: v případech B2, M2, M5 a MB5 byl nižší o 12 %, 8 %, 12 % a 10 % ve srovnání s kontrolou.

Tabulka 9. Obsah uhlíku v biomase cukrové řepy (hlízy a listy). Pro jednotlivé parametry jsou uvedeny průměry ± SD. Stejná písmena označují homogenní skupiny v (ANOVA, Tukeyho testu, $p < 0,05$).

Obsah uhlík v bulvách		Obsah uhlíku v listech	
Varianta	C	Varianta	C
Control	421.42±0.04 ^a	Control	387.52±0.01 ^a
B2	422.96±0.02 ^b	B2	342.92±0.01 ^b
B5	423.04±0.01 ^c	B5	379.06±0.01 ^c
M2	420.43±0.02 ^c	M2	358.15±0.03 ^d
M5	420.24±0.01 ^d	M5	341.95±0.02 ^e
MB2	418.48±0.06 ^e	MB2	373.15±0.02 ^f
MB5	419.22±0.07 ^f	MB5	349.03±0.01 ^e

- **Vápník (Ca)**

Koncentrace vápníku v listech byla výrazně vyšší než v hlízách, s hodnotami 25,62 g/kg a 4,51 g/kg v kontrolní skupině (Tabulka 10). V hlízách došlo ke snížení koncentrace vápníku ve všech ošetřeních, přičemž největší pokles byl pozorován u ošetření M5 a MB5 (67 %) a nejnižší u varianty B2 (23 %). Naopak, v případě listů měly úpravy odlišné účinky: pouze biochar zvýšil obsah vápníku v listech o 39 % při přidání 2% dávky a o 25 % při dávce 5%; hnůj aplikovaný ve 2%, ať už samostatně nebo ve spojení s biocharem, neměl na obsah vápníku v listech žádný vliv; zatímco hnůj v dávce 5% snížil obsah vápníku v listech o 23 %, když byl aplikován samostatně, a o 24 %, když byl kombinován s biocharem.

Tabulka 10. Obsah vápníků v biomase cukrové řepy (hlízy a listy). Pro jednotlivé parametry jsou uvedeny průměry \pm SD. Stejná písmena označují homogenní skupiny v (ANOVA, Tukeyho testu, $p < 0,05$).

Obsah vápníku v bulvách		Obsah vápníku v listech	
Varianta	Ca	Varianta	Ca
Control	4.51 \pm 0.58 ^a	Control	25.62 \pm 1.73 ^a
B2	3.47 \pm 0.24 ^b	B2	35.73 \pm 0.62 ^b
B5	3.02 \pm 0.25 ^b	B5	32.07 \pm 1.35 ^c
M2	2.10 \pm 0.13 ^b	M2	25.59 \pm 1.04 ^a
M5	1.47 \pm 0.11 ^c	M5	19.80 \pm 0.68 ^d
MB2	2.02 \pm 0.24 ^c	MB2	25.21 \pm 2.17 ^a
MB5	1.50 \pm 0.23 ^c	MB5	19.50 \pm 0.72 ^d

- **Síra (S)**

Obsah síry vykazoval podobný trend jako vápník: vyšší koncentrace byla zaznamenána v listech ve srovnání s hlízy. Rostliny pěstované s různými úpravami obsahovaly ve svých hlízách o 35 % až 67 % méně síry než rostliny pěstované na kontrolní půdě. V listech ošetření B2, B5, M5 a MB5 došlo k zvýšení obsahu síry o 30 % až 51 %, zatímco ošetření M2 snížilo obsah síry o 16 % (Tabulka 11).

Tabulka 11. Obsah síry v biomase cukrové řepy (hlízy a listy). Pro jednotlivé parametry jsou uvedeny průměry \pm SD. Stejná písmena označují homogenní skupiny v (ANOVA, Tukeyho testu, $p < 0,05$).

Obsah síry bulvách		Obsah síry v listech	
Varianta	S	Varianta	S
Control	1.52 \pm 0.09 ^a	Control	3.13 \pm 0.28 ^a
B2	0.99 \pm 0.08 ^b	B2	4.30 \pm 0.35 ^b
B5	0.51 \pm 0.02 ^c	B5	4.72 \pm 0.37 ^b
M2	0.62 \pm 0.04 ^c	M2	2.62 \pm 0.29 ^a
M5	0.64 \pm 0.04 ^c	M5	4.41 \pm 0.22 ^b
MB2	0.88 \pm 0.01 ^b	MB2	3.03 \pm 0.57 ^a
MB5	0.60 \pm 0.09 ^c	MB5	4.07 \pm 0.24 ^b

- **Hořčík (Mg)**

Obsah hořčíku v hlízách činil 2,68 g/kg, zatímco v listech dosahoval hodnoty 15,27 g/kg (Varianta C) (Tabulka 12). Přidání 2% biocharu (B2) nemělo žádný vliv na obsah hořčíku v hlízách, zatímco všechna ostatní ošetření ho snížila. Varianta (M5) ho snížila přibližně o 12 % a varianta (B5) až o 19 %. Naopak v listech všechna ošetření zvýšila koncentraci hořčíku zhruba o 30-40 %.

Tabulka 12. Obsah hořčíku v biomase cukrové řepy (hlízy a listy). Pro jednotlivé parametry jsou uvedeny průměry \pm SD. Stejná písmena označují homogenní skupiny v (ANOVA, Tukeyho testu, $p < 0,05$).

Obsah hořčíku v bulvách		Obsah hořčíku v listech	
Varianta	Mg	Varianta	Mg
Control	2.68 \pm 0.15 ^{ab}	Control	15.27 \pm 1.60 ^a
B2	2.73 \pm 0.30 ^b	B2	21.91 \pm 0.94 ^d
B5	2.18 \pm 0.11 ^a	B5	19.72 \pm 0.89 ^{cd}
M2	2.30 \pm 0.25 ^{ab}	M2	21.06 \pm 1.10 ^d
M5	2.36 \pm 0.19 ^{ab}	M5	16.55 \pm 0.77 ^{ab}
MB2	2.23 \pm 0.30 ^{ab}	MB2	21.92 \pm 1.63 ^d
MB5	2.23 \pm 0.26 ^{ab}	MB5	18.16 \pm 0.88 ^{bc}

- **Sodík (Na)**

Koncentrace sodíku v hlízách byla 1,90 g/kg, zatímco v listech dosahovala hodnoty 35,89 g/kg (Tabulka 13), a ve všech úpravách byla snížena. Pokles koncentrace sodíku v hlízách se pohyboval od 20 % (v případě B2) do 69 % (v případě MB5), zatímco v listech došlo ke snížení mezi 41 % (u B5 a MB2) a 55 % (u MB5).

Tabulka 13. Obsah sodíku v biomase cukrové řepy (hlízy a listy). Pro jednotlivé parametry jsou uvedeny průměry \pm SD. Stejná písmena označují homogenní skupiny v (ANOVA, Tukeyho testu, $p < 0,05$).

Obsah sodíku v bulvách		Obsah sodíku v listech	
Varianta	Na	Varianta	Na
Control	1.90 \pm 0.11 ^a	Control	35.89 \pm 3.87 ^a
B2	1.52 \pm 0.13 ^b	B2	28.46 \pm 1.54 ^b
B5	1.01 \pm 0.12 ^c	B5	21.08 \pm 2.18 ^c
M2	0.90 \pm 0.06 ^d	M2	20.07 \pm 0.80 ^{cd}
M5	0.56 \pm 0.03 ^d	M5	17.98 \pm 1.55 ^{cd}
MB2	1.05 \pm 0.08 ^d	MB2	21.28 \pm 0.99 ^c
MB5	0.59 \pm 0.10 ^c	MB5	16.04 \pm 1.05 ^d

5.3.3 Obsah cukru v hlízách

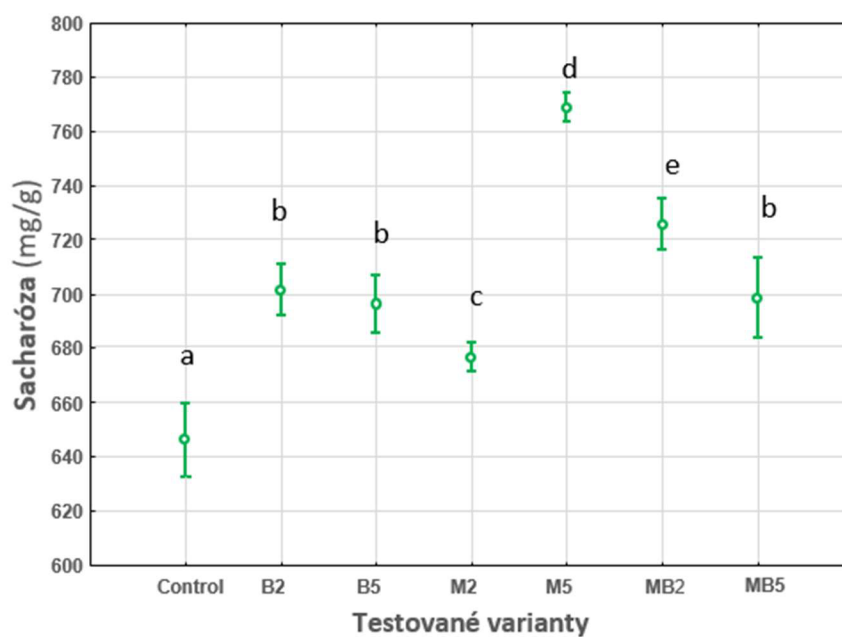
Pokud jde o obsahu cukru, v kontrolních variantách byly koncentrace sacharózy 646 mg/g (Tabulka 14 a graf 7), fruktózy 15 mg/g (Tabulka 15 a graf 8) a glukózy 44 mg/g (Tabulka 16 a graf 9) (viz příloha 5). Ve všech ostatních upravených ošetřeních byly koncentrace sacharózy v hlízách vyšší než v kontrolní variantě. Nejnižší nárůst byl pozorován u varianty M2 (zvýšení o 5 %), po nichž následovaly varianty B2, B5 a MB5, které měly podobné obsahy. Ve variantách MB2 a M5 pak docházelo k nejvyšší akumulaci sacharózy v rostlinách (Graf 10).

Obsah fruktózy nebyl ovlivněn přidavkem 2% hnoje (M2), zatímco všechny ostatní úpravy vedly k zvýšení obsahu fruktózy v hlízách. Nejnižší míra nárůstu byla naměřena u B5 (zvýšení o 1,7násobek) následována dvěma kombinacemi úprav (zvýšení o 2,2násobek při 2% a 2,1násobek při 5%) (MB2, MB5) a nakonec B2 a M5, které vyvolaly nejvyšší nárůst (zvýšení o 2,4násobek).

Všechna ošetření zvýšila obsah glukózy, s výjimkou varianty M2, která jej snížila až o 52 %. Nárůsty byly v pořadí: B5 (zvýšení o 1,1násobek) < MB5 (zvýšení o 1,1násobek) < MB2 (zvýšení o 1,2násobek) < B2 a M5 (zvýšení o 1,4násobek).

Tabulka 14. Celkový obsah sacharózy v cukrové řepě v mg/g (ANOVA, Tukeyho test, $p < 0,05$) (Vlastní zpracování, 2021).

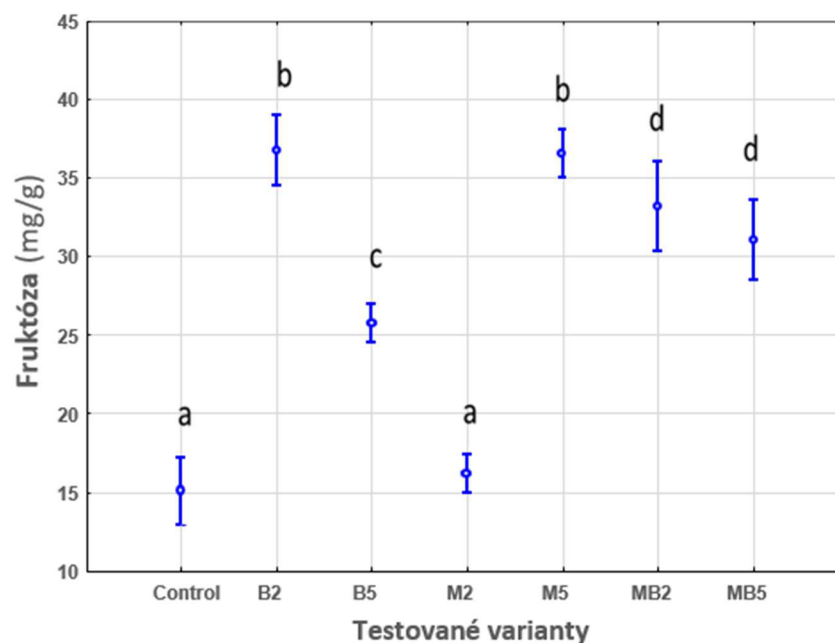
Varianta	Sacharóza (mg/g)
C	646,35±9,75 ^a
B2	701,36±6,80 ^b
B5	696,11±7,60 ^b
M2	676,63±3,87 ^c
M5	768,51±6,90 ^d
MB2	725,71±6,90 ^e
MB5	698,69±10,56 ^b



Graf 7. Celkový obsah sacharózy v cukrové řepě v mg/g (ANOVA, Tukeyho test, $p < 0,05$)

Tabulka 15. Celkový obsah fruktózy v cukrové řepě v mg/g (ANOVA, Tukeyho test, $p < 0,05$) (Vlastní zpracování, 2021).

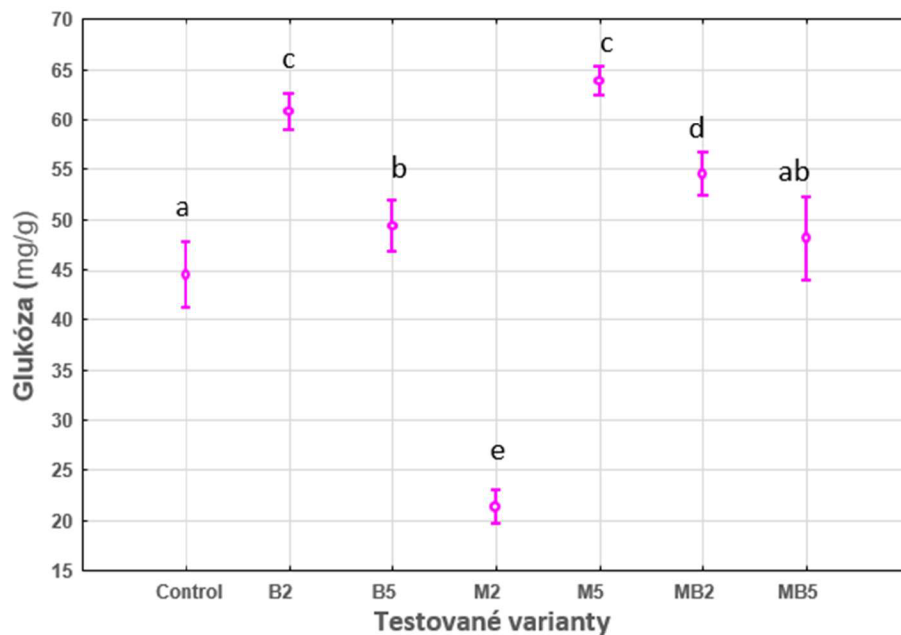
Varianta	Fruktóza (mg/g)
C	15,07±1,53 ^a
B2	36,70±1,60 ^b
B5	25,73±0,88 ^c
M2	16,19±0,87 ^a
M5	36,52±1,10 ^b
MB2	3315±2,07 ^d
MB5	31,03±1,84 ^d



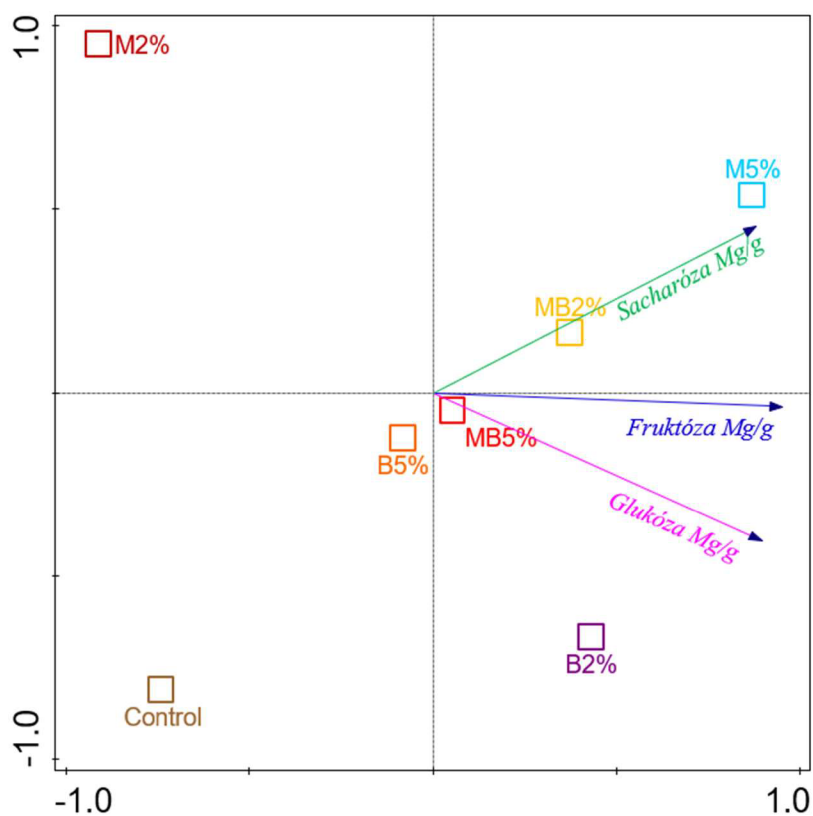
Graf 8. Celkový obsah fruktózy v cukrové řepě v mg/g (ANOVA, Tukeyho test, $p < 0,05$)

Tabulka 16. Celkový obsah glukózy v cukrové řepě v mg/g (ANOVA, Tukeyho test, $p < 0,05$) (Vlastní zpracování, 2021).

Varianta	Glukóza (mg/g)
C	44,40±2,38 ^a
B2	60,71±1,33 ^c
B5	49,27±1,84 ^b
M2	21,30±1,03 ^e
M5	63,83±1,52 ^c
MB2	54,46±1,52 ^d
MB5	48,04±2,96 ^{ab}



Graf 9. Celkový obsah glukózy v cukrové řepě v mg/g (ANOVA, Tukeyho test, $p < 0,05$)



Graf 10. Obsah cukru v hlízách po ošetření půdy, nejnižší nárůsty byly pozorovány u M2, po nichž následovaly varianty B2, B5 a MB5 s podobným obsahem, nejvyšší obsah sacharózy nahromadily varianty MB2 a M5.

6 Diskuse

6.1 Reakce půdy na změny

V této studii, která simulovala podmínky sucha, bylo zjištěno, že biochar aplikovaný samostatně do půdy výrazně zvýšil vlhkost půdy v porovnání s jinými ošetřeními, jako je hnůj (M) nebo směs biocharu a hnoje (MB). Už dříve bylo prokázáno, že makroporézní a mikroporézní struktura biocharu má pozitivní vliv na zadržování půdní vlhkosti (Wang a kol., 2019). Například Adekiya s kolegy (2019) pozorovali, podobný účinek při aplikaci biocharu z tvrdého dřeva v polním pokusu. Kammann a jeho kolegové (2011) testovali biochar z arašidových slupek aplikovaný na písčitou půdu a také zaznamenali zvýšenou schopnost půdy zadržovat vodu. V nedávné studii Jačka a kolegové (2018) pak potvrdili, že přidání biocharu do půdy skutečně zlepšilo schopnost půdy zadržovat vodu. Infračervená spektrometrie ukázala, že povrch biocharu obsahuje funkční skupiny OH a C-O-H, na které se voda váže prostřednictvím polární interakce. Navíc, biochar může nepřímo zvýšit obsah vody v půdě zlepšením její struktury, snížením hustoty a zlepšením stability agregace, což ovlivňuje také propustnost a vzdušnost půdy (Adekiya a kol., 2019; Bohara a kol., 2019; Wang a kol., 2019). Tento účinek je posílen i přidaným organickým uhlíkem, který je známý svou schopností zvýšit retenci vody v půdě (Jačka a kol., 2018). Tato studie ukázala, že hnůj (M) a kombinace hnoje s biocharem (MB) nedokázaly výrazně zlepšit obsah vody v půdě. Tato nedostatečná synergická účinnost biocharu v kombinaci s hnojem by mohla být způsobena ucpanými póry biocharu částicemi hnoje, neboť biochar tvořil pouze 10 % směsi biocharu a hnoje.

Předtím, než byly rostliny vystaveny stresu suchem, byla odběrem vzorků analyzována voda obsažená v půdních pórech (SPW) s cílem posoudit vliv přísad aditiv na chemické vlastnosti půdy.

Všechna ošetření, tedy biochar (B), hnůj (M) a kombinace biocharu s hnojem (MB), zvýšila obsah vody v půdních pórech (SPW) a elektrickou vodivost (EC). Biochar způsobil větší nárůst hodnoty pH, zatímco přísad hnoje vedl k většímu nárůstu elektrické vodivosti (EC).

Biochar a hnůj jsou známy svou schopností zvyšovat pH půdy a elektrickou vodivost po jejich aplikaci do půdy, a to zejména pokud je půda kyselá, jak ukázaly studie Songa a kolegů (2018). Tuto skutečnost potvrdili i Adekiya a kolegové ve své studii z roku (2019). Jednoduché vysvětlení spočívá v tom, že tyto ošetření mají vyšší

hodnoty pH a elektrickou vodivost (EC) než samotná neošetřená půda (Rafael a kol., 2019). Funkční skupiny (OH a C-O-H) na povrchu biocharu mohou vázat vodíkové ionty (H^+) a uvolňovat karbonáty do půdy, čímž se zvyšuje pH (Meng a kol., 2018). Podobně také hnůj obsahuje základní kationty, jako je Ca^{2+} a Mg^{2+} , které mohou zvýšit pH půdy (Adekiya a kol., 2019). Tyto prvky uvolněné úpravami, mohou také zvyšovat elektrickou vodivost půdy (EC) (Song a kol., 2018).

Měření obsahu živin ve vodě z půdních pórů ukázalo, že hnůj obecně zvyšuje obsah živin v půdě, zatímco biochar ho snižoval, s výjimkou dusičnanů NO_3^- (kdy byl biochar aplikován ve 2%), síranů (SO_4^{2-}) a sodíku (Na^+). Když byl biochar přidán k hnoji, zvýšení obsahu živin bylo obvykle nižší než při použití pouhého hnoje. Všechna ošetření (B, M a MB) obsahovala vyšší koncentrace živin než kontrolní vzorek neošetřené půdy (C) a lze tedy očekávat, že jejich přidání do půdy zvýší obsah živin (Agbede a kol., 2020). Avšak pouze čistá aplikace hnoje vedla ke zlepšení výživového stavu půdy. Skutečnost, že biochar redukuje obsah živin ve vodě v půdních pórech, může být spojena s jeho sorpční kapacitou. Ukázalo se, že biochar byl schopen sorbovat živiny jako jsou dusičnany, amonium, fosfor, draslík atd. (Rens a kol., 2018). Tato imobilizace živin, zejména dusíku a fosforu, byla odvozena z výpočtu poměru C/N a C/P, přičemž poměr C/N biocharu byl 140 a poměr C/P byl 918. Pokud jsou hodnoty C/N nad 32 a hodnoty C/P nad 200, očekává se, že organické úpravy půdy způsobí imobilizaci dusíku a fosforu (Peiris a kol., 2019). Mikrobiální společenstva, která jsou ovlivněna aplikacemi úprav, mohou ovlivnit dostupnost živin pro rostliny (Pan a kol., 2021). Na základě naměřeného obsahu živin v půdních pórech bylo očekáváno, že hnůj (M) zlepší růst cukrové řepy více než biochar (B). Zároveň snížení koncentrace dusičnanů ve vodě v půdních pórech může nejen snížit vyluhování, ale také snížit emise dusičnanu oxidu dusného (N_2O), což je další environmentální problém v zemědělství (Pan a kol., 2021).

6.2 Reakce cukrové řepy na vodní stres

Časté období sucha negativně ovlivňuje výnos plodin tím, že narušuje růst, fyziologii a reprodukci rostlin. Tyto účinky lze hodnotit pomocí měření příjmu živin, výměny plynů mezi listem a vnějším prostředím, fotosyntézy a rozdělování asimilátů (Fahad a kol., 2017).

Analýzy provedené na listech během období sucha ukázaly, že aplikace půdních aditiv zlepšila výměnu plynů v listech pomocí stomat, konkrétně snížila hodnotu substomatální koncentrace CO_2 (C_i), zvýšila rychlost transpirace (E), stomatální vodivost a účinnost využití vody (WUE_i). Stres způsobený nedostatkem vody má výrazný vliv na fyziologii rostlin, kdy se zvyšuje hodnota substomatální koncentrace CO_2 (C_i) a současně klesá transpirace, asimilace CO_2 a stomatální vodivost (Baccari a kol., 2020; Baraldi a kol., 2019; Leufen a kol., 2016; Santos a kol., 2021). V reakci na suché období rostliny nejprve uzavírají své stomaty, což snižuje transpirační rychlost a umožňuje rostlinám udržet obsah vody. Toto uzavření stomat rovněž snižuje asimilaci CO_2 a tím i čistou fotosyntézu (Leufen a kol., 2016).

Naměřený nárůst výměny plynů po aplikaci úprav odpovídal dřívějším pozorováním (Yang a kol., 2020; Zhang a kol., 2020) a mohl být spojen s lepší výživou rostlin a obsahem vody v půdě (Tanure a kol., 2019; Yang a kol., 2020). V této studii přidání biocharu do půdy zlepšilo zadržování vody v půdě, jakákoliv z výše uvedených úprav půdy dokázala zvýšit obsah živin, jak v půdě, tak i v rostlinách. Za optimálních podmínek zavlažování a výživy rostliny otevírají své stomaty, což zvyšuje transpiraci a asimilaci CO_2 (Tanure a kol., 2019). Tato pozorování naznačují, že aplikace biocharu a hnoje může zmírnit stres způsobený suchem na fotosyntetický aparát cukrové řepy tím, že ovlivní obsah vlhkosti v půdě a stav živin (Zhang a kol., 2020), zejména varianta M5 (5% hnůj), prokázala pokles substomatální koncentrace CO_2 (C_i) spolu s nárůstem transpirace, stomatální vodivosti a účinnosti využití vody.

Stres vyvolaný nedostatkem závlahy ovlivňuje nejen výměnu plynů v listech, ale také růst rostlin, jak ukazuje studie nejen Mouradiho a kolegů (2016), ale také Santose a kolegů (2021), kdy je tento stav spojen se sníženou fotosyntézou (Mouradi a kol., 2016). Přidání hnoje a biocharu zvýšilo produkci biomasy listů a hlíz. Další studie zaznamenaly podobné výsledky při vyvolání stresu ze sucha u bobovitých plodin (Abd El-Mageed a kol., 2021) a kvinoje (Yang a kol., 2020). Kromě toho byly pozitivní účinky biocharu na plodiny popsány v předchozích studiích (Agegnehu a kol., 2017;

Chen a kol., 2019; Yu a kol., 2019) a mechanismy využití biocharu byly intenzivně diskutovány v práci Jefferyho a kolegů (2011). Vysoká pórovitost biocharu snižuje objemovou hmotnost půdy, což následně snižuje odpor půdy vůči prorůstání kořenů (Adekiya a kol., 2019). Tato vlastnost také zlepšuje udržení vlhkosti v půdě (Yang a kol., 2020). Díky retenci živin a modifikaci fyzikálně-chemických vlastností půdy může biochar (B) zlepšit dostupnost živin pro rostliny (Abd El-Mageed a kol., 2021). Přestože analýza vody v půdních pórech v tomto experimentu ukázala, že biochar významně zadržuje živiny, tyto živiny byly stále plně dostupné rostlinám díky jeho vysoké pórovitosti. Výsledky ukázaly, že zadržování živin biocharem skutečně nebylo spojeno se snížením obsahu živin v rostlině cukrové řepy, což svědčí o tom, že biochar nemá negativní vliv na výživu rostlin. Lze tedy předpokládat, že živiny zadržené biocharem se snadno uvolňují a jsou k dispozici pro rostliny prostřednictvím kořenové systému, jak bylo prokázáno ve studii Rense a kolegů (2018). Studie zabývající se aplikací biocharu spolu s hnojem také ukázala, že biochar může regulovat uvolňování draslíku pro rostliny (Banik a kol., 2021). Podobně také hnůj zlepšil vlhkost půdy a obsah živin v půdě, což by mohlo vysvětlit zlepšení biomasy cukrové řepy (Rollon a kol., 2020). Kromě toho, je dobře známo, že biochar a hnůj jsou zdrojem organické hmoty (Arthur a kol., 2015). Takový přídavek snadno rozložitelné organické hmoty do půdy je prospěšný pro půdní mikrofaunu a mezofaunu (Adekiya a kol., 2019), které mají klíčovou roli v koloběhu organické hmoty a živin (Pan a kol., 2021) a také ve struktuře půdy (Dai a kol., 2019). Například aplikace biocharu z kukuřičné slámy zvýšila aktivitu enzymů souvisejících s dusíkem ve dvou předchozích studiích (Song a kol., 2019, 2018). Autoři vysvětlili, že modifikace půdních vlastností a vysoký obsah uhlíku v biocharu urychluje mineralizaci dusíku (N), což následně vede ke kompenzaci takto zvýšeného obsah uhlíku. Podobné zjištění bylo popsáno v práci Khadema a Raiesiho (2017), kteří použili biochar z kukuřice na vápenatých půdách. Výzkumy provedené na půdách s vysokým obsahem rozpustných solí ukázaly, že přidání biocharu zvyšuje aktivitu mikroorganismů v půdě, což podporuje růst rostlin i za stresových podmínek (Bhaduri a kol., 2016; Egamberdieva a kol., 2021). Tyto studie tak prokázaly potenciál biocharu zlepšit mikrobiální aktivitu půdy a tím i celkovou kvalitu za běžných i stresových podmínek, což vede ke zlepšení růstu rostlin. Ve srovnání s pouhou aplikací biocharu vedlo přidání statkového hnoje k výraznějšímu nárůstu biomasy, což bylo pravděpodobně způsobeno vyšším obsahem živin obsaženým v tomto hnojivu. Dále je nutné zmínit, že přidání příměsí ve výši 5%

prokázalo výrazně vyšší účinnost než přidání příměsí ve výši 2%, což může být opět spojeno s bohatším obsahem živin dodaných do půdy. Když byl biochar přidán k hnoji, došlo k většímu zvýšení biomasy než při samostatné aplikaci biocharu nebo hnoje. Takové pozitivní interakce mezi biocharem a hnojem na růst rostlin byly pozorovány v předchozích studiích (Adekiya a kol., 2019). Díky své sorpční kapacitě mohl biochar zadržovat živiny z hnoje a uvolňovat je postupně a pomalu během růstu rostlin, zatímco samostatný hnůj uvolňoval živiny daleko rychleji, s potenciálním vyluhováním, jak ukázala studie Adekiya a kolegů (2020).

Bylo prokázáno, že stres z nedostatku vody snižuje také množství fotosyntetických pigmentů (Kiani a kol., 2020; Leufen a kol., 2016). Nedostatek vody totiž poškozuje fotosyntetický aparát a snižuje syntézu pigmentů (Kiani a kol., 2020). Jako ochranný mechanismus proti nedostatku vody rostlina snižuje množství energie absorbované listem (Liu a kol., 2017). Při nedostatku vody bylo zjištěno, že aplikace hnoje a biocharu zvyšuje obsah chlorofylu v listech, což bylo potvrzeno v předchozích studiích (Abd El-Mageed a kol., 2021; Zhang a kol., 2020). Tento nárůst pigmentů může souviset s lepším nutričním stavem rostlin, jako je obsah dusíku (N), fosforu (P) a draslíku (K) (Mubarak a kol., 2016), a naznačuje lepší odolnost vůči stresu z nedostatku vody po přidání biocharu, hnoje nebo jejich kombinace (Abideen a kol., 2020).

Na rozdíl od obsahu fotosyntetického chlorofylu se celkový obsah pigmentů xanthofylového cyklu prokazatelně zvyšuje v reakci na stres způsobený suchem (Baccari a kol., 2020; Baraldi a kol., 2019). Tento jev je klíčový pro ochranu rostlin při vystavení stresu. Zejména za sucha se violaxantin přeměňuje na antheraxantin a poté na zeaxantin, což umožňuje ochranu rostlin před rozptýlením nadbytečné světelné energie, pro kterou je zeaxantin efektivnější než violaxantin (Baccari a kol., 2020). Snížení celkového obsahu pigmentů cyklu xanthofylu a DEPS (deepoxidized xanthophyll cycle pigments – hluboce de-exoxidovaných pigmentů cyklu xanthofylu) s přidavkem příměsí naznačuje, že rostliny na upravené půdě zažívají menší stres než rostliny na kontrolní neupravené půdě, což odpovídá naměřenému snížení obsahu chlorofylu.

Výživový stav plodin je jeden z nejdůležitějších posuzovacích faktorů v zemědělství. Při pěstování cukrové řepy jako suroviny pro cukrovarnický průmysl je důležité vyhodnotit, jak různé přísady ovlivňují cukernatost pěstovaných hlíz. U všech testovaných způsobů ošetření půdy (B - biochar, M - hnůj, MB – kombinace biochar a hnůj) došlo ke zvýšení obsahu tří hlavních cukrů fruktózy, glukózy a sacharózy. Skutečnost, že obsah živin vzrostl po přidavku biocharu, ačkoli biochar snížil koncentrace těchto prvků ve vodě z půdních pórů, lze přičíst tomu, že živiny byly stále dostupné rostlinám, navzdory sorpčním tendencím biocharu. Zvýšení obsahu živin a sacharózy v rostlinách po aplikaci hnoje a biocharu bylo pozorováno v předchozích studiích (Abd El-Mageed a kol., 2021; Adekiya a kol., 2019; Yang a kol., 2020; Zhang a kol., 2020). Takové účinky mohou být částečně vysvětleny zvýšením obsahu živin v půdě po aplikaci hnoje. Dalším faktorem je obecné zlepšení chemických vlastností půdy a aktivita půdní mikroflóry (Abd El-Mageed a kol., 2021; Adekiya a kol., 2019). Při tomto pokusu byl zaznamenán pokles koncentrace sodíku (Na) v půdách ošetřených biocharem a hnojem ve srovnání s neošetřenou kontrolní půdou (C). Toto snížení obsahu sodíku je také jedním z faktorů přispívajících ke snížení stresu rostlin, protože zvýšená koncentrace sodíku (Na) v rostlinných tkáních je jedním z ukazatelů celkového stresu rostlin.

6.3 Vztahy mezi parametry rostlin

Analýza hlavních komponent (PCA) byla provedena za účelem posouzení vztahu mezi fyziologickou reakcí rostlin a vlhkostí půdy. Vlhkost půdy je klíčovým faktorem ovlivňujícím vývoj a fyziologii rostlin (Yan a kol., 2017). Výsledky ukázaly, že rychlost transpirace (E) a stomatální vodivost byly negativně spojeny s vlhkostí půdy. Předchozí studie prokázaly, že asimilace CO₂, stomatální vodivost a transpirace jsou navzájem propojeny (Naidoo a Naidoo, 2018; Yan a kol., 2017). Tyto studie naznačily, že tyto tři parametry pozitivně souvisely s vlhkostí půdy, což znamená, že jejich hodnoty rostly s narůstající vlhkostí půdy. Tato odlišnost naznačuje, že úpravy, které nejvíce zlepšily vlhkost půdy, nebyly ty, které nejlépe podnítily transpiraci a stomatální vodivost, tedy výměnu plynů. Jelikož listová výměna plynů může být ovlivněna i jinými faktory, je možné, že tyto přípravky ovlivnily tento proces skrze jejich vliv na ostatní parametry. Například, ionty draslíku (K) ovlivňují uzavírání stomat, čímž regulují výměnu plynů na listech (Hasanuzzaman a kol., 2018). Stejně

tak, efektivnost využití vody (WUEi) byla negativně spojená s vlhkostí půdy, což naznačuje, že byla ovlivněna vlhkostí půdy a dalšími vlastnostmi půdy, které nebyly zahrnuty v této analýze.

Další analýza hlavních komponent (PCA) byla provedena k rozlišení ošetření na základě biomasy rostlin, obsahu živin a obsahu cukrů v hlízách každého konkrétního ošetření. Ošetření s čistým přídavkem biocharu (B) a varianta M2 (2% hnůj) se vyznačovaly vysokými koncentracemi hořčíku (Mg), síry (S), sodíku (Na) a vápníku (Ca). Naopak ošetření s přídavkem 5% hnoje (M5) a kombinovaná ošetření (MB) měly vyšší hodnoty biomasy, vysoké koncentrace dusíku (N), fosforu (P), draslíku (K), a také vyšší obsahy glukózy, fruktózy a sacharózy v hlízách. Tím bylo prokázáno, že ošetření, která způsobila nejvyšší akumulaci dusíku (N), fosforu (P) a draslíku (K) u rostlin (M5, MB2 a MB5), byla také ta, která vedla k nejvyšší produkci cukru v hlízách. Kromě toho byla tato ošetření negativně spojena s obsahem hořčíku (Mg), síry (S), sodíku (Na) a vápníku (Ca) v hlízách, které jsou považovány za nečistoty v cukrovarnickém průmyslu (Altay a Aksu, 2020; Campbell, 2002). Ukázalo se, že vyšší koncentrace živin v rostlinách, často způsobená dodatečným hnojením, byla spojena s vyšší produkcí cukru v rostlinách, především pokud jde o draslík (K) (Hasanuzzaman a kol., 2018; Hoffmann, 2010; Mubarak a kol., 2016). Například Altay a Aksu (2020) pozorovali, že aplikace draslíku zvýšila obsah cukru a zjistili, že vysoká koncentrace draslíku v rostlinách zvýšila syntézu sacharidů a obsah cukru v cukrové řepě. Bylo tedy prokázáno, že draslík je klíčovým prvkem podporujícím produkci a akumulaci cukru tím, že podporuje transport floému a syntézu sacharidů. Studie provedená Shenem a kolegy (2017) ukázala, že přidání draslíku do půdy zvýšilo koncentraci draslíku v listech a plodech, což vedlo ke zvýšení obsahu cukru. Tato studie také naznačila, že vyšší obsah cukru v plodech byl spojen s aktivací specifických genů zapojených do metabolismu sacharózy pomocí draslíku. Na základě těchto zjištění lze předpokládat, že různá ošetření, zejména M5, MB2 a MB5, zvýšila obsah živin v půdě a tím podpořila akumulaci těchto živin v cukrové řepě.

Zlepšení výtěžku cukru je často narušeno negativním vztahem mezi výtěžkem kořenů a koncentrací cukru v kořenech (Campbell, 2002). Na základě toho byl pro každé ošetření sledován vztah mezi obsahem sacharózy a produkcí biomasy. V této studii byly rozpoznány tři různé vzory vztahů. Neošetřená půda a varianty M2 (2% hnůj) a M5 (5% hnůj) projevily negativní vztah mezi obsahem sacharózy a čerstvou hmotností biomasy, zatímco ošetření B5 (5% biochar) vykázalo neutrální propojení. Naopak, u ošetření B2, MB2 a MB5 byla pozitivní spojitost mezi čerstvou hmotností a obsahem sacharózy. To naznačuje, že varianty C, M2 a M5 neprodukují více sacharózy s nárůstem biomasy, zatímco rostliny pěstované na B5 a kombinovaná ošetření vykazují zvýšenou produkci sacharózy s nárůstem biomasy. Tato poslední tři ošetření se jeví jako efektivnější pro produkci cukru během nedostatku vlhkosti, což může být spojeno s vyšším obsahem živin, a to zejména s vyšším obsahem draslíku (K), jak naznačuje předchozí analýza. Tato ošetření také vykazují negativní spojitost s nečistotami, což přispívá k vyšší kvalitě cukru.

7 Závěr

Tato studie zkoumala vliv aplikace biocharu, hnoje a jejich kombinace v různých dávkách na produkci živin, cukrů a transpiraci cukrové řepy. Z výsledků vyplývá, že použití samotného biocharu vedlo k nejuhodnějšímu zvýšení zadržování vlhkosti v půdě a snížení vyluhování dusičnanů, což je obvyklým vedlejším účinkem přidání biocharu. Bylo zjištěno, že kombinace biocharu a přidání hnoje má pozitivní vliv na růst a kvalitu plodin. Směs 2% biocharu a hnoje (MB2) vedla ke zvýšení výnosu cukrové řepy i za podmínek sucha v porovnání s neošetřenou půdou. Tato směs dvou půdních aditiv též zvýšila obsah cukru v řepě. Sušina cukrové řepy byla nejvyšší při dávkách M5% a MB2% v reakci na vodní deficit. Koncentrace živin dusíku (N), draslíku (K), vápníku (Ca) a hořčíku (Mg) obecně rostly s rostoucí aplikací biocharu, což vedlo ke zvýšení koncentrací vápníku (Ca), draslíku (K) a hořčíku (Mg) mezi mikroživinami a snížení koncentrace uhlíku (C). Z výsledků této studie vyplývá, že kombinace biocharu s běžnými hnojivy by mohla být vhodným opatřením ke zlepšení zadržování vlhkosti a živin v hrubozrnných půdách, s ohledem na rostoucí a kumulující se dopady sucha pro pěstitele a zemědělce. Ekonomické přínosy se projevují v podobě růstu výnosů plodin a zachování, případně i zlepšení jejich kvality. Vzhledem k těmto skutečnostem se využití biocharu považuje za klíčové pro redukci dopadu nedostatku vody, který může v důsledku změny klimatu nastat.

8 Přehled literatury a použitých zdrojů

A

- Abideen Z., Koyro H.-W., Huchzermeyer B., Ansari R., Zulfiqar F., Gul B., 2020: Ameliorat-ing effects of biochar on photosynthetic efficiency and antioxidant defence of *Phragmites karka* under drought stress. *Plant Biol.* 22: 259-266.
- Abd El-Mageed T.A., Belal E.E., Rady M.O.A., Abd El-Mageed S.A., Mansour E., Awad M.F., Semida W.M., 2021: Acidified biochar as a soil amendment to drought stressed (*Vicia faba L.*) plants: influences on growth and productivity, nutrient status, and water use efficiency. *Agronomy* 11: 1290.
- Adekiya A.O., Agbede T.M., Aboyeji C.M., Dunsin O., Simeon V.T., 2019: Effects of biochar and poultry manure on soil characteristics and the yield of radish. *Sci. Hortic.* 243: 457-463.
- Adekiya A.O., Agbede T.M., Ejue W.S., Aboyeji C.M., Dunsin O., Aremu C.O., Owolabi A.O., Ajiboye B.O., Okunlola O.F., Adesola O.O., 2020: Biochar, poultry manure and NPK fertilizer: sole and combine application effects on soil properties and ginger (*Zingiber officinale Roscoe*) performance in a tropical alfisol. *Open Agric.* 5: 30-39.
- Agbede T.M., Adekiya A.O., Odoja A.S., Bayode L.N., Omotehinse P.O., Adepehin I., 2020: Effects of biochar and poultry manure on soil properties, growth, quality, and yield of co coyam (*Xanthosoma sagittifolium Schott*) in degraded tropical sandy soil. *Exp. Agric.* 56: 528-543.
- Agegnehu G., Srivastava A.K., Bird M.I., 2017: The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: a review. *Appl. Soil Ecol.* 119: 156-170.
- Ahmadvand, M., Soltani, J., Garmdareh S., Varavipour, M., 2018: The relationship between the characteristics of Biochar produced at different temperatures and its impact on the uptake of NO_3^- -N. *Environmental Health Engineering and Management Journal* 5: 67–75.
- Aiken G. R., McKnight D. M., Wershaw R. L., Mac-Carthy P., 1985: Humic substances in soil, sediment and water. Published by John Wiley and Sons Inc., New York, 1-9.

- Altay H., Aksu G., 2020: The effects of potassium applications on drought stress in sugar beet: part I. Sugar beet quality components. *Journal Science Perspect* 4: 157-168.
- Arnon D. I., Stout P. R., 1939. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiol.* 14: 371–375.
- Awramik S.M., 1992: The oldest records of photosynthesis. *Photosynthesis research* 33: 75-89.
- Arthur E., Tuller M., Moldrup P., de Jonge L.W., 2015: Effects of biochar and manure amendments on water vapor sorption in a sandy loam soil. *Geoderma* 243-244: 175-182.

B

- Ball A. S., 1993: Carbohydrates and sugars. In: Chambers J.A.A. Rickwood R. (eds.): *Biochemistry labfax*. Academic Press, Exeter. ISBN 978-0-12-167340-6.
- Banik C., Koziel J.A., Bonds D., Singh A.K., Licht M.A., 2021: Comparing biochar swine manure mixture to conventional manure impact on soil nutrient availability and plant uptake—a greenhouse study. *Land* 10: 372.
- Bartoli M., Giorcelli M., Jagdale P., Rovere M., Tagliaferro A., 2020: A review of non-soil biochar applications. *Materials*. 13:1-35.
- Bartoš M. a kol., 2004: *Analytická chemie I*. Univerzita Pardubice Fakulta chemicko technologická, Pardubice.
- Baker A., Brooks R., 1989: Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1.2: 81-126.
- Baccari S., Elloumi O., Chaari-Rkhis A., Fenollosa E., Morales M., Drira N., Ben Abdallah F., Fki L., Munné-Bosch S., 2020: Linking leaf water potential, photosynthesis and chlorophyll loss with mechanisms of photo-and antioxidant protection in juvenile olive trees subjected to severe drought. *Front. Plant Sci.* 11: 614144.
- Baraldi R., Przybysz A., Facini O., Pierdonà L., Carriero G., Bertazza G., Neri L., 2019: Impact of drought and salinity on sweetgum tree (*Liquidambar styraciflua* L.): understanding tree ecophysiological responses in the urban context. *Forests* 10: 1032.

- Bhaduri D., Saha A., Desai D., Meena H.N., 2016: Restoration of carbon and microbial activity in salt-induced soil by application of peanut shell biochar during short-term incubation study. *Chemosphere* 148: 86-98.
- Bittner V., 2012: Škodliví činitelé cukrové řepy – abiotická poškození: Poruchy ve výživě cukrovky. *Listy cukrovarnické a řepářské* 128 č 2: 56-59.
- Bogdanović J., Mojović M., Milosavić N., Mitrović A., Vučinić Ž., Spasojević, I. 2008: Role of fructose in the adaptation of plants to cold-induced oxidative stress. *European Biophysics Journal* 37, 1241-1246.
- Bolan N., Hoang S.A., Beiyua J., Gupta S., Hou D., Karakoti A., Joseph S., Jung S., Kim K.-H., Kirkham M.B., Kua H.W., Kumar M., Kwon E.E., Ok Y.S., Perera V., Rinklebe J., Shaheen S.M., Sarkar B., Sarmah A.K., Singh B.P., Singh G., Tsang D.C.W., Vikrant K., Vithanage M., Vinu A., Wang H., Wijesekara H., Yan Y., Younis S.A., Van Zwieten L., 2021: Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage. *Int. Mater. Rev.* 1-51.
- Bohara H., Dodla S., Wang J.J., Darapuneni M., Acharya B.S., Magdi S., Pavuluri K., 2019: Influence of poultry litter and biochar on soil water dynamics and nutrient leaching from a very fine sandy loam soil. *Soil Tillage Res.* 189: 44-51.
- Braun J., Vanek G., 1985: *Pestujeme vinič. Příroda*, Bratislava, 191 s.
- Bruun E.W., Ambus P., Egsgaard H., Hauggaard-Nielsen H., 2012: Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics. *Soil Biology and Biochemistry.* 46, 73-79.

C

- Camps-Arbestain M., Shen Q., Wang T., van Zwieten L., Novak J., 2017: *Biochar: a guide to analytical methods*. Csiro Publishing, Melbourne, 320 p.
- Capodaglio A.G., Callegari A., Dondi D., 2016 *Microwave-Induced Pyrolysis for Production of Sustainable Biodiesel from Waste Sludges*. *Waste Biomass Valor* 7, 703–709.
- Castillo N.E.T.; Acosta Y.A.; Parra-Arroyo L.; Martínez-Prado M.A.; Rivas-Galindo V.M.; Iqbal H.M.; Damiano B.A.; Melchor-Martínez E.M.; Parra-Saldívar R., 2022: Towards an eco-friendly coffee rust control: Compilation of natural alternatives from a nutritional and antifungal perspective. *Plants* 11, 2745.

- Campbell L.G., 2002: Sugar beet quality improvement. *J. Crop. Prod.* 5: 395-413.
- Cibulka J., 1991: Pohyb olova, kadmia a rtuti v biosféře 1. vyd. Academia, Praha. ISBN 80-200-0401-7.

Č

- Černý M.; Trnka T., Buděšínský M., 2010: Sacharidy. Česká společnost chemická, Praha: Česká společnost chemická, 178 s. ISBN 978-80-86238-81-4.
- Čermák P., Lošák T., Hlušek J., Richter R., Škarpa P., 2010: Hnojení polních plodin draslíkem a hořčíkem – Metodická brožura výrobce a distributora hnoji v. K +S Czech Republic a.s., Praha, 43 s.

D

- Dai H., Chen Y., Liu K., Li Zongxin, Qian X., Zang H., Yang X., Zhao Y., Shen Y., Li Zhejin, Sui P., 2019: Water-stable aggregates and carbon accumulation in barren sandy soil depend on organic amendment method: a three-year field study. *J. Clean. Prod.* 212: 393-400.
- DeLuca T.H., MacKenzie M.D., Gundale M.J., 2014: Biochar effects on soil nutrient transformations. *Biochar C15.indd*, 419 – 444.
- Dhungana A., 2011: Torrefaction of biomass. Dalhousie University, Halifax: 1-173.
- Diviš J., Jůza J., Moudrý J., Vondrys J., 2000: Pěstování rostlin. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, České Budějovice, 258 s. ISBN 80-7040-456-6.
- Dolejší A., 1982: Zelenina na zahrádce. Státní zemědělské nakladatelství Praha, Praha, 214 s. ISBN: 07-019-8704/44.
- Dostál J., Paulová H., Slanina J., Táborská E., 2003: Biochemie pro bakaláře. 1.vyd. Masarykova univerzita, Brno, 173 s. ISBN 80-210-3232-4.
- Drew M. C., 1975: Comparison of the effects of a localised supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot, in barley. *New phytologist*, London, 75: 479-490.

E

- Egamberdieva D., Ma H., Alaylar B., Zoghi Z., Kistaubayeva A., Wirth S., Bellingrath Kimura S.D., 2021: Biochar amendments improve licorice (*Glycyrrhiza uralensis* fisch.) growth and nutrient uptake under salt stress. *Plants* 10: 2135.
- Ehrenfeld J. G., Ravit B., Elgersma K., 2005: Feedback in the plant-soil system. *Annual Review of Environment and Resources* 30, 75-115.
- Ernest A., 1917: *Výživa rostlin v otázkách a odpovědích*. A. Neubert, Praha, 109 s.

F

- Fahad S., Bajwa A.A., Nazir U., Anjum S.A., Farooq A., Zohaib A., Sadia S., Nasim W., Adkins S., Saud S., Ihsan M.Z., Alharby H., Wu C., Wang D., Huang J., 2017: Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. *Front. Plant Sci.* 8, 1-16.
- Fanish S., 2017: Impact of Green Manure Incorporation on Soil Properties and Cro Growth Environment: A Review. *World Journal of Agricultural Sciences*, 13, 122–132.
- Ferencík M., Škárka B., Novák M., Turecký L., 2000: *Biochémiá*. 1.vyd.. Slovak academic press s.r.o. Bratislava. ISBN 80-88908-58-2.
- Filiberto D.M, Gaunt J.L., 2013: Practicality of biochar additions to enhance soil and crop productivity. *Agriculture* 3(4): 715-725.

G

- Galinato S.P., Yoder J.K., Granatstein D., 2011: The economic value of biochar in crop production and carbon sequestration. *Energy Policy* 39: 6344-6350.
- Gembalová L., Klouda K., Rusín J., Prysycz A., Weisheitelová M., 2017: Biochar - Ecological Product and Its Application in Environmental Protection. *Asia-Pacific Engineering and Technology Conference (APETC 2017)*: 22-31.
- Ghaffari H., Tadayon M.R., Bahador M., Razmjoo J., 2021: Investigation of the proline role in controlling traits related to sugar and root yield of sugar beet under water deficit conditions. *Agric. Water Manag.* Volume 243: 106448 p.

- Gu L., Chen J., Xu C. Y., Kim J. S., Chen H., Xia J., Zhang L. P., 2019: The contribution of internal climate variability to climate change impacts on droughts. *Science of the Total Environment*, 684: 229-246.
- Göbel M.; Fichtner F., 2023: Functions of sucrose and trehalose 6-phosphate in controlling plant development. *Journal of Plant Physiology*, Volume 291: 154140.
- Goddijn O.J.M., van Dun K., 1999: Trehalose metabolism in plants. *Trends in Plant Science* 4(8): 315-319.
- Gonzaga M.I.S., Mackowiak C., de Almeida A.Q., de Carvalho Junior J.I.T., Andrade K.R., 2018: Positive and negative effects of biochar from coconut husks, orange bagasse and pine wood chips on maize (*Zea mays* L.) growth and nutrition. *Catena* 162: 414-420.
- Graham R., Welch R., Bouis H., 2001: Addressing micronutrient malnutrition through enhancing the nutritional quality of staple foods: Principles, perspectives and knowledge gaps. *Advances in Agronomy*, 70, 77-142.
- Guy C.L., Huber J.L.A., Huber S.C., 1992: Sucrose phosphate synthase and sucrose accumulation at low temperature. *Plant Physiol.* 100: 502-508.

H

- Hamerník F., 1960: *Rajonizace zemědělské výroby v ČSSR*. 1. vyd. SZN, Praha, 746 s.
- Hawkesford M., Horst W., Kichey T., Lambers H., Schjoerring J., Møller I. S., White, P., 2012: Functions of macronutrients. In Marschner P. (ed.): *Marschner's mineral nutrition of higher plants*, 3rd ed. Academic Press Amsterdam, Amsterdam: 135-189.
- Hawkesford M. J., Cakmak I., Coskun D., De Kok L. J., Lambers H., Schjoerring J. K., White P. J., 2023.: Functions of macronutrients. In Marschner P. (ed.): *Marschner's mineral nutrition of higher plants*, 4th ed. Academic Press Amsterdam, Amsterdam: 201-281.
- Hasanuzzaman M., Bhuyan M., Nahar K., Hossain M.D., Mahmud J., Hossen M.D., Masud A., Moumita, Fujita M., 2018: Potassium: a vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy* 8: 31.

- Hejnák V.; Zámečnicková B.; Zámečník J.; Hnilička F., 2007: Fyziologie rostlin. [Vyd. 2.]. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha. ISBN 978-80-213-1667-6.
- Hlušek J., Baroň M., Burg P., Lošák T., Pavloušek P., Šafránková I., Zemánek P., 2015: Réva vinná. Profi Press, Praha, 151 s. ISBN 978-80-86726-67-0.
- Hlušek J., Richter R., Ryant P., 2002: Výživa a hnojení zahradních plodin. Zemědělec, Praha, 81 s. ISBN 80-902413-5-2.
- Hoffmann C.M., 2010: Sucrose accumulation in sugar beet under drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, Institute of Sugar Beet Research, Holtenser Landstr. 77: 37079.
- Hronský Š., 2015: Rok vinohradníka a vinára. Plat4M Books, Bratislava, 224 s. ISBN 978-80-89642-21-2.
- Hřivna L., Pechková J., Burešová I., 2014: Vliv aplikace bóru na výnos a technologickou kvalitu cukrové řepy. *Listy cukrovarnické a řepářské* 130 č 4: 126 -130.
- Hřivna L., Borovička K., Bízík J., Veverka K., Bittner V., 2003: Komplexní výživa cukrovky. Danisco, 84 s.

CH

- Chen W., Meng J., Han X., Lan Y., Zhang W., 2019: Past, present, and future of biochar. *Biochar*, Volume 1: 75-87.
- Cho Y.H., Yoo S.D., 2011: Signaling Role of Fructose Mediated by FINS1/FBP in *Arabidopsis thaliana*. *PLoS Genet* 7(1): 1-10.

I

- Inyang M. I., Gao B., Yao Y., Xue Y., Zimmerman A., Mosa A., Cao X., 2016: A review of biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46: 406-433.
- Islam M.D.J., Kim J.W., Begum Mst.K., Sohel Md.A.T., Lim Y.-S., 2020: Physiological and biochemical changes in sugar beet seedlings to confer stress adaptability under drought condition. *Plants* 9 (11): 1511.

J

- Jandák J., Prax A., Pokorný E., 2004: Půdoznalství. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 142 s. ISBN 80-7157-559-3.

- Jačka L., Trakal L., Ouředníček P., Pohořelý M., Šípek V., 2018: Biochar presence in soil significantly decreased saturated hydraulic conductivity due to swelling. *Soil Tillage Res.* 184: 181-185.
- Jeffery S., Verheijen F.G.A., van der Velde M., Bastos A.C., 2011: A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 144: 175-187.
- Jindo K., Mizumoto H., Sawada Y., Sanchez-Monedero M.A., Sonoki T., 2014. Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. *Biogeosciences.* 11: 6613–6621.
- Jindra A., Šípal Z., Kovács P., 1966: Učebnice biochemie pro farmaceuty. Státní zdravotnické nakladatelství, Praha, 527 s.
- Jien S.-H., Kuo Y.-L., Liao C.-S., Wu Y.-T., Igalavithana A.D., Tsang D.C.W., Ok Y.S., 2021: Effects of field scale in situ biochar incorporation on soil environment in a tropical highly weathered soil. *Environ. Pollut.* Volume 272: 116009.
- Jurčík F., 1978: Živiny v půdě. Institut výchovy a vzdělávání MZVŽ ČSR, Praha.
- Jursík F., 2002: Anorganická chemie kovů. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha. ISBN 80-7080-504-8.
- Jursík M., Soukup J., Venclova V., Holec J., Andr J., 2010: Herbicide mode of actions and symptoms of plant injury by herbicides: Inhibitors of photosynthesis. *Listy cukrovarnické a řepařské* 126(2): 48 – 54.
- Jůzl M., Pulkrábek J., Diviš J. a kolektiv, 2000: Rostlinná výroba – III (okopaniny), MZLU, Brno, 232 s.

K

- Kadlec P., 2000: Technologie sacharidů. Vysoká škola chemicko-technologická, Praha. ISBN 80-7080-400-9.
- Kalina M., 2016: Hnojení půdy a kompostování v zahradě. Grada Publishing, Praha. ISBN 978-80-247-5848-0.
- Kalina M., 2005: Hnojení v zahradě. 2., aktualiz. vyd. Grada Publishing, Praha. ISBN 80-247-1275-X.

- Kalinová J., Moudrý J., Konvalina P., Moudrý J., 2007: Půdní úrodnost, výživa a hnojení rostlin v ekologickém zemědělství. Jihočeská univerzita, České Budějovice, 41 s. ISBN 978-80-7394-029-4.
- Kammann C. I., Schmidt H. P., Messerschmidt N., Linsel S., Steffens D., Müller C., Joseph, S., 2015: Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Scientific reports*, 5(1), 11080: 1-12.
- Kammann C., Glaser B., Schmidt H., 2016: Combining biochar and organic amendments. *Biochar in European Soils and Agriculture, Science and Practice*. New York: Routledge, P. 136-164.
- Kammann C.I., Linsel S., Gößling J.W., Koyro H.-W., 2011: Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* willd and on soil-plant relations. *Plant Soil* 345: 195-210.
- Khadem A., Raiesi F., 2017: Influence of biochar on potential enzyme activities in two calcareous soils of contrasting texture. *Geoderma* 308: 149-158.
- Khaembah E., Maley S., Gillespie R., George M., Michel A., Chakwizira E., de Ruiter J., Teixeira E., 2021: Water and nitrogen stress effects on canopy development and biomass allocation in fodder beet (*Beta vulgaris* L.), *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 65:1, 63-81.
- Kiani R., Nazeri V., Shokrpour M., Hano C., 2020: Morphological, physiological, and biochemical impacts of different levels of long-term water deficit stress on *Linum album* Ky. ex Boiss. *Accessions*. *Agronomy* 10: 1966.
- Košťál J., 1960: *Obecná biochemie*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 375 s.
- Kraus V., 2012: *Pěstujeme révu vinnou*. 2., aktualiz. a rozš. vyd. Grada, Praha, 111 s. ISBN 978-80-247-3465-1.
- Kraus V., Hubáček V. Ackermann P., 2010: *Rukověť vinaře*. 3. vyd. Brázda, Praha, 267 s. ISBN 978-80-209-0378-5.
- Krpeš V., 2005: *Ekologie rostlin*. Přírodovědecká fakulta - Ostravská univerzita, Ostrava.
- Kubát K., Kalina T., Kováč J., Kubátová D., Prach K., Urban Z., 2003: *Botanika*. Scientia, Praha, 232 s. ISBN 80-7183-266-9.
- Kumar A., Bhattacharya T., 2021: Biochar: a sustainable solution. *Environ. Dev. Sustain*, 23: 6642-6680.

- Kumar, M., Xiong, X., Sun, Y., Yu, I.K.M., Tsang, D.C.W., Hou, D., Gupta, J., Bhaskar, T., Pandey, A., 2020. Critical review on biochar-supported catalysts for pollutant degradation and sustainable biorefinery. *Biomass Catalysis*, Volume 4, Issue 10: 1900149.

L

- Latini A., Bacci G., Teodoro M., Gattia D.M., Bevivino A., Trakal L., 2019: The impact of soil-applied biochars from different vegetal feedstocks on durum wheat plant performance and rhizospheric bacterial microbiota in low metal-contaminated soil. *Front. Microbiol.*, Volume 10: 2694.
- Lee J., Sarmah A.K., Kwon E.E., 2019: Production and Formation of Biochar. In: Ok Y.S., Tsang D.C.W., Bolan N., Novak J.M. (eds.): *Biochar from Biomass and Waste*. Elsevier, Amsterdam: 3-18. ISBN 9780128117293.
- Leghari S. J., Wahocho N. A., Laghari G. M., HafeezLaghari A., MustafaBhabhan G., HussainTalpur K., Lashari A. A., 2016: Role of nitrogen for plant growth and development: A review. *Advances in Environmental Biology*, 10(9): 209-219.
- Lehmann J., Gaunt J., Rondon M. 2006: Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. *Mitigation and adaptation strategies for global change*. 11(2): 403-427.
- Lehmann J., 2007: Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2007, 5(7): 381-187.
- Lehmann J., Joseph S., 2009: *Biochar for environmental management*. Routledge, London, 944 p. ISBN 978-1-84407-658-1.
- Lech T., Lachowicz T., 2009: Application of ICP-OES to multielement analysis of biological material in forensic inorganic toxicology. *Problems of Forensic Sciences 2009*, vol. LXXVII: 64-78.
- Leufen G., Noga G., Hunsche M., 2016: Drought stress memory in sugar beet: mismatch between biochemical and physiological parameters. *J. Plant Growth Regul.* 35: 680-689.
- Lhotský J., 1994: *Kultivace a rekultivace půd*. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Praha-Zbraslav.

- Liang F., Li G.T., Lin Q.M., Zhao X.R., 2014: Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil. *Journal of Integrative Agriculture*. 13: 525–532.
- Libra J.A., Ro K.S., Kammann C., Funke A., Berge N.D., Neubauer Y., Titirici MM., Fühner Ch., Bens O., Kern J., Emmerich KH., 2011: Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*. 2011;2: 71-106.
- Limwikrana T., Kheoruenromnea, I., Suddhiprakarna, A., Prakongkep, N., Gilkesc, R.J., 2018: Dissolution of K, Ca, and P from biochar grains in tropical soils. *Geoderma*. 312, 139– 150.
- Liu J., Schulz H., Brandl S., Miehtke H., Huwe B., Glaser B., 2012: Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(5):1-10.
- Liu C., Wang Y., Pan K., Wang Q., Liang J., Jin Y., Tariq A., 2017: The synergistic responses of different photoprotective pathways in dwarf bamboo (*Fargesia rufa*) to drought and subsequent rewatering. *Front. Plant Sci*. 08: 489.
- Lyu H., He Y., Tang J., Hecker M., Liu Q., Jones P. D, Giesy, J. P., 2016: Effect of pyrolysis temperature on potential toxicity of biochar if applied to the environment. *Environ Pollut*, 218: 1-7.

M

- Major J., Rondon M., Molina D., Riha S.J., Lehmann J. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*. 333: 117- 128.
- Marsh H., Rodríguez-Reinoso F., 2006: Production and Reference Material. *Activated Carbon*. Elsevier Science, Amsterdam, 554 p. ISBN 9780080444635.
- Marschner H., Marschner P., 1995: *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press Limited, London, 889. ISBN 0-12-473543-6.
- Meng J., Tao M., Wang L., Liu X., Xu J., 2018: Changes in heavy metal bioavailability and speciation from a pb-zn mining soil amended with biochars from co-pyrolysis of rice straw and swine manure. *Sci. Total Environ*. 633: 300-307.

- Mitchell D., Elder T., 2010: Torrefaction? What's that?. Proceedings of 2010 COFE: 33rd Annual Meeting of the Council on Forest Engineering: 1-7.
- Morkunas I., Borek S., Formela M., Ratajczak L., 2012: Plant responses to sugar starvation. In: Chang ChF.(ed.): Carbohydrates-Comprehensive Studies on Glycobiology and Glycotechnology. InTech, Rijeka: 409-438.
- Mouradi M., Farissi M., Bouizgaren A., Makoudi B., Kabbadj A., Very A.-A., Sentenac H., Qaddourya A., Ghoulam C., 2016: Effects of water deficit on growth, nodulation and physiological and biochemical processes in *Medicago sativa*-rhizobia symbiotic association. *Arid Land Res. Manag.* 30: 193-208.
- Mukherjee A., Lal R., Zimmerman A., 2014: Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. *Science of the Total Environment.* 487: 26–36.
- Mubarak M.U., Zahir M., Ahmad S., Wakeel A., 2016: Sugar beet yield and industrial sugar contents improved by potassium fertilization under scarce and adequate moisture conditions. *J. Integr. Agric.* 15: 2620-2626.

N

- Nartey OD., Zhao B., 2014: Biochar preparation, characterization, and adsorptive capacity and its effect on bioavailability of contaminants. *Advances in Materials Science and Engineering* 2014(14): 1-12.
- Naidoo G., Naidoo K.K., 2018: Drought stress effects on gas exchange and water relations of the invasive weed *Chromolaena odorata*. *Flora* 248: 1-9.
- Neubaur Y., 2013: 6 - Biomass gasification. In: Rosendahl L (ed.): *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*. Woodhead Publishing Series in Energy, Berlin:106-129.

O

- OK Y.S., Uchimiya S. M., Chang S. X., Bolan N., 2016: Biochar - production, characterization, and applications. Boca Raton: CRC Press, Boca Raton , 438. ISBN 978-1482242294.
- Orcutt D.M., Nilsen E.T., 1996: *The Physiology of Plants under Stress: Abiotic Factors*. Published by John Wiley and Sons Inc., New York, 689.

- Oshunsanya S.O., Aliku,O., 2016: Biochar technology for sustainable organic farming. In: Konvalina P., (ed.): Organic Farming–A Promising Way of Food Production. InTech, London: 111–129.
- Otruba V., 2015: Spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem: sborník přednášek. Spektroskopická společnost Jana Marka Marci, Brno. ISBN 978-80 905704-7-4.

P

- Parvage M.M., Ulen B., Eriksson J., Strock J., Kirchmann H., 2013: Phosphorus availability in soils amended with wheat residue char. *Biology and Fertility of Soils*. 49: 245-250.
- Pan S.-Y., Dong C.-D., Su J.-F., Wang P.-Y., Chen C.-W., Chang J.-S., Kim H., Huang C.-P., Hung C.-M., 2021: The role of biochar in regulating the carbon, phosphorus, and nitrogen cycles exemplified by soil systems. *Sustainability* 13: 5612.
- Pavlová L., 2006: Fyziologie rostlin. Karolinum, Praha, 254 s.
- Pavloušek P., 2011: Pěstování révy vinné: moderní vinohradnictví. Grada, Praha, 333 s. ISBN 978-80-247-3314-2.
- Pelikán M., Hřivny L., Humpola J., 1999: Technologie sacharidů, MZLU, Brno, 152 s.
- Peiris C., Gunatilake S.R., Wewelwela J.J., Vithanage M., 2019: Biochar for sustainable agriculture: Nutrient Dynamics, Soil Enzymes, and Crop Growth. *Biochar From Biomass and Waste*, Elsevier: 211-224
- Pohořelý M., Sedmihradská A., Trakal L., Jevič P., 2019: Biochar–výroba, vlastnosti, certifikace, použití. *Waste Forum* roč. 2019, č. 3: 197-210.
- Pokorná I., Smutka L., Pulkrábek J., 2011: Světová produkce cukru. *Listy cukrovarnické a řepařské* 127, č. 4: 118-120.
- Procházka S., Macháčková I., Krekule J., Šebánek J., 1998: Fyziologie rostlin. Academia, Praha, 484 s. ISBN 80-200-0586-2.
- Prugar J. a kolektiv, 2008: Kvalita rostlinných produktů na prahu 3. tisíciletí. Výzkumný ústav pivovarský a sladařský, a.s., Praha, 327 s. ISBN 978-80-86576-28-2.
- Pulkrábek J., Šroller J., 1993: Základy pěstování cukrovky, IVV Mze, Praha, 62 s. ISBN 80-7105-046-6.

- Pulkrábek J., Urban J., Bečková L., Valenta J., 2007: Řepa cukrová: pěstitelský rádce.. Kurent, Praha, 64 s. ISBN 978-80-87111-00-0.

Q

- Qayyum F., Ashraf I., Abid M., Steffens D., 2015: Effect of biochar, lime, and compost application on phosphorus adsorption in a Ferralsol. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178: 576–581.

R

- Raza A., Razzaq A., Mehmood S., Zou X., Zhang X., Lv Y., Xu J., 2019: Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: a review. *Plants* 8, 34: 1-29.
- Rafael R.B.A., Fernández-Marcos M.L., Cocco S., Ruello M.L., Fornasier F., Corti G., 2019: Benefits of biochars and NPK fertilizers for soil quality and growth of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) in an acid arenosol. *Pedosphere*, Volume 29: 311-333.
- Reed E.Y., Chadwick D.R., Hill P.W., Jones D.L., 2017: Critical comparison of the impact of biochar and wood ash on soil organic matter cycling and grassland productivity. *Soil Biol. Biochem*, Volume 110: 134-142.
- Rehman R.A., Rizwan M., Qayyum M.F., Ali S., Rehman M.Z., Zafar-ul-Hye M., Hafeez F., Iqbal M.F., 2018: Efficiency of various sewage sludges and their biochars in 63 improving selected soil properties and growth of wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of Environmental Management*. 223, 607-613.
- Rens H., Bera T., Alva A.K., 2018: Effects of biochar and biosolid on adsorption of nitrogen, phosphorus, and potassium in two soils. *Water Air Soil Pollut.* 229: 281.
- Richter R., Hlušek J., 1994: Výživa a hnojení rostlin (I. obecná část). VŠZ v Brně, Brno, 177 s. ISBN 80-7157-138-5.
- Richter R., Škarpa P., 2013: Mimokořenová výživa u polních plodin. *Úroda* LXI č. 3: 67-68.
- Rollon R.J.C., Malig-on P.L.B., Guindang P.R., Dolorito R. V., 2020: Corn (*Zea mays* L.) growth, nutrient uptake and soil fertility improvement of strongly acidic soil applied with biochar and animal manure. *J. Appl. Biol. Biotechnol*, Volume 8 (2): 35-40.

S

- Salerno G.L., Curatti L., 2003: Origin of sucrose metabolism in higher plants: When, how, and why? *Trends in Plant Science* 8(2): 63-69.
- Sami F., Siddiqui H., Hayat S., 2019: Interaction of glucose and phytohormone signaling in plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 135: 119-126.
- Sadaf J., Shah G.A., Shahzad K., Ali N., Shahid M., Ali S., Hussain R.A., Ahmed Z.I., Traore B., Ismai I.M.I., Rashid M.I., 2017: Improvements in wheat productivity and soil quality can accomplish by co-application of biochars and chemical fertilizers. *Sci. Total Environ.* 607-608: 715-724
- Santos E.F., Mateus N.S., Rosário M.O., Garcez T.B., Mazzafera P., Lavres J., 2021: Enhancing potassium content in leaves and stems improves drought tolerance of eucalyptus clones. *Physiol. Plant.* 172: 552-563
- Sedmihradská A., Skoblia S., Beňo Z., Moško J., Pohořelý M., 2021: Výroba a charakterizace vysoko-teplotního biocharu. *Energie z biomasy XIX*: 153 -159.
- Shackley S, Carter S, Knowles T, Middelink E, Haefele S, Sohi S, Haszeldine S., 2012: Sustainable gasification–biochar systems? A case-study of rice-husk gasification in Cambodia, Part I: Context, chemical properties, environmental and health and safety issues. *Energy Policy* 42: 49-58.
- Shen C., Wang J., Jin X., Liu N., Fan X., Dong C., Shen Q., Xu, Y., 2017: Potassium enhances the sugar assimilation in leaves and fruit by regulating the expression of key genes involved in sugar metabolism of asian pears. *Plant Growth Regul.* 83: 287-300.
- Schmidt H.-P., Kammann C., Hagemann N., Leifeld J., Bucheli, T. D., Monedero M. A. S., Cayuela M. L., 2021: Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB-Bioenergy*, 13 (11): 1708–1730.
- Siddiqui H., Sami F., Hayat S., 2020: Glucose: Sweet or bitter effects in plants—a review on current and future perspective. *Carbohydrate research* 487: 107884.
- Singh B., Strømman A. H., Hertwich E.G., 2011: Comparative life cycle environmental assessment of CCS technologies. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(4): 911-921.
- Smeekens S., 2000: Sugar-induced signal transduction in plants. *Annu Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 51: 49-81.

- Sohi S.P., Krull E., Lopez-Capel E., Bol R., 2010: Chapter 2 - A review of biochar and its use and function in soil. In: Sparks D.L. (ed.): *Advances in Agronomy Volume 105*. Elsevier, Amsterdam: 47-82.
- Soetan K., Olaiya, C., Oyewole O., 2010: The Importance of Mineral Elements for Humans, Domestic Animals and Plants: A Review. *African Journal of Food Science*, 4, 200-222.
- Song D., Tang J., Xi X., Zhang S., Liang G., Zhou W., Wang X., 2018: Responses of soil nutrients and microbial activities to additions of maize straw biochar and chemical fertilization in a calcareous soil. *Eur. J. Soil Biol.* 84: 1-10.
- Song D., Xi X., Zheng Q., Liang G., Zhou W., Wang X., 2019: Soil nutrient and microbial activity responses to two years after maize straw biochar application in a calcareous soil. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 180: 348-356.
- Spokas K. A., Koskinen W. C., Baker J. M., Reicosky D. C., 2009: Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil. *Chemosphere*, 77(4): 574-581.
- Srinivasan P., Sarmah A. K., Smernik R., Das O., Farid M., Gao W., 2015: A feasibility study of agricultural and sewage biomass as biochar, bioenergy and biocomposite feedstock: production, characterization and potential applications. *Science of the total environment*, 512: 495-505.
- Suliman W., Harsh J. B., Abu-Lail N., Fortuna A. M., Dallmeyer I., Garcia-Peréz M., 2017: The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. *Science of the Total Environment* 574: 139-147.
- Sun J., He F., Pan Y., Zhang, Z., 2017: Effects of pyrolysis temperature and residence time on physicochemical properties of different biochar types. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science* 67(1): 12-22.
- Sun Y., Xiong X., He M., Xu Z., Hou D., Zhang W., Ok Y.S., Rinklebe J., Wang L., Tsang D.C.W., 2021: Roles of biochar-derived dissolved organic matter in soil amendment and environmental remediation: a critical review. *Chem. Eng. J.*, Volume 424,: 130387.

Š

- Šafránková I., 2007: Poruchy, poškození a choroby révy vinné. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 77 s. ISBN 978-80-7375-100-5.
- Šebánek J. a kolektiv, 1983: Fyziologie rostlin: vysokoškolská učebnice pro vysoké školy zemědělské. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 560 s.
- Šetlík I., Seidlová F., Šantrůček J., 2004: Fyziologie rostlin - Kap. 10 Minerální a organická výživa rostlin. Biologická fakulta Jihočeské university v Českých Budějovicích, České Budějovice.
- Šimek M., Elhottová D., Fuksa P., Hynšt J., Kobes M., Kvítek T., Malý S., Moudrý J., Rozsypal R., Tajovský K., 2021: Živá půda: praktický manuál. Academia, Praha, 323 s. ISBN 978-80-200-3199-0.
- Švachula V., Pulkábek J., Šroller J., Zahradníček J., 2006: Změny v postavení cukrovky v zemědělských soustavách České republiky a výrobních států EU. Listy cukrovarnické a řepařské, roč. 122: 220 – 227.

T

- Tanure M.M.C., da Costa L.M., Huiz H.A., Fernandes R.B.A., Cecon P.R., Pereira Junior J.D., da Luz J.M.R., 2019: Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. *Soil Tillage Res.* 192: 164-173
- Thies J.E, Rillig, M.C., 2009: Vlastnosti biouhlu: biologické vlastnosti. Biouhel pro environmentální management. *Věda a technika* 1. 85-105.
- Toscano S., Ferrante A., Romano D., 2019: Response of Mediterranean ornamental plants to drought stress. *Horticulturae* 5 (1) :6, 1-20.

U

- Urban J. 2013: Podtyp: Skripta; Cílené pěstování rostlin (biomasy) k produkci obnovitelné energie. In: Hejnák V. a kol. (eds.): *Zemědělství a zdravé potraviny*. Specializované skriptum pro univerzitu třetího věku, ČZU, Praha: 68-73 s. ISBN: 978-80-213-2356-8

V

- Van der Putten W. H., Bardgett R. D., Bever J. D., Bezemer T. M., Casper B. B., Fukami T., Wardle D. A., 2013: Plant-soil feedbacks: the past, the present and future challenges. *Journal of Ecology*, 101(2): 265-276.
- Vaněk V., Balík J., Pavlík M., Pavlíková D., Tlustoš P., 2016: Výživa a hnojení polních plodin. Profi Press, Praha, 224 s. ISBN 978-80-86726-79-3.
- Verheijen F., Jeffery S., Bastos A.C., van der Velde M., Diafas I., 2010: Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. European Commission, Luxembourg, 166.
- Voet D., Voet J.G., Kotyk A., 1995: Biochemie. Victoria Publishing, Praha, 1325 s. ISBN 80-85605-44-9.
- Votrubová O., 2010: Anatomie rostlin. 3.vyd..Nakladatelství Karolinum, Praha, 192s. ISBN 978-80-246-1867-8.

W

- Wang J, Wang S., 2019: Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*. 227: 1002-1022.
- Wang X., Ren Y., Zhang S., Chen Y., Wang N., 2017: Applications of organic manure in creased maize (*Zea mays* L.) yield and water productivity in a semi-arid region. *Agric. Water Manag.* 187: 88-98.
- Weber K., Quicker P., 2018: Properties of biochar. *Fuel* 217: 240-261.
- Wang D., Li C., Parikh S.J., Scow K.M., 2019: Impact of biochar on water retention of two agricultural soils– a multi-scale analysis. *Geoderma* 340: 185-191.

Y

- Yang X, Liu J., Mcgrouther K., Huang H., Lu K., Guo X., He L., Lin X., Che L., Ye Z., Wang H.,. 2016: Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil. *Environmental Science and Pollution Research*. 23: 974–984.
- Yang A., Akhtar S.S., Li L., Fu Q., Li Q., Naeem M.A., He X., Zhang Z., Jacobsen S.-E., 2020: Biochar mitigates combined effects of drought and salinity stress in quinoa. *Agronomy* 10: 912.

- Yan W., Zhong Y., Shangguan Z., 2017: Responses of different physiological parameter thresholds to soil water availability in four plant species during prolonged drought. *Agric. For. Meteorol.* 247: 311-319.
- Yu, L., Yu, M., Lu, X. 2018. Combined application of biochar and nitrogen fertilizer benefits nitrogen retention in the rhizosphere of soybean by increasing microbial biomass but not altering microbial community structure. *Science of The Total Environment* Volumes 640–641: 1221-1230.
- Yu H., Zou W., Chen J., Chen H., Yu Z., Huang J., Tang H., Wei X., Gao B., 2019: Biochar amendment improves crop production in problem soils: a review. *J. Environ. Manag.* 232: 8-21.

Z

- Zbiral J., 2020: Jednotné pracovní postupy – zkoušení hnojiv - STANOVENÍ OBSAHU Al, As, B, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, V a Zn METODOU ICP-OES. ÚKZÚZ - Národní referenční laboratoř, Brno, 11 s.
- Zhang H., Chen C., Gray E. M., Boyd, S. E., 2017: Effect of feedstock and pyrolysis temperature on properties of biochar governing end use efficacy. *Biomass and Bioenergy*, 105, 136-146.
- Zhang P., Yang F., Zhang H., Liu L., Liu X., Chen J., Wang X., Wang Y., Li C., 2020: Beneficial effects of biochar-based organic fertilizer on nitrogen assimilation, antioxidant capacities, and photosynthesis of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under saline-alkaline stress. *Agronomy* 10: 1562.
- Zhang F., Li Y., Yang M., Li W., 2012: Content of heavy metals in animal feeds and manures from farms of different scales in Northeast China. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 9: 2658-2668.
- Zhao J., Shen X.-J., Domene X., Alcañiz J.-M., Liao X., Palet C., 2019: Comparison of bio chars derived from different types of feedstock and their potential for heavy metal removal in multiple-metal solutions. *Sci. Rep.* 9: 9869.

Ž

- Žalud Z., Hlavinka P., Růžek P., Klem K., Zahradníček P., Štěpánek P., Trnka M., 2020: Změna klimatu a její dopady pro polní produkci se zaměřením na cukrovou řepu v České republice. Listy cukrovarnické a řepářské 136, č. 7–8: 248 – 255.

Internetové zdroje

- Biochar International, ©2021-2024: BIOCHAR. (online) [cit. 2023. 12. 09], dostupné z <<https://biocharinternational.services/aboutus/>>.
- Břendová K., Tlustoš P., Száková J., Bohuněk M.; 2014: Využití biouhli (biocharu) k úpravě půdních vlastností (online) [cit. 2023.09.08], dostupné z <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-biouhli-biocharu-k-uprave-pudnich-vlastnosti>>.
- Černý J., Balík J., Kulhánek M., Sedlár O., Vašák F.; 2016: Význam bóru ve výživě (online) [cit.2024.03.14], dostupné z <<https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/vyznam-boru-ve-vyzive-rostlin>>.
- Černý J., Balík J., Kulhánek M., Sedlár O., 2019: Organická hmota v půdě, její obsah, složky a význam (online) [cit.2024.01.9], dostupné z <<https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/organicka-hmota-v-pude-jeji-obsah-slozky-a-vyznam>>.
- ČÚZK, ©2023: Zobrazení obce Zvěříněk (online) [cit. 2023. 01. 18], dostupné z <<https://www.cuzk.cz/>>.
- Hollan, J., Klusák V., 2009: Biouhel, naše stéblo naděje (online) [cit. 2024.03.14], dostupné z <<https://www.veronica.cz/biouhel>>.
- Hollan J., 2015: Uhlík z ovzduší: do půd!. Sedmá generace [online]. [cit. 2023.10.09], dostupné z <<https://sedmagenerace.cz/uhlik-z-ovzdusi-do-pud/>>.
- Katalog plodin, ©2024: Řepa cukrová. (online) [cit. 2023. 08. 03], dostupné z <http://krv.agrobiologie.cz/atlas/katalog/plodiny/detail/?plodina_id=26&ref=/atl>.
- Nutrim, ©2024: Je cukr oprávněně nazýván jako bílý jed? (online) [cit. 2023. 10. 02], dostupné z <<https://nutrim.cz/blog/vyziva/je-cukr-bily-jed/>>.
- Richter R., Ryant P., Hlušek J., Fryščáková E., 2004: Multimediální učební texty z výživy rostlin (online) [cit.2023.12.02], dostupné z <http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/index.htm>.

- Staf M., 2005: Výzkum termické konverze odpadní biomasy na plynná a kapalná paliva. (online) [cit.2023.03.14], dostupné z <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyzkum-termicke-konverze-odpadni-biomasy-na-plynna-a-kapalna-paliva>>.
- Vrba V., Huleš L.; 2007: Humus-půda-rostlina (11) Humusové látky a stopové prvky (online) [cit.2023.11.12], dostupné z <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/humus-puda-rostlina-11-humusove-latky-a-stopove-prvky>>.
- Yara, ©2024: Výživa rostlin. (online) [cit. 2023. 11. 06], dostupné z <https://www.yaraagri.cz/vyziva-rostlin/?_gl=1*5q314g*_up*MQ..*_ga*MTU5MTM0NTY4Mi4xNzExNTE3NTE4*_ga_WV3F7YBDJ0*MTcxMTUxNzUxOC4xLjAuMTcxMTUxNzUxOC4wLjAuMjI5MTAwNjUx>.

9 Seznam obrázků, tabulek a grafů

9.1 Obrázky

Obrázek 1. Příjem minerálních látek rostlinou	8
Obrázek 2. Symptomy nedostatku dusíku u cukrové řepy	18
Obrázek 3. Symptomy nedostatku fosforu u cukrové řepy	20
Obrázek 4. Symptomy nedostatku draslíku u cukrové řepy	22
Obrázek 5. Symptomy nedostatku hořčíku u cukrové řepy	25
Obrázek 6. Symptomy nedostatku síry u cukrové řepy	27
Obrázek 7. Symptomy nedostatku mědi u cukrové řepy	32
Obrázek 8. Srdéčková hniloba u cukrové řepy	33
Obrázek 9. Symptomy nedostatku bóru u cukrové řepy	34
Obrázek 10. Symptomy nedostatku molybdenu u cukrové řepy	35
Obrázek 11. Syntéza sacharózy	42
Obrázek 12. Biochar	47
Obrázek 13. Cyklus výroby biocharu, jeho modifikace a použití v půdě a mechanismus ochrany před chorobami	49
Obrázek 14. Cukrová řepa	57
Obrázek 15. Vybraná lokalita	58
Obrázek 16. Klimatizovaný skleník v ÚEB AV ČR.....	59
Obrázek 17. Testované varianty	60
Obrázek 18. Sklizeň rostlin	61
Obrázek 19. Zabudovaný vlhkostí senzor a rhizon vzorkovač	63
Obrázek 20. pH metr 3310 a multimetr Multi 3420	63
Obrázek 21. Metoda Mehlich III.....	66

9.2 Tabulky

Tabulka 1. Průměrné hodnoty obsahu jednotlivých prvků makroživin v sušině těl rostlin	16
Tabulka 2. Průměrné hodnoty obsahu jednotlivých prvků mikroživin v sušině těl rostlin	28
Tabulka 3. Průměrné obsahy prvků v rostlinách a v půdě	28
Tabulka 4. Použité přísady	59
Tabulka 5. Experimentální design	60
Tabulka 6. Obsah extrakčního činidla Mehlich III.	65
Tabulka 7. Charakteristiky vody v půdních pórech	69
Tabulka 8. Výměna plynů v listech rostlin cukrové řepy	71
Tabulka 9. Obsah uhlíku v biomase cukrové řepy	75
Tabulka 10. Obsah vápníků v biomase cukrové řepy	76
Tabulka 11. Obsah síry v biomase cukrové řepy	76
Tabulka 12. Obsah hořčíku v biomase cukrové řepy	77
Tabulka 13. Obsah sodíku v biomase cukrové řepy	77
Tabulka 14. Celkový obsah sacharózy v cukrové řepě	78
Tabulka 15. Celkový obsah fruktózy v cukrové řepě	79
Tabulka 16. Celkový obsah glukózy v cukrové řepě	80

9.3 Grafy

Graf 1. Průběh půdní vlhkosti	Chyba! Záložka není definována.68
Graf 2. Charakteristiky eluce půdy	70
Graf 3. Průměrná čerstvá hmotnost	72
Graf 4. Obsah dusíku (N) v cukrové řepě	73
Graf 5. Obsah fosforu (P) v cukrové řepě	74
Graf 6. Obsah draslíku (K) v cukrové řepě	Chyba! Záložka není definována.74
Graf 7. Celkový obsah sacharózy v cukrové řepě	79
Graf 8. Celkový obsah fruktózy v cukrové řepě	80
Graf 9. Celkový obsah glukózy v cukrové řepě	81
Graf 10. Obsah cukru v hlízách	81

10 Seznam příloh

Příloha 1. Vstupní data pro vlhkostní senzory (FDR)	115
Příloha 2. Vstupní data pro charakteristiky vody v půdních pórech	115
Příloha 3. Vstupní data pro obsahy prvků v hlízách cukrové řepy	116
Příloha 4. Vstupní data pro obsahy prvků v listech cukrové řepy	116
Příloha 5. Vstupní data pro obsahy cukru v hlízách cukrové řepy	117
Příloha 6. Laboratorní technická váha Mettler Toledo	117
Příloha 7. Navažování půdních vzorků	118
Příloha 8. Extrakce činidlem Mehlich III. (manuální dávkovač)	118
Příloha 9. Horizontální třepačka GFL 3005	119
Příloha 10. Přefiltrovaná suspenze	119

11 Přílohy

	Týden 1	Týden 2	Týden 3	Týden 4	Týden 5	Týden 6	Týden 7	Týden 8	Týden 9	Týden 10	Týden 11	Týden 12	Týden 13	Týden 14	Týden 15
C	15,44872	18,45074	17,75577	18,55397	17,33820	17,09726	18,64601	20,91537	19,01689	8,47914	6,56751	10,53460	9,45072	12,48303	13,20036
B2	25,32275	28,70683	28,04101	29,71520	26,91574	28,00463	30,13753	31,13091	20,39291	9,24842	7,09780	11,00587	7,56440	10,89120	10,14062
B5	32,45419	38,50608	39,84513	41,81241	36,62810	36,68629	38,59390	40,20217	25,68547	15,07065	13,17734	18,96645	16,29393	18,52399	17,17639
M2	18,54488	21,02681	21,43674	23,11850	22,30195	22,48462	23,19975	24,78227	21,06530	8,18807	5,06783	10,18852	6,65462	8,90216	9,10110
M5	22,94263	26,67261	26,76966	28,30002	25,79600	26,06820	27,64430	29,25768	21,54014	10,24657	7,97762	12,67386	9,99092	12,70010	12,40462
MB2	20,39793	20,70558	19,87338	22,04939	19,02043	18,90480	21,89542	24,35262	18,00819	9,83512	7,50647	11,31249	7,97750	10,21498	11,11477
MBS	20,49328	23,81290	23,79613	25,11765	24,37099	24,77005	25,70939	26,71167	21,80787	9,75715	6,92674	11,87373	8,38171	9,12994	9,94803

Příloha 1. Vstupní data pro vlhkostní senzory (FDR)

pH	Ec μ S	(TN)mg/l	(TN)mg/l	PO4 mg/l	S04 mg/l	(TC) mg/l	(NPOC) mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Na mg/l
4,64	786,00	63,44	6,58	1,58	143,74	36,99	29,90	5,97	17,28	36,85
4,26	782,50	59,02	5,44	1,41	173,53	31,11	34,37	6,20	16,19	36,69
4,80	779,00	67,85	7,88	1,65	189,22	33,33	31,31	5,74	18,37	37,02
5,72	976,00	55,30	15,70	1,11	279,71	22,40	21,30	1,46	11,74	85,13
5,75	1054,00	53,56	16,74	1,15	287,83	23,66	22,28	1,67	10,27	94,50
5,73	1015,00	45,01	17,93	1,22	268,54	22,26	19,91	1,78	10,27	82,86
6,58	900,00	23,75	1,06	0,54	234,00	27,79	12,22	1,09	12,31	75,84
6,70	860,00	29,25	2,00	0,59	220,67	28,27	11,39	2,89	12,27	81,17
6,93	865,00	23,08	2,67	0,66	233,33	28,36	12,10	2,35	13,45	79,53
5,57	1413,00	144,70	26,60	5,65	188,58	115,80	116,90	66,14	30,32	89,70
5,61	1305,00	134,80	31,10	5,48	190,85	111,80	107,90	88,78	30,27	88,86
5,53	1521,00	147,10	27,90	5,55	184,63	110,30	109,10	73,50	30,37	90,55
6,40	2060,00	196,50	54,91	7,41	272,81	167,30	158,70	316,96	36,16	98,01
5,95	2050,00	208,50	57,17	7,31	274,26	178,80	166,30	273,97	28,19	108,68
6,63	2240,00	202,80	50,13	7,65	286,65	168,00	175,30	271,83	30,45	104,98
5,24	1518,00	122,08	4,92	4,80	186,43	129,50	107,53	70,81	26,81	88,44
5,17	1717,00	130,60	5,03	4,41	194,13	128,80	117,10	62,01	19,88	96,20
5,32	1319,00	128,03	5,01	4,13	179,16	127,00	110,70	70,35	23,18	90,72
6,04	1770,00	144,71	13,52	6,82	246,19	187,10	155,27	201,48	29,65	100,97
6,14	1959,00	148,10	12,36	6,45	265,13	186,90	143,40	229,06	32,58	104,08
6,66	1744,00	155,60	14,85	6,33	263,36	196,20	164,10	198,12	32,68	117,58

Příloha 2. Vstupní data pro charakteristiky vody v půdních pórech pro jednotlivá ošetření

Vzorek	Varianta	Část	Opakování	N_procent	N (g/kg)	C_procent	C (g/kg)	C/N	H_procent	Ca (g/kg)	K (g/kg)	Mg (g/kg)	P (g/kg)	S (g/kg)	Na (g/kg)	Čerstvá hmotnost
1	Control	Hliza	1	0,469	4,889	42,1368	421,3678	86,18131	6,391	3,79	6,77	2,48	1,59	1,40	2,04	5,40
2	Control	Hliza	2	0,475	4,749	42,1418	421,4178	88,73228	6,392	4,05	6,85	2,57	1,51	1,54	1,83	6,38
3	Control	Hliza	3	0,470	4,999	42,1468	421,4678	84,30506	6,396	5,03	7,14	2,67	1,66	1,54	1,99	5,97
4	Control	Hliza	4	0,472	4,636	42,1458	421,4578	90,9148	6,393	4,35	7,87	2,81	1,71	1,45	1,72	6,45
5	Control	Hliza	5	0,473	4,825	42,1393	421,3928	87,32999	6,395	5,31	7,95	2,88	1,72	1,66	1,94	6,43
6	B2%	Hliza	1	0,549	5,686	42,2944	422,9439	74,38508	6,430	3,41	6,48	2,45	1,82	0,90	1,49	8,04
7	B2%	Hliza	2	0,546	5,659	42,2936	422,9359	74,74254	6,430	3,31	7,80	2,36	1,71	0,91	1,35	8,72
8	B2%	Hliza	3	0,546	5,699	42,2964	422,9639	74,2217	6,432	3,95	7,68	3,09	1,82	1,12	1,42	7,35
9	B2%	Hliza	4	0,547	5,469	42,2974	422,9739	77,34458	6,433	3,41	8,02	3,02	1,95	1,06	1,69	7,51
10	B2%	Hliza	5	0,546	5,460	42,2934	422,9339	77,46476	6,430	3,25	7,14	2,72	1,63	0,95	1,63	8,41
11	B5%	Hliza	1	0,465	4,857	42,3039	423,0386	87,10496	6,530	3,00	6,51	2,26	1,97	0,52	1,01	9,46
12	B5%	Hliza	2	0,466	4,664	42,3030	423,0296	90,71052	6,528	3,13	6,68	2,29	2,05	0,54	1,15	9,48
13	B5%	Hliza	3	0,467	4,674	42,3039	423,0386	90,51835	6,527	2,82	6,73	2,22	2,23	0,49	0,93	10,03
14	B5%	Hliza	4	0,468	4,684	42,3049	423,0486	90,32722	6,526	3,16	6,95	2,20	1,95	0,53	0,83	9,43
15	B5%	Hliza	5	0,465	4,786	42,3059	423,0586	88,38857	6,525	2,96	6,29	2,11	1,81	0,49	1,10	10,57
16	M2%	Hliza	1	0,425	4,250	42,0427	420,4271	98,92626	6,485	2,22	9,52	2,47	1,97	0,60	0,86	10,33
17	M2%	Hliza	2	0,426	4,569	42,0427	420,4274	92,02625	6,485	2,11	8,83	2,32	1,99	0,68	0,96	11,24
18	M2%	Hliza	3	0,425	4,587	42,0428	420,4282	91,65896	6,485	1,95	8,14	2,12	2,01	0,57	0,81	10,62
19	M2%	Hliza	4	0,426	4,587	42,0426	420,4262	91,65885	6,485	2,25	9,42	2,65	2,26	0,65	0,91	10,51
20	M2%	Hliza	5	0,426	4,346	42,0426	420,4263	96,74783	6,484	1,94	8,07	1,96	2,09	0,59	0,98	11,84
21	M5%	Hliza	1	0,494	4,879	42,0232	420,2320	86,13272	6,480	1,34	9,16	2,22	2,18	0,67	0,53	11,57
22	M5%	Hliza	2	0,494	4,944	42,0225	420,2246	84,99236	6,482	1,56	8,80	2,44	1,86	0,59	0,58	12,46
23	M5%	Hliza	3	0,495	4,759	42,0232	420,2322	88,30735	6,484	1,36	9,67	2,06	1,71	0,71	0,54	13,05
24	M5%	Hliza	4	0,494	5,094	42,0222	420,2225	82,49076	6,482	1,47	9,63	2,46	1,96	0,72	0,52	13,39
25	M5%	Hliza	5	0,494	5,141	42,0272	420,2720	81,7433	6,481	1,62	9,16	2,60	2,16	0,68	0,60	13,11
26	MB2%	Hliza	1	0,595	5,356	41,8469	418,4689	78,13252	6,493	1,94	9,76	2,00	2,15	0,96	1,03	16,37
27	MB2%	Hliza	2	0,594	5,999	41,8472	418,4719	69,75852	6,494	1,96	8,14	2,11	1,92	0,92	1,16	15,81
28	MB2%	Hliza	3	0,594	6,194	41,8483	418,4829	67,56758	6,493	2,15	8,62	2,06	1,97	0,79	1,02	16,04
29	MB2%	Hliza	4	0,594	5,856	41,8469	418,4693	71,45546	6,494	1,66	8,66	2,20	1,81	0,75	0,92	16,75
30	MB2%	Hliza	5	0,594	6,043	41,8479	418,4789	69,2554	6,493	2,37	10,06	2,81	2,16	0,98	1,09	16,31
31	MB5%	Hliza	1	0,426	4,426	41,9208	419,2084	94,7238	6,507	1,25	9,49	2,00	1,95	0,63	0,49	20,09
32	MB5%	Hliza	2	0,427	4,587	41,9308	419,3084	91,41478	6,507	1,22	8,19	2,04	1,96	0,49	0,48	19,63
33	MB5%	Hliza	3	0,427	4,452	41,9111	419,1108	94,13384	6,508	1,69	9,78	2,69	2,29	0,72	0,61	19,26
34	MB5%	Hliza	4	0,428	4,426	41,9208	419,2084	94,71731	6,506	1,55	9,67	2,33	2,23	0,68	0,67	20,08
35	MB5%	Hliza	5	0,427	4,325	41,9236	419,2358	96,94003	6,508	1,77	8,73	2,08	1,94	0,52	0,71	19,98

Příloha 3. Vstupní data pro obsahy prvků v hlízách cukrové řepy

Vzorek	Varianta	Část	Opakování	N_procent	N (g/kg)	C_procent	C (g/kg)	C/N	H_procent	Ca (g/kg)	K (g/kg)	Mg (g/kg)	P (g/kg)	S (g/kg)	Na (g/kg)	Čerstvá hmotnost
1	Control	Listy	1	1,042	10,621	38,7530	387,53	36,49	5,574	24,7	33,1	12,4	9,2	3,2	33,6	6,04
2	Control	Listy	2	1,041	10,310	38,7510	387,51	37,59	5,575	23,2	29,9	16,8	8,8	3,5	40,1	6,39
3	Control	Listy	3	1,039	10,490	38,7518	387,52	36,94	5,576	27,9	27,9	15,3	9,6	3,2	41,0	5,79
4	Control	Listy	4	1,043	10,630	38,7520	387,52	36,46	5,575	27,3	30,9	16,7	10,7	2,6	31,8	6,47
5	Control	Listy	5	1,040	10,752	38,7540	387,54	36,04	5,528	24,9	27,4	15,1	9,6	3,2	32,9	6,83
6	B2%	Listy	1	0,985	10,065	34,2910	342,91	34,07	4,676	35,6	57,8	21,6	12,4	3,9	27,6	6,35
7	B2%	Listy	2	0,982	9,999	34,2916	342,92	34,30	4,686	34,9	50,9	20,3	10,1	4,0	30,7	7,67
8	B2%	Listy	3	0,983	9,925	34,2904	342,90	34,55	4,677	35,4	50,9	23,1	11,4	4,3	27,2	7,10
9	B2%	Listy	4	0,981	9,810	34,2944	342,94	34,96	4,679	35,9	53,0	22,1	11,9	4,9	26,9	6,10
10	B2%	Listy	5	0,986	9,790	34,2920	342,92	35,03	4,675	36,8	55,9	22,5	12,8	4,5	29,8	6,72
11	B5%	Listy	1	1,013	10,256	37,9042	379,04	36,96	5,382	31,7	54,2	21,0	5,4	4,2	19,6	9,66
12	B5%	Listy	2	1,012	10,356	37,9052	379,05	36,60	5,388	33,6	57,6	19,0	5,8	4,4	20,7	9,49
13	B5%	Listy	3	1,011	10,356	37,9062	379,06	36,60	5,382	29,7	51,0	18,8	4,4	4,8	18,0	8,70
14	B5%	Listy	4	1,015	10,150	37,9072	379,07	37,35	5,381	32,7	52,9	19,3	5,6	5,0	23,9	9,92
15	B5%	Listy	5	1,013	10,256	37,9082	379,08	36,96	5,381	32,7	55,8	20,6	5,2	5,2	23,1	10,57
16	M2%	Listy	1	1,037	10,369	35,8125	358,13	34,54	4,975	26,1	62,2	22,9	18,1	3,0	19,9	12,51
17	M2%	Listy	2	1,038	10,380	35,8114	358,11	34,50	4,676	26,6	76,9	21,0	16,2	2,9	21,6	12,73
18	M2%	Listy	3	1,039	10,390	35,8164	358,16	34,47	4,677	25,4	64,5	21,3	19,7	2,2	19,8	12,41
19	M2%	Listy	4	1,040	10,690	35,8175	358,18	33,51	4,678	26,2	69,3	20,8	18,8	2,4	20,0	12,40
20	M2%	Listy	5	1,033	10,312	35,8185	358,19	34,73	4,673	23,7	66,7	19,4	16,2	2,7	19,1	13,11
21	M5%	Listy	1	1,021	10,370	34,1928	341,93	32,97	4,675	19,4	78,3	15,4	21,3	4,8	18,5	14,82
22	M5%	Listy	2	1,019	10,102	34,1938	341,94	33,85	4,675	20,1	79,5	16,8	20,4	4,3	15,7	15,68
23	M5%	Listy	3	1,020	10,290	34,1926	341,93	33,23	4,676	21,0	82,3	17,2	20,3	4,5	16,7	14,40
24	M5%	Listy	4	1,022	10,426	34,1968	341,97	33,80	4,679	19,3	77,8	17,4	18,3	4,4	19,7	16,91
25	M5%	Listy	5	1,023	10,359	34,1988	341,99	33,01	4,617	19,2	71,6	15,9	16,1	4,1	19,3	14,27
26	MB2%	Listy	1	1,270	12,401	37,3135	373,14	30,09	5,123	28,6	59,8	23,2	17,2	3,6	20,4	13,45
27	MB2%	Listy	2	1,271	12,686	37,3155	373,16	29,42	5,225	25,9	59,7	24,1	15,9	3,3	22,8	11,07
28	MB2%	Listy	3	1,269	12,899	37,3175	373,18	28,93	5,224	23,1	64,5	20,8	16,7	3,6	21,6	10,65
29	MB2%	Listy	4	1,272	12,985	37,3139	373,14	28,74	5,227	25,8	60,4	21,6	17,0	2,2	20,0	11,25
30	MB2%	Listy	5	1,268	12,758	37,3165	373,17	29,35	5,224	23,6	65,2	19,6	15,9	3,5	21,5	14,84
31	MB5%	Listy	1	1,060	10,786	34,9016	349,02	32,36	4,855	20,5	67,4	19,0	23,1	3,8	15,5	13,61
32	MB5%	Listy	2	1,059	10,686	34,9026	349,03	32,66	4,826	19,7	69,2	16,7	22,9	3,9	14,6	13,94
33	MB5%	Listy	3	1,061	10,785	34,9035	349,04	32,36	4,866	19,4	67,2	17,7	20,6	4,4	16,7	15,05
34	MB5%	Listy	4	1,062	10,790	34,9047	349,05	32,35	4,837	18,3	72,2	18,5	18,5	3,9	15,7	14,39
35	MB5%	Listy	5	1,060	10,436	34,9016	349,02	33,44	4,840	19,7	66,2	19,0	21,0	4,3	17,6	12,87

Příloha 4. Vstupní data pro obsahy prvků v listech cukrové řepy

Vzorek	Varianta		Fruktóza mg/g	Glukóza mg/g	Sacharóza mg/g	Čerstvá hmotnost
1	Control	Hlíza	13,875	45,386	642,10	5,40
2	Control	Hlíza	13,599	41,669	662,19	6,38
3	Control	Hlíza	15,275	43,846	649,09	5,97
4	Control	Hlíza	17,894	48,455	646,11	6,45
5	Control	Hlíza	14,728	42,620	632,26	6,43
6	B2%	Hlíza	38,091	58,336	702,80	8,04
7	B2%	Hlíza	34,371	61,370	711,90	8,72
8	B2%	Hlíza	35,921	60,280	690,99	7,35
9	B2%	Hlíza	38,850	61,442	698,40	7,51
10	B2%	Hlíza	36,309	62,159	702,72	8,41
11	B5%	Hlíza	25,033	48,329	703,34	9,46
12	B5%	Hlíza	25,131	50,724	703,03	9,48
13	B5%	Hlíza	27,260	48,388	691,55	10,03
14	B5%	Hlíza	25,051	46,891	683,53	9,43
15	B5%	Hlíza	26,191	52,018	699,14	10,57
16	M2%	Hlíza	17,213	20,228	674,98	10,33
17	M2%	Hlíza	15,030	20,159	670,60	11,24
18	M2%	Hlíza	15,337	22,380	681,90	10,62
19	M2%	Hlíza	17,015	23,115	679,28	10,51
20	M2%	Hlíza	16,348	20,628	676,40	11,84
21	M5%	Hlíza	36,552	65,527	772,06	11,57
22	M5%	Hlíza	37,886	62,439	766,73	12,46
23	M5%	Hlíza	35,457	63,680	774,10	13,05
24	M5%	Hlíza	37,556	64,279	764,22	13,39
25	M5%	Hlíza	35,144	63,262	765,45	13,11
26	MB2%	Hlíza	36,267	52,815	722,41	16,37
27	MB2%	Hlíza	33,314	55,889	715,37	15,81
28	MB2%	Hlíza	30,648	56,404	724,02	16,04
29	MB2%	Hlíza	31,157	54,489	732,80	16,75
30	MB2%	Hlíza	34,361	52,701	733,94	16,31
31	MB5%	Hlíza	31,471	51,388	707,17	20,09
32	MB5%	Hlíza	34,028	44,017	693,59	19,63
33	MB5%	Hlíza	28,761	45,225	688,79	19,26
34	MB5%	Hlíza	29,465	50,900	714,97	20,08
35	MB5%	Hlíza	31,457	48,693	688,89	19,98

Příloha 5. Vstupní data pro obsahy cukru v hlízách cukrové řepy



Příloha 6. Laboratorní technická váha Mettler Toledo



Příloha 7. Navažování půdních vzorků



Příloha 8. Extrakce činidlem Mehlich III. (manuální dávkovač)



Příloha 9. Horizontální třepačka GFL 3005



Příloha 10. Přefiltrovaná suspenze