



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

OPTIMALIZACE METOD PRO POSOUZENÍ VLIVU BIOUHLU NA RŮST MODELOVÝCH ROSTLIN

OPTIMIZATION OF THE METHODOLOGY FOR ASSESSMENT OF BIOCHAR EFFECT ON THE GROWTH OF
MODEL PLANTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Natálie Štorková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Kalina, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1590/2020 Akademický rok: 2020/21
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie
Studentka: **Natálie Štorková**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: Spotřební chemie
Vedoucí práce: **Ing. Michal Kalina, Ph.D.**

Název bakalářské práce:

Optimalizace metod pro posouzení vlivu biouhlu na růst modelových rostlin

Zadání bakalářské práce:

- 1) Prostudovat problematiku využití biouhlu v zemědělství. Zaměřit se na definování optimální formy a dávky biouhlu a metod pro kvantifikaci růstu modelové rostliny.
- 2) Na základě literární rešerše optimalizovat kultivační experiment modelové rostliny v pěstebním boxu s řízeným osvětlením a závlahou.
- 3) Definovat a optimalizovat metodiky pro kvalitativní a kvantitativní posouzení vlivu biouhlu na růst modelové rostliny.
- 4) Realizace modelového kultivačního experimentu v pěstebním boxu.
- 5) Zhodnocení naměřených dat a formulace závěrů.

Termín odevzdání bakalářské práce: 30.7.2021:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Natálie Štorková
student(ka)

Ing. Michal Kalina, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2021

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce studuje vliv biouhlu na růst modelové rostliny a optimalizuje metody pro jeho posouzení. V teoretické části jsou popsány vlastnosti a využití pomocných půdních látek, kdy velká pozornost je věnována především biouhlu. Na základě literární rešerše byla jako modelová rostlina pro kultivační experiment zvolena kukuřice setá (*Zea mays*) a byly určeny aplikační dávky biouhlu. Kultivační experiment probíhal v pěstebním boxu s řízeným osvětlením a závlahou. Pro vyhodnocení vlivu biouhlu na kvantitativní a kvalitativní vlastnosti modelových rostlin se využilo průběžné měření výšky rostlin v závislosti na době kultivace, vážení suché hmotnosti rostlin po ukončení kultivace, a také obrazové analýzy kořenového systému. Ze získaných dat je zřejmé, že rozdíly v růstu byly ovlivněny jak aplikační dávkou a typem biouhlu, tak i druhem půdy ve které kultivační experiment probíhal.

ABSTRACT

This bachelor thesis is studying the effect of biochar on the growth of model plant and deals with the optimization of the methods for assessing its impact. Theoretical part describes the properties and utilization of soil conditioners, special attention is focused on biochar. According to the literature research, maize (*Zea mays*) was chosen as a model plant for cultivation experiment and subsequently the application doses of biochar were also defined. The cultivation experiment took place in growing box under controlled illumination and irrigation. Plant dry weight weighing after cultivation, continuous measurement of plant height during the cultivation and also image analysis of the root system were used for evaluating the influence of biochar on quantitative and qualitative properties of model plants. From obtained data it can be summarized that the growth differences were influenced by the application dose, the type of biochar and also by type of soil, which was used for the cultivation experiment.

KLÍČOVÁ SLOVA

biouhel, půda, organická hmota, kultivace, kukuřice setá, obrazová analýza

KEY WORDS

biochar, soil, organic matter, cultivation, maize, image analysis

ŠTORKOVÁ, Natálie. *Optimalizace metod pro posouzení vlivu biouhlu na růst modelových rostlin* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-07-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/130297>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce Michal Kalina.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěla poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Kalinovi, Ph.D. za jeho konzultace, odbornou pomoc a rady, které mi poskytl během psaní bakalářské práce. Poděkování patří také Ing. Šárce Sovové za cenné rady a pomoc během provádění experimentu. V neposlední řadě velké díky patří mé rodině a blízkým za podporu během celého studia.

OBSAH

1 ÚVOD	6
2 TEORETICKÁ ČÁST	7
2.1 Půdní pomocné látky	7
2.1.1 Hydrogely	7
2.1.2 Lignit	8
2.1.3 Perlit	9
2.1.4 Zeolit	9
2.1.5 Biouhel	10
2.2 Biouhel.....	11
2.2.1 Historický kontext	11
2.2.2 Výroba biouhlu.....	12
Vlastnosti biouhlu	12
2.2.3 Využití biouhlu.....	14
2.3 Půda.....	16
2.3.1 Složení půdy	16
2.3.2 Vlastnosti půdy.....	18
2.4 Obrazová analýza.....	19
2.4.1 Obrazová analýza kořenového systému	20
3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	21
4 CÍL PRÁCE	23
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	24
5.1 Použité chemikálie, materiály, přístroje a pomůcky	24
5.1.1 Chemikálie a použité materiály	24
5.1.2 Přístroje a pomůcky.....	24
5.2 Charakteristika použitých půd	24
5.3 Kultivační experimenty	25
5.3.1 Dlouhodobé kultivace	25
5.3.2 Kultivace pro obrazovou analýzu.....	27
5.4 Obrazová analýza.....	28
6 VÝSLEDKY A DISKUZE	30
6.1 Podmínky kultivačních experimentů	30
6.2 Vliv biouhlu na růst kukuřice seté (<i>Zea mays</i>)	30
6.2.1 Kvantitativní charakteristiky	32
6.2.2 Obrazová analýza kořenového systému	38
7 ZÁVĚR	44
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	45
PŘÍLOHA	52

1 ÚVOD

Půda je nejdůležitějším zdrojem mnoha živin a sídlem mikroflóry. V důsledku stále rostoucí populace a používání nadměrného množství chemických hnojiv dochází k velkému úbytku zemědělských ploch a snižování jejich kvality. Růst a produktivita rostlin jsou významně ovlivňovány různými biotickými (živé organismy) a abiotickými stresy (vysoká salinita, sucho, nedostatek živin, extrémní teploty) a kvalitou půdy [1].

Prostřednictvím různých lidských činností je půda kontaminována těžkými kovy a má nedostatek nejen makroživin (dusík, fosfor, draslík), ale také sekundárních živin (síra, vápník, hořčík) a mikroživin (bór, zinek, měď, železo). Aby se půdě dodaly potřebné živiny, dochází k přidávání velkého množství již zmiňovaných chemických hnojiv. Jejich rozsáhlé používání vede však ke zhoršení životního prostředí a způsobuje problémy. Dlouhodobé používání hnojiv a pesticidů nepříznivě ovlivňuje půdní mikroflóru, čímž je narušena kvalita půdy a významně snížena celková bakteriální a houbová biomasa. Použití biouhlu se jeví jako slibný způsob nejen k vylepšení kvality půdy a zvýšení produktivity rostlin, ale také k výraznému snížení mobility těžkých kovů v půdě [1].

Běžné zemědělské odpady se ve světě produkují ve velkém množství, jejich přeměna na biouhel by mohla být možností pro udržitelnost životního prostředí. Tento produkt přitahuje pozornost také díky širokým možnostem aplikace jako je čištění odpadních vod, redimentace půdy, zachycování CO₂ a zmírňování změn klimatu [2].

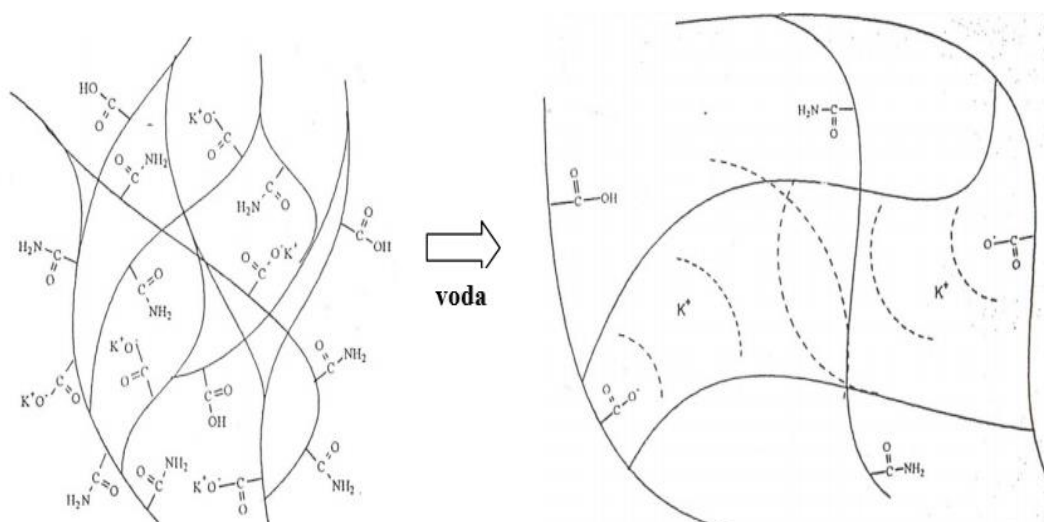
2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Půdní pomocné látky

Pomocnou půdní látkou, podle zákona č. 156/1998 Sb., Zákon o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd, je „látka bez účinného množství živin, která půdu biologicky, chemicky nebo fyzikálně ovlivňuje, zlepšuje její stav nebo zvyšuje účinnost hnojiv, s výjimkou přípravků na ochranu rostlin” [3]. Mezi nejběžněji používané půdní pomocné látky patří různé formy hydrogelů či hydrosorbentů, dále lignit, biouhel, perlit nebo také zeolit. Aplikační dávky látek jsou zobrazeny v tabulce (Tabulka 1). V následujících podkapitolách jsou tyto základní půdní pomocné látky blíže popsány.

2.1.1 Hydrogely

Hydrogely jsou definovány jako polymerní materiály, jejichž hydrofilní struktura jim umožňuje udržet velké množství vody ve svých trojrozměrných sítích. Další z definic označuje hydrogely jako dvousložkové nebo vícesložkové materiály skládající se z trojrozměrné sítě polymerních řetězců a vody, která vyplňuje prostor mezi makromolekulami. V závislosti na vlastnostech použitého polymeru (polymerů) a taky charakteru a hustotě sítí mohou tyto struktury v rovnováze obsahovat různé množství vody (obvykle v nabobtnalém stavu), hmotnostní podíl vody v hydrogelu je mnohem vyšší než hmotnostní podíl polymeru. Schopnost hydrogelů absorbovat vodu umožňují hydrofilní funkční skupiny připojené k polymerní páteři, zatímco jejich odolnost vůči rozpouštění vyplývá z vazeb mezi zesíťovanými řetězci. Absorpce vody gelovými částicemi je znázorněna na následujícím obrázku (Obrázek 1). Hydrogely mohou dramaticky měnit svůj objem při reakci na různé fyzikální a chemické podněty. Fyzikální podněty zahrnují teplotu, elektrické nebo magnetické pole, světlo, tlak a zvuk, zatímco chemické podněty zahrnují pH, složení rozpouštědel a iontovou sílu [4].



Obrázek 1: Absorpce vody gelovými částicemi [5].

Hydrogely můžeme klasifikovat na základě přírodního nebo syntetického původu. Mezi hydrogely tvořené přírodními polymery patří např. kolagen, želatina, škrob, alginát a agaróza [4]. Jejich výhodou je biokompatibilita, biologická rozložitelnost a netoxičnost. Přírodní hydrogely byly postupně nahrazovány syntetickými kvůli jejich dlouhé životnosti, vyšší kapacitě absorpce vody, širokým možnostem surových chemických zdrojů a vysoké pevnosti gelu [6]. Syntetické polymery, které vznikly chemickými reakcemi organických monomerů, jsou široce využívány pro tvorbu hydrogelů. Ačkoliv mohou absorbovat větší množství vody než přírodní hydrogely a mají vynikající mechanické vlastnosti, špatná rozložitelnost a potenciální toxicita omezují jejich aplikace [6].

Hydrogely mohou mít záporný, kladný nebo neutrální náboj. Tyto náboje určují, jak budou hydrogely reagovat s půdou a rozpuštěnými látkami. Jílové složky mají záporný náboj a těžké kovy mají kladný náboj. Kladně nabité hydrogely se obecně vážou na jílové složky a chovají se jako flokulanty, záporně nabité hydrogely se můžou vázat na jíl a další záporně nabitě částice pomocí solných můstků přes vápník a hořčík. Způsob interakce hydrogelů se složkami půdy a látkami rozpuštěnými v půdě představuje komplexní problematiku závislou jednak na povaze interagujících látek, ale také na okolních podmínkách (pH, vodivost, teplota). Čím silnější je interakce mezi gelem a okolními rozpuštěnými látkami a částicemi půdy, tím větší je schopnost gelu absorbovat vodu, vytvářet agregáty a stabilizovat strukturu půdy [7].

V zemědělství jsou hydrogely využívány pro zlepšení fyzikálních vlastností půdy. Jejich hlavní výhodou je schopnost zadržet dostatek vody a během sucha ji postupně uvolňovat. Dále ovlivňují rychlost odpařování a infiltrace vody půdou, zvyšují provzdušňování půdy a mikrobiální aktivitu. Hydrogely pomáhají snižovat vodní stres rostlin, což vede ke zlepšení vývoje a růstu rostlin, zejména v oblastech vystavených suchu [7]. Použití hydrogelů v zemědělství má tedy mnoho výhod, nicméně v současné době je většina dostupných hydrogelů syntetizována z polyakrylamidu, kyseliny polyakrylové a dalších polyakrylátů [8]. Tyto syntetické hydrogely nejsou zcela biologicky rozložitelné a jsou považovány za potenciální kontaminanty půdy, protože vykazují určitý stupeň toxicity. V této souvislosti je nyní pozornost věnována biologicky rozložitelným hydrogelům na bázi polysacharidů (celulóza, chitosan, alginát a jejich deriváty) [8].

2.1.2 Lignit

Lignit je pojmenování jednoho z druhů hnědého uhlí. Je to nejméně karbonizované hnědé uhlí, které vzniká za redukčních podmínek rozkladem biomasy. Má složitou heterogenní strukturu. Skládá se z amorfních polymerů obsahujících dvojitě nebo trojitě substituovaný aromatický kruh, což vede k vytvoření trojrozměrné struktury. Obsahuje velké množství vody a je charakterizován vysokým obsahem huminových kyselin a fulvokyselin. Organické kyseliny (huminové kyseliny a fulvokyseliny) jsou primárně schopny imobilizovat kovy pomocí adsorpce nebo tvorby komplexů a zároveň napomáhají transportu živin a schopnosti zadržovat vodu [10].

Lignit slouží k fyzikální sorpci kapalin a plynů, dále k chemisorpci těžkých kovů a používá se jako složka směsných adsorbentů. Využívat ho můžeme jako levný sorbent pro vázání kovů (Pb, Zn, Cd) v průběhu čištění odpadních vod a také jako stabilizátor v půdách kontaminovaných těžkými kovy. Drcení a následná separace podle velikosti částic zvyšuje možnosti jeho využití [12].

2.1.3 Perlit

Perlit je amorfni vulkanické sklo vytvořené hydratací obsidiánu v kyselé fázi magmatu s relativně vysokým obsahem vody [14]. Skládá se z SiO_2 (71–75 %), Al_2O_3 (12–18 %), Fe_2O_3 (0,1–1,5 %) a malého množství oxidů kovů [15]. Chemicky je surový perlit v podstatě metastabilní amorfni hlinito–křemičitan [16]. Komerční produkt (běžně označovaný jako expandovaný perlit) se vyrábí zahřátím materiálu na 760–1100 °C, čímž se jeho původní voda (2–5 % celkové hmotnosti) přemění na páru a způsobí, že se materiál zvětší až na dvacetinásobek původního objemu, a vytvoří agregáty s vysokou pórovitostí. Během tepelného zpracování se skutečná hustota perlitu významně nemění, zatímco objemová hustota se mění znatelně. Dále během procesu ohřevu dochází k přechodu amorfni struktury na krystalickou formu [17].

Využití expandovaného perlitu je založeno především na jeho fyzikálních a chemických vlastnostech jako je malá objemová hmotnost, nízká tepelná vodivost, vysoká teplotní odolnost a chemická inertnost. Perlit je biologicky stabilní, netoxický a jako půdní aditivum provzdušňuje půdu. Využívá se tedy jako plnivo a izolační materiál ve stavebnictví, ale také jako půdní kondicionér nebo růstové médium [16].

2.1.4 Zeolit

Zeolity jsou hydratované krystalické tektoaluminosilikáty, které jsou konstruovány do čtyřstěnu tak, že každý vrcholový kyslík je sdílen mezi dvěma sousedními čtyřstěny. Charakteristické kationty obsažené v přírodních zeolitech jsou alkalické kovy (Na^+ , K^+) a kovy alkalických zemin (Ca^{2+} , Ba^{2+}) [18]. Jedná se o nerost se záporným nábojem a volnými kationty, tudíž je možná výměna látek s okolím. Mohou pohlcovat jak látky pevné, tak i kapalné a plynné. Poutá těžké kovy, toxiny a další škodlivé látky [19].

Zeolity můžeme rozdělit do dvou skupin podle jejich původu. Přírodní zeolity (těženy ze země) a syntetické zeolity (vyráběné v laboratořích). Přírodní se většinou nacházejí ve vulkanogenních sedimentárních horninách, které byly vytvořeny chemickými reakcemi sopečného popela a alkalické vody před mnoha tisíci lety. Existuje nejméně 60 druhů přírodních zeolitů, vyskytujících se v půdách, sedimentech a horninách. Patří sem například analcim, chabazit, klinoptilotit, erionit, mordenit a phillipsit. Poptávka po syntetických zeolitech byla hlavně z důvodu nedostatku a také kvůli nízké čistotě přírodních zeolitů. Přírodní zeolity obsahují totiž nečistoty, což často vede ke snížení jejich adsorpce a účinnosti výměny iontů. Je známo více než 200 druhů syntetických zeolitů [19].

Jejich využití je založeno na vlastnostech jako jsou schopnost zadržovat vodu a odolnost vůči vysokým teplotám. Snižují absorpci kovů a kyselost prostředí a fungují jako molekulární síta.

Setkat se s nimi můžeme v zemědělství, kde zlepšují kvalitu půdy, ale také při čištění odpadních vod nebo ve stavebnictví [20].

2.1.5 Biouhel

Biouhlu, jakožto důležité pomocné půdní látce bude věnována pozornost v kapitole 2.2.

Tabulka 1: Aplikační dávka, forma a efekt na půdu vybraných pomocných půdních látek.

PPL	Aplikační forma	Aplikační dávka	Efekt na půdu	Zdroj
Hydroabsorbent	přípravek Agrisorb	20 g·m ⁻²	Zvyšuje schopnost půdy zadržet vodu	[21]
Hydroabsorbent	přípravek hydrogel	2-3 g·l ⁻¹	Zvyšuje schopnost půdy zadržet vodu	[22]
Hydroabsorbent	přípravek plantagel	50-100 g·m ⁻²	Zadržuje půdní vlhkost, kořenům poskytuje ochranu proti vysychání	[22]
Zeolit	přípravek Plantasorb	500 g·m ⁻²	Zvyšuje schopnost půdy zadržet vodu	[22]
Zeolit	přípravek AKRA Kombi	250-350 kg·ha ⁻¹	Zlepšuje strukturu půdy	[22]
Lignit	přípravek TerraClean	1000 g·m ⁻²	Regulace uvolňování výživových prvků, dodává půdě organickou hmotu, zlepšuje zadržování vody	[23]
Lignit	Částice <5 mm	15-30 t·ha ⁻¹	Zlepšuje zadržování vody, poutá organickou hmotu	[3]
Biouhel	částice o velikosti 2 mm s přídávkem dusíkatého hnojiva	4-8 t·ha ⁻¹	Zvýšení pórovitosti a pH půdy, zlepšuje zadržování půdy	[21]
Biouhel	částice <2 mm	30 a 90 t·ha ⁻¹	Efekt na půdu závislý na kombinaci typu biouhlu a typu půdy	[24]
Biouhel	přípravek agrouhel	max 2 t·ha ⁻¹	Zvyšuje schopnost půdy zadržet vodu, zlepšuje strukturu půdy, upravuje pH půdy	[22]

2.2 Biouhel

Biouhel je pevný produkt bohatý na uhlík, vyráběný tepelným rozkladem organického materiálu za omezeného přístupu kyslíku a při teplotách nižších než 700 °C. Je vysoce stabilní a skládá se převážně z C, H, O, N a S. Zastoupení těchto prvků závisí na vstupní biomase a podmínkách pyrolýzy [25]. Mnoho organických materiálů lze použít jako vstupní surovinu pro výrobu biouhlu (dřevo, hnůj, listy, aj.) [26].

2.2.1 Historický kontext

Pojem biouhel vznikl v nedávné době, jako materiál má však dlouhou historii [27]. Jeho původ je spojen s oblastí Amazonie, kde byly objeveny černé a velmi úrodné půdy. V souvislosti s tmavou barvou byly pojmenovány jako *Terra Preta de Indio* (Obrázek 2 – porovnání půdy *Terra Preta* a *Oxisolu*). Tyto tmavé zeminy pokrývají pouze malé oblasti o rozloze nejčastěji 2 až 20 hektarů v nížinách, obvykle v blízkosti řek [28]. Půdy *Terra Preta* neobsahují pouze vyšší obsah živin (dusík, fosfor, draslík a hořčík), ale také větší množství stabilní organické hmoty. Časté nálezy dřevěného uhlí a vysoce aromatických huminových látek v půdě naznačují, že zbytky nedokonalého spalování organického materiálu jsou důležitými faktory pro udržitelné a úrodné půdy. Bylo také prokázáno, že obsah uhlíku v těchto antropogenních půdách byl několikanásobně vyšší než v okolních půdách. Díky své polycyklické aromatické struktuře je černý uhlík chemicky a mikrobiálně stabilní a přetrvává v půdě po staletí [29].



Obrázek 2: Typický půdní profil *Terra Preta* a *Oxisolu* [29].

2.2.2 Výroba biouhlu

Jako surovina pro výrobu biouhlu je vhodná široká škála organických materiálů. Mezi suroviny, které se v současné době komerčně využívají patří stromová kůra, dřevní štěpka, zbytky plodin (rýžové slupky, skořápky ořechů a sláma), tráva a organické odpady včetně lihovarského zrna [2]. Biouhel se vyrábí průmyslově pyrolýzou. Ta je obecně klasifikována podle teploty a doby zahřívání. Rychlá pyrolýza probíhá při teplotách nad 500 °C, obvykle v řádu sekund. Teplotní rozsah pomalé pyrolýzy je 250–500 °C a proces trvá od 30 minut do několika hodin. Teplota pyrolýzy a vstupní suroviny jsou hlavní faktory ovlivňující fyzikálně–chemické vlastnosti výsledných produktů [1].

Pojem pyrolýza je definován jako tepelné zpracování biomasy za nepřítomnosti kyslíku, které vede k výrobě pevné látky (uhel), kapaliny (dehet a vodný organický roztok) a plyných produktů [30]. Proces pyrolýzy obecně probíhá ve dvou fázích, a to v primární a sekundární fázi. V primární fázi dochází k dehydrataci, dekarboxylaci a dehydrogenaci, zatímco v sekundární fázi dochází k tepelnému krakování sloučenin s vysokou molekulovou hmotností [31].

Vliv podmínek přípravy na vlastnosti výsledného biouhlu

Biomasa se skládá převážně ze tří organických sloučenin, a to z celulózy (20–60 %), hemicelulózy (15–60 %) a ligninu (5–40 %). Ty se při tepelném zpracování chovají odlišně, a proto vstupní biomasa přímo ovlivňuje výtěžnost a vlastnosti výsledného produktu [31]. Hemicelulóza degraduje při 200–260 °C, celulóza při 240–350 °C a lignin v rozmezí 280 až 500 °C [26]. Vysoký obsah celulózy a hemicelulózy ve vstupních surovinách má za následek nízký výnos biouhlu, naopak větší podíl ligninu vede k vyššímu výnosu [31].

Provozní podmínky pyrolýzy jako jsou rychlost ohřevu, teplota pyrolýzy, tlak, doba zdržení, parametry použitého reaktoru (rozměry, režim míchání, katalyzátory), předúprava (sušení, drcení, chemická aktivace), průtok nosných plynů (dusík, oxid uhličitý, vzduch, pára) ovlivňují fyzikální vlastnosti biouhlu. Teplota pyrolýzy je nejdůležitějším parametrem, protože základní změny (uvolnění těkavých látek, tvorba meziproductů a těkavost meziproductů) jsou závislé na teplotě [26]. S rostoucí teplotou pyrolýzy se zvyšuje aromaticita, obsah uhlíku, pH, povrchová plocha, stabilita a velikost pórů, zatímco výtěžnost biouhlu, obsah vodíku a kyslíku se snižuje [32]. Okimori a kol. zjistili, že při zvyšující se teplotě z 300 na 800 °C se zvýšil obsah uhlíku z 56 % na 93 %, zatímco výtěžek biouhlu se snížil z 67 % na 26 % [33].

Vlastnosti biouhlu

Existuje sedm klíčových vlastností, podle nichž můžeme biouhel hodnotit [33]:

- pH,
- obsah těkavých sloučenin,
- obsah popela,
- kapacita zadržování vody,
- objemová hustota,
- objem pórů,
- specifická povrchová plocha.

Obsah těkavých sloučenin je snadno měřitelná vlastnost biouhlu související s jeho elementárním složením. Charakterizuje stupeň jeho tepelné přeměny a může mít přímý vliv na dynamiku uhlíku a dusíku v půdě [34]. Obsah těkavých látek ovlivňuje stabilitu materiálu, dostupnost N, růst rostlin a sorpční kapacitu [35]. Hlavní složky vstupní biomasy (C, H a O) se odpařují během dehydratace a pyrolýzy jako voda, uhlovodíky, dehtové páry, H₂, CO a CO₂ [36]. Zvyšování teploty vede ke snížení obsahu těkavých látek [35].

Obsah minerálů ve formě popela se v různých vstupních surovinách významně liší. Dřeviny mají obecně nízký obsah popela (<1 hm. %), zatímco tráva, sláma a obilné slupky mohou mít až 24 hm. % popela (kvůli vysokému obsahu oxidu křemičitého). V biouhlech vyrobených z hnoje a živočišného odpadu je obsah popela obvykle vysoký [36]. Mimo vstupní biomasy také podmínky výroby mají vliv na množství popela obsaženého v biouhlu. Se zvyšující se teplotou se zvyšuje obsah popela [35]. Mezi minerály nacházející se v biouhlech patří sylvit (KCl), křemen (SiO₂), kalcit (CaCO₃), v menším množství také dusičnany, oxidy a hydroxidy Ca, Mg, Al, Ti, Mn, Zn a Fe [36].

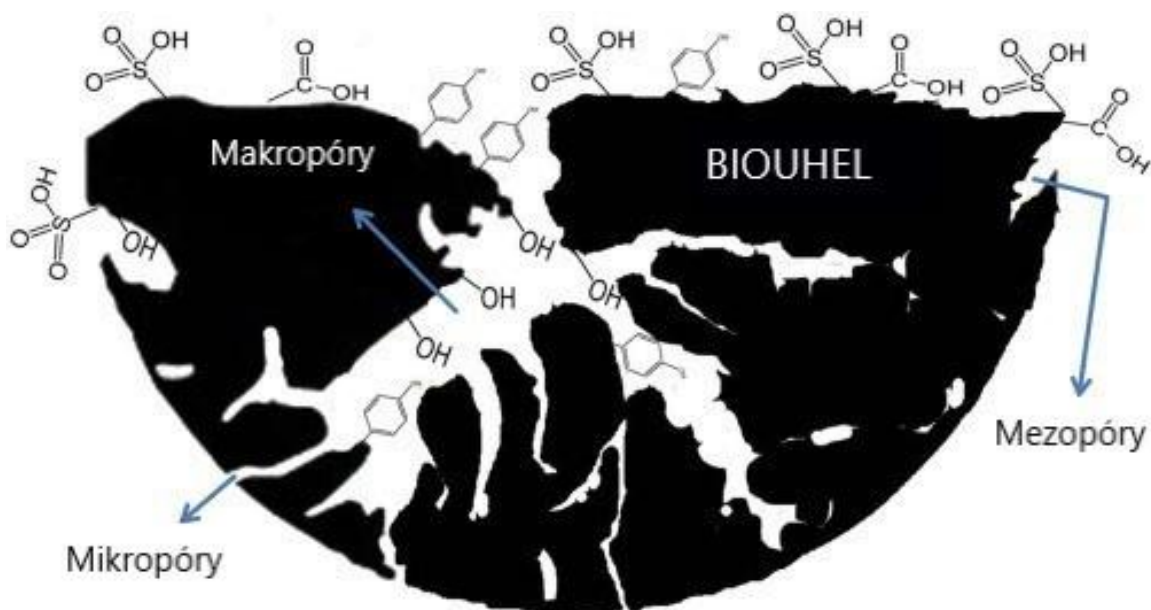
Hodnoty pH biouhlu se mohou pohybovat v rozmezí 3,1–12,0. Většina biouhlů využívaných pro aplikaci do půd je však alkalická. Během pyrolýzy dochází k odstranění kyselých funkčních skupin a zároveň je vstupní biomasa obohacena o soli alkalických kovů nebo kovů alkalických zemin. Tyto soli zahrnují již zmíněné uhličitany, křemičitany, lehce rozpustné soli a těžko rozpustné oxidy a hydroxidy kovů. Biouhly s nízkým obsahem popela (vyráběné z dřevin) mají obecně nižší hodnoty pH než biouhly s vyšším obsahem popela (vyráběné z trávy, zbytků rostlin nebo hnoje). Dále biouhly ze stejných vstupních surovin vyráběné za vyšších teplot (>400 °C) budou mít pravděpodobně vyšší hodnoty pH než biouhly vyráběné při nižších teplotách (<<400 °C). Hodnota pH závisí tedy jak na vstupních surovinách, tak na podmínkách přípravy [37].

Ztráta funkčních skupin a zvýšení pórovitosti jsou dva hlavní procesy, ke kterým dochází během pyrolýzy a ovlivňují hydrologické vlastnosti biouhlů. Ztráta funkčních skupin mění afinitu biouhlu k vodě a zvýšení pórovitosti mění množství vody, které může být absorbováno. Biouhly vyráběné při nižších teplotách (300–400 °C) jsou vysoce hydrofobní, zatímco při vyšších teplotách pyrolýzy (>500 °C) jsou méně hydrofobní. Hydrofobní povrchy v pórech mohou zabránit proniknutí vody do porézní struktury biouhlu. Bylo prokázáno, že biouhly vyrobené při vysoké teplotě udrží více vody ve své porézní struktuře [38]. Dále také povrchová plocha biouhlu má vliv na zadržování vody [39].

Pórovitost a povrchová plocha jsou důležité fyzikální vlastnosti biouhlu, které hrají klíčovou roli při jeho aplikaci. Ovlivňují kapacitu výměny kationtů, kapacitu zadržování vody a adsorpční kapacitu. Póry lze rozdělit podle vnitřního průměru na [40]:

- mikropóry (<2 nm),
- mezopóry (2–50 nm),
- makropóry (>50 nm).

Mikropóry jsou zodpovědné za vysoké adsorpční kapacity malých molekul, jako jsou plyny a rozpouštědla. Mezopóry se podílejí na adsorpci kapalné půdní složky a makropóry jsou klíčem k fungování biouhlu v půdě, ovlivňují například provzdušňování půdy a poskytují prostředí pro mikroby. Schéma porézního biouhlu je zobrazeno na následujícím obrázku (Obrázek 3). Nejčastější techniky používané pro popis fyzikálních vlastností jsou rastrovací elektronová mikroskopie (SEM), rentgenová difrakce, rtuťová porozimetrie, plynová pyknometrie a metoda BET (Brunauer, Emmett, Teller) [41].



Obrázek 3: Schéma porézního biouhlu obsahujícího různé funkční skupiny [42].

2.2.3 Využití biouhlu

Biouhel prokazuje širokou perspektivu při podpoře udržitelnosti životního prostředí a může být použit pro různé účely [2]. Díky charakteristickým vlastnostem je slibným způsobem řešení globálních problémů jako je zmírňování změny klimatu (snižování emisí skleníkových plynů), zpracování odpadu, výroba energie a zlepšení vlastností půd (viz. Obrázek 4) [1]. Jeho možnosti aplikace jsou široké a biouhel je primárně spojen s potenciálním využitím v zemědělství. Můžeme se s ním ale také setkat ve stavebnictví, energetice, metalurgii, kosmetice, elektronice, lékařství nebo při čištění odpadních vod [43].

V poslední době byla velká pozornost věnována biouhlu kvůli jeho schopnosti účinně adsorbovat těžké kovy a další znečišťující látky ve vodě a půdě [44]. V této souvislosti je biouhel díky svým fyzikálním a chemickým vlastnostem slibným nízkonákladovým a efektivním materiálem používaným k nápravě půd a vody [45]. Vzhledem k tomu, že vlastnosti biouhlu jsou funkcí vstupních surovin a podmínek pyrolýzy, nemůže být k sorpci různých těžkých kovů a obecně použit jeden typ biouhlu. Navíc i mechanismus adsorpce bude různý pro jednotlivé kontaminanty. Adsorpční schopnost biouhlu se tedy mění v závislosti na různých typech kontaminantů [46].

Při aplikaci biouhlu do půdy dochází kromě vylepšení půdních vlastností také k ukládání uhlíku do půdy a snížení emisí skleníkových plynů (CH_4 , N_2O a CO_2), které jsou primárně zodpovědné za změnu klimatu [45]. Chemické složení biouhlu má zásadní vliv na emise skleníkových plynů (zejména N_2O) z půdy po přidání biouhlu. Obecně biouhly s nižším obsahem dusíku jsou vhodnější pro zmírnění emisí N_2O . Na rozdíl od organické hmoty, která je rozložena většinou během pěti let, se očekává, že biouhel aplikovaný do půdy zůstane stabilní po mnoho desítek let. Podle zveřejněných výzkumů může být biouhel v půdách stabilní 100–4000 let, převážně díky své kondenzované aromatické struktuře, která je odolná vůči mikrobiálnímu rozkladu. Stabilita každého biouhlu se však může lišit v závislosti na jeho vlastnostech. Dále také typ půdy a podmínky prostředí mají vliv na stabilitu biouhlu. Další způsoby, kterými může biouhel nepřímo přispět ke zmírnění změny klimatu jsou [47]:

- používání rostlinných zbytků pro výrobu biouhlu je považováno jako udržitelný způsob nakládání s těmito zbytky a pomáhá vyhnout se emisím CH_4 a CO_2 produkovaných rozkladem organické hmoty,
- protože se očekává, že biouhel zvýší úrodnost půdy, jeho použití by mohlo snížit spotřebu chemických hnojiv, čímž se také sníží emise skleníkových plynů,
- zvýšením výnosu plodin lze v rostlinách zachytit více uhlíku,
- vedlejší produkty pyrolýzy (syngas a bioolej) mohou být použity jako obnovitelné zdroje energie, které nahradí fosilní paliva.



Obrázek 4: Výhody aplikace biouhlu do půd [48].

Využití v zemědělství

V zemědělství se biouhel využívá jako prostředek pro zlepšení úrodnosti půdy a růstu rostlin, přičemž zároveň dochází k využití přebytečné biomasy na jeho výrobu. Byla provedena řada experimentů, které vykazovaly významné zlepšení vlastností půdy jako je povrchová plocha, pórovitost, schopnost zadržování vody, objemová hustota, dostupnost živin, enzymatická aktivita atd. [43]. Vysoce aromatická struktura biouhlu a specifická povrchová

plocha spolu s vysokou pórovitostí jsou hlavními důvody dlouhodobé stability a schopnosti biouhlu zvýšit dynamiku živin, čímž se zvyšuje produktivita plodin [49].

Při aplikaci do půdy může biouhel neutralizovat kyselou půdu, zvýšit kapacitu zadržování kationtů a zvýšit úrodnost půdy. Moon et al. zjistili, že po měsíci „lěčby“ biouhlem byla kyselost půdy zvýšena o 2 jednotky, byl prokázán zvýšený růst rostlin a také vyšší kapacita zadržování kationtů. Zlepšení úrodnosti půdy lze popsat následujícími změnami, které byly po přidání biouhlu pozorovány [1]:

- zvýšení kapacity zadržování vody,
- zvýšení stability půdních agregátů,
- zmírnění zhutnění půdy,
- zvýšení pórovitosti půdy.

Výše uvedené změny půdy by mohly podpořit růst kořenů a tím zvýšit růst rostlin a jejich produktivitu. Biouhel jakožto pomocná půdní látka má potenciál zlepšit vlastnosti půdy, mikrobiální činnost, biologickou fixaci dusíku a růst rostlin [1]. Nelze však obecně doporučit aplikační dávku nebo typ biouhlu, protože při interakci biouhlu s půdou hraje roli řada proměnných. Kombinace biouhlu a anorganického hnojiva může mít lepší vliv na půdu než použití samotného biouhlu [50].

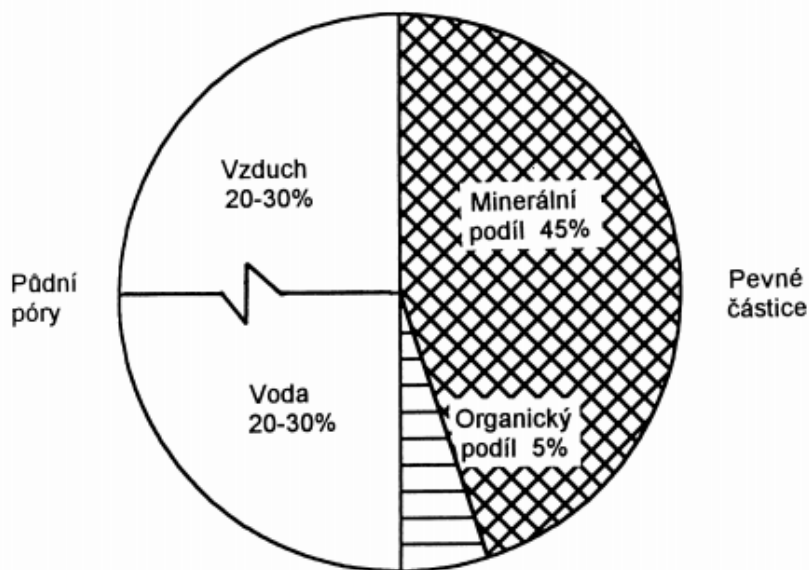
2.3 Půda

Půdu lze definovat jako nejsvrchnější část zemské kůry, která vzniká ze zvětralin nebo nezpevněných minerálních a organických sedimentů. Je prostoupena minerálními složkami, odumřelou organickou hmotou, vodou, vzduchem a živými organismy a dochází v ní k nepřetržité výměně molekul a iontů mezi pevnou, kapalnou a plynnou složkou. Vznik půd a jejich vývoj je více či méně ovlivněn půdotvornými činiteli. Tyto činitele dělíme do dvou základních skupin, a to na půdotvorné faktory a podmínky půdotvorného procesu [51].

Půdotvorné faktory mají přímý vliv na vznik půd, patří sem matečná hornina (půdotvorný substrát), klima, vliv organismů (biologický faktor), podzemní voda a antropogenní vlivy. Naopak podmínky půdotvorného procesu do pedogenetického procesu přímo nevstupují, ale ovlivňují charakter půdotvorných faktorů. Za podmínky půdotvorného procesu považujeme georeliéf a čas [53].

2.3.1 Složení půdy

Půda je složena z plynné části (půdní vzduch), kapalně části (půdní voda) a pevné části (anorganický a organický podíl), uspořádaných v půdních horizontech. Jejich procentuální zastoupení je uvedeno na následujícím obrázku (Obrázek 5). Polovinu až dvě třetiny objemu půdy tvoří pevné částice, kdy obvykle více než 90 % představuje minerální podíl, který vznikl z původní matečné horniny. Dále polovinu až jednu třetinu objemu vyplňují póry, které jsou zaplněné vodou a vzduchem. Zastoupení jednotlivých složek neživé půdy je proměnlivé, zejména obsah kapalně a plynné části [54].



Obrázek 5: Průměrné zastoupení jednotlivých složek minerální hlinité půdy ve stavu příznivém pro růst rostlin [54].

Půdní organická hmota

Půdní organická hmota je klíčovou složkou a základem každé fungující půdy. Obsah organické hmoty v půdě se pohybuje v širokém rozmezí. V chudých písčitých půdách nebo v půdách intenzivně obhospodařovaných to může být méně než 1 hm.% a naopak v rašelinných půdách až 80 hm% pevné fáze půdy. V průměru však tvoří organická část 5 % hmotnosti půdy, a i přes malé množství má zásadní vliv na fyzikální a chemické vlastnosti minerálních půd. Podporuje tvorbu a stabilitu struktury půdy a zvyšuje schopnost zadržování vody a infiltraci. Je také zásadní pro zásobování rostlin i mikroorganismů živinami jako je dusík (ve formě NH_4^+ a NO_3^-), fosfor (PO_4^{3-}), síra (SO_4^{2-}) a dalšími kationty (Ca^{2+} , Mg^{2+} a K^+) [55].

Organickou část půdy můžeme rozdělit na živou a neživou část. Živá část tvoří přibližně 15 % veškeré organické hmoty a zahrnuje půdní organismy (edafon) a kořeny rostlin. Z půdních organismů mají největší zastoupení mikroorganismy, které se podílí na většině transformačních procesů. Patří sem bakterie, houby, sinice, řasy, aktinomycety, atd. [55]. Zbylých 85 % organické hmoty tvoří neživá část, která zahrnuje primární organickou hmotu a humusové látky. Jak živá, tak neživá část půdní organické hmoty jsou velmi významné, vzájemně se podmiňující a jsou na sobě závislé [58].

Primární organickou hmotu představují zbytky rostlin, organických hnojiv a živočichů včetně mikroorganismů a makroedafonu (žížaly a jiní půdní živočichové) v různém stupni rozkladu. Je tvořena látkami jako jsou polysacharidy, jednodušší organické kyseliny a látky bílkovinné povahy. Na rozdíl od humusových látek jsou tyto látky snadno rozložitelné a jsou přesněji definovány co se týče fyzikálních a chemických vlastností. Proces přeměny těchto zbytků za účasti mikroorganismů se nazývá mineralizace. Jedná se o poměrně rychlý proces, který však závisí na kvalitě a množství výchozího materiálu v půdě a také půdních podmínkách

(provzdušnění, teplota, vlhkost, pH, obsah dusíkatých látek). Minerální látky uvolňované při rozkladu organických látek jsou využívány jako živiny pro rostliny a mikroorganismy [59].

Humusové látky jsou amorfní vysokomolekulární látky, které vznikají během procesu zvaného humifikace. Humifikací rozumíme transformaci původní organické hmoty pomocí souboru rozkladných a syntetických procesů na složitější a stabilnější látky. Takto vzniklé látky mohou dále reagovat s jílovými minerály za vzniku organominerálních komplexů. Klasifikovat humusové látky lze různým způsobem. Například podle odolnosti k rozkladu a rozpustnosti v kyselinách a alkáliích se dělí do tří skupin [54]:

- fulvokyseliny (nejnižší molekulová hmotnost, nejrozpuštěnější a nejméně odolné rozkladu),
- huminové kyseliny (vyšší molekulová hmotnost, nerozpustné v kyselinách),
- huminy (nejsložitější, nejvíce odolné rozkladu).

Přítomnost humusových látek v půdě kladně ovlivňuje půdní vlastnosti, které působí rozhodující měrou na obsah živin v půdě i na půdní úrodnost. Humusové látky jsou důležitým faktorem drobtovité půdy, která je vhodná pro rostliny a zajišťuje příznivý vodní a vzdušný režim půdy. Dále poutají živiny v půdě, kladně ovlivňují pufrací schopnost půd, zabraňují vysrážení fosforečných sloučenin z půdního roztoku, vyvazují škodlivé sloučeniny a částečně vážou některé těžké kovy v půdě. Některé humusové látky vykazují přímý stimulační vliv na rostliny [59].

Tabulka 2: Rychlost rozkladu organické hmoty – upraveno [57].

Typ organické hmoty	Doba rozkladu
Kořínky	1–3 týdny
Zelené hnojení	1–4 měsíce
Posklizňové zbytky	3–30 měsíců
Fulvokyseliny	2–40 let
Huminové kyseliny	200–4000 let

2.3.2 Vlastnosti půdy

Půda je životně důležitý přírodní zdroj, který je v lidském časovém měřítku neobnovitelný. Její kvalita je do značné míry definována její funkcí a představuje souhrn fyzikálních, chemických a biologických vlastností [52]. Fyzikální vlastnosti ovlivňující kvalitu půdy jsou textura, hloubka půdy, hydraulická vodivost, objemová hmotnost, pórovitost, struktura a kapacita zadržování vody. Chemické vlastnosti zahrnují obsah a kvalitu humusu, obsah celkového dusíku, pH, vodivost, obsah živin a kationtovou výměnnou kapacitu. Respirace a aktivita půdních enzymů patří mezi vlastnosti biologické [61].

Pórovitost neboli celkový obsah pórů v neporušené půdě je jednou z nejdůležitějších vlastností půdy. Póry tvoří 40–60 % objemu půdy a jsou vyplněny vodou nebo vzduchem. Jejich objem, tvar a velikost ovlivňuje hydrologické vlastnosti a intenzitu migrace vzduchu v půdě. Jsou důležité pro správný vývoj kořenového systému a pro půdní mikroorganismy. Mechanické

úpravy půdy pórovitost výrazně ovlivňují, například při orbě dochází ke zvětšení, a naopak při válcování ke zmenšení objemu pórů. Dalším důležitým ukazatelem stavu půdy je půdní reakce neboli kyselost půdy. Stanovení hodnoty pH patří mezi nejběžnější pedologická stanovení. Má vliv na růst rostlin, rozpustnost a dostupnost prvků, složení mikrobiálních společenstev a pohyblivost těžkých kovů. K okyselování půd dochází především kvůli nevhodné aplikaci minerálních hnojiv [52].

2.4 Obrazová analýza

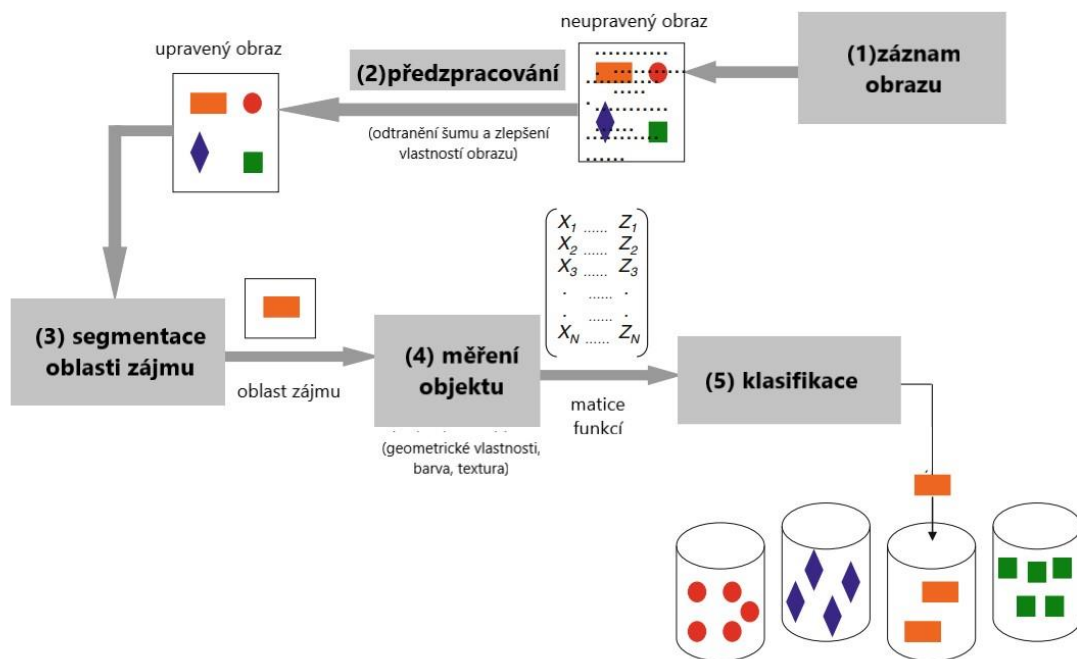
Obrazová analýza, nazývaná také jako analýza obrazu se používá jako základní nástroj pro rozpoznávání, rozlišování a kvantifikaci různých typů obrazu. Je založená na automatizovaných postupech vyhodnocování souborů snímků na základě tvarových a barevných charakteristik. Vývoj této metody probíhá od poloviny dvacátého století, dříve se práce spojené s analýzou obrazu zabývaly primárně jednoduchými operacemi. V dnešní době se však obrazová analýza stává stále důležitější a rozšířenější. Obrazová analýza se používá v mnoha vědeckých oborech a technologiích. Využívá se například k posouzení nebo kvantifikaci povrchových charakteristik (barva, velikost, tvar a textura) a vnitřní struktury (architektura a propojení materiálových složek) výrobků [62]. Abychom mohli obrazovou analýzu využít, potřebujeme vybrat vhodné zařízení pro snímání, software na tvorbu a zpracování dat včetně statistického vyhodnocení, cíl a objekty měření.

Obrazová analýza je součástí vědeckotechnické disciplíny zvané zpracování obrazu, kde hlavním cílem je zlepšit vizuální kvalitu obrazu nebo extrahovat užitečné informace a funkce. Analýza je založena na různých vlastnostech obrazu jako jsou barva, lesk, morfologie objektů a textura. Zpracování obrazu lze rozdělit do 3 skupin [63]:

- komprese obrazu,
- předzpracování obrazu,
- analýza obrazu.

Při kompresi obrazu dochází ke snížení množství dat odstraněním redundance z obrazu (tj. nadbytečná obrazová informace, která není vnímatelná lidským okem). Předzpracování obrazu spočívá ve zlepšení vizuální kvality obrazu snížením šumu, kalibrací a standardizací pixelů, vylepšením detekce hran a zvýšením spolehlivosti obrazové analýzy na základě objektivních a dobře zavedených kritérií. Obecně pojem předzpracování obrazu odkazuje na všechny manipulace s obrazem, z nichž každá vytváří nový obraz. Analýzou obrazu zase získáme číselné hodnoty nebo grafické informace o vlastnostech obrazu, které jsou vhodné pro klasifikaci, detekci defektu nebo predikci některých kvalitativních vlastností zobrazovaného objektu. Termín obrazová analýza se používá, jestliže výstupem je číslo, nikoli obraz [63].

Získání digitálního obrazu je prvním důležitým krokem obrazové analýzy. K získání digitálního signálu můžeme použít digitální fotoaparát, digitální kameru, nebo plošný a filmový scanner. Digitální obraz ovlivňuje rychlost, kvalitu a přesnost dalších kroků [64]. Následující zpracování je schematicky zobrazeno na obrázku (Obrázek 6). K obrazové analýze lze využít software ImageJ a Harfa (Harmonic and Fractal Image Analyser).



Obrázek 6: Přehled kroků při zpracování obrazu – upraveno [63].

2.4.1 Obrazová analýza kořenového systému

Kořeny rostlin jsou nezbytné pro funkci a strukturu rostlin. Absorbují vodu a anorganické živiny, zajišťují ukotvení rostlin v půdách a slouží jako místa důležitých symbióz s mikrobiotou [65]. Kvantifikace kořenového systému a jeho vývoje je důležitá pro hodnocení rostlinného fenotypu [66]. Zatímco jsou stále vyvíjeny nové zobrazovací technologie (zobrazování magnetickou rezonancí a rentgenovou výpočetní tomografií), pro extrakci informací z kořenového systému se nejvíce využívá klasického zobrazování pomocí plochých skenerů, digitálních fotoaparátů či kamer. Digitální zobrazování je cenově dostupné a má široké možnosti využití. Vzhledem k tomu, že kořeny rostlin přirozeně rostou v neprůhledném prostředí, není kvantifikace jednoduchá. Existuje několik možností analýzy kořenového systému, jednou z nich je měření promytých kořenů. Jedná se o destruktivní metodu. Dále můžeme rostliny pěstovat v umělých, opticky transparentních médiích, jako jsou kapaliny nebo gely, které umožňují přímou analýzu. A poslední možností je analýza kořenů v půdě, jedná se o náročnější metodu především kvůli nízkému kontrastu mezi kořenovým systémem a půdou. Analýzou obrazu získáme vlastnosti (deskriptory) popisující objekty. Deskriptory kořenových systémů lze rozdělit do dvou hlavních kategorií [67]:

- morfologické deskriptory,
- geometrické deskriptory.

Morfologické deskriptory poukazují na tvar kořenových segmentů tvořících kořenový systém, patří sem mimo jiné délka a průměr kořenů. Geometrické deskriptory udávají polohu kořenových segmentů v prostoru a shrnují tvar kořenového systému jako celku [67].

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Degradace půd způsobená lidskou činností je hlavním problémem celosvětového zemědělství. V důsledku dlouhodobého obhospodařování půd dochází ke zhoršování jejich vlastností a snižování produkce plodin. V této souvislosti se biouhel jeví jako slibný prostředek zlepšení úrodnosti půd a růstu rostlin. Bylo však prokázáno, že ne vždy má biouhel pozitivní účinek na půdu a rostliny. Je proto potřeba věnovat pozornost faktorům, které ovlivňují jeho aplikaci do půdy [68].

Pro založení kultivačních experimentů bylo potřeba určit aplikační dávku biouhlu. Počet studií vlivu biouhlu na vlastnosti půdy, růst rostlin a produkci plodin v posledních letech exponenciálně roste. Cazotti Tanure a kol. při studii vlivu biouhlu na zadržování půdní vody, fyzikální vlastnosti půdy a růst kukuřice použili dávkování 0, 5, 10, 20, 40 a 60 g·kg⁻¹ půdy. V půdách ošetřených biouhlem byla průměrná výška rostlin 69 cm, zatímco v půdách bez biouhlu 52 cm. Aplikace biouhlu dále zvýšila listovou plochu (v průměru o 1494 cm²), čerstvou a suchou hmotnost nadzemní části (o 105 a 16 g) a suchou hmotnost kořenového systému (o 4 g). Bylo prokázáno, že vyšší dávky biouhlu zlepšily úrodnost půdy i růst rostlin [69]. Ahmad a kol. biouhel dávkovali v množství 5, 10, 20 a 30 g·kg⁻¹. Jejich studie se zabývala změnou dostupnosti těžkých kovů v půdě a absorpčním potenciálem rostlin kukuřice po aplikaci biouhlu. Aplikační dávka 30 g·kg⁻¹ se prokázala jako nejúčinnější při zvyšování růstových parametrů rostlin (délka nadzemní a podzemní části) [70]. Syuhada a kol. provedli studii zkoumající vliv biouhlu na chemické vlastnosti a příjem živin kukuřicí v písčité půdě. Dávky biouhlu byly 5, 10 a 15 g·kg⁻¹. Pozitivní účinek byl pozorován pouze při dávkách 10 a 15 g·kg⁻¹, kdy došlo ke zvýšení výnosu sušiny a výšky kukuřice. Kombinací těchto prací jsme stanovili aplikační dávky 10 a 20 g·kg⁻¹ pro kultivaci kukuřice [71].

Růst rostlin lze definovat jako nevratné zvětšení hmotnosti nebo objemu rostlin v čase. Existuje několik parametrů, které mohou být použity k charakterizaci vývoje a růstu rostlin během nebo na konci růstového období. Mezi zřetelné a jednoduše kvantifikovatelné parametry patří výška a šířka rostliny, hmotnost rostliny (čerstvá a suchá), počet listů, plocha listů, délka a šířka listů a délka kořenů. Z těchto parametrů můžeme poté stanovit například specifickou plochu listů, poměr podzemní a nadzemní části a další odvozené znaky, které jsou součástí růstové analýzy. Mimo kvantitativní znaky hodnotíme i vizuální stav rostlin (barva listů, vadnoucí příznaky) [72, 73]. Údaje týkající se růstu jsou následně zpracovány statistickou analýzou. Kvůli časové náročnosti a možnosti lidské chyby se využití digitálních zařízení a zpracování pomocí analýzy obrazu jeví jako vhodný způsob měření kvantitativních znaků rostlin v polních podmínkách.

Výška rostlin je důležitý morfologický a vývojový fenotyp, který přímo indikuje růst rostlin a předpovídá jejich výnos. Kontinuální měření výšky rostlin v průběhu růstu může přispět k identifikaci různých fází růstu. Obecně je výška rostlin definována jako nejkratší vzdálenost mezi horní hranicí (nejvyšší bod) fotosyntetických tkání a úrovní terénu. Měření výšky probíhá buď ručně (pomocí pravítka, metru a měřicí tyče) nebo automaticky využitím digitálních zařízení. Výška rostlin se doporučuje měřit každé 2–3 dny v průběhu kultivačního experimentu.

Wang a kol. provedli automatizované měření výšky rostlin s využitím digitálních zařízení [74, 75].

Dalším kvantitativním znakem je hmotnost rostliny, kdy rozlišujeme čerstvou a suchou hmotnost. Čerstvá hmotnost je hmotnost rostliny nebo části rostliny zaznamenaná bezprostředně po vyjmutí z půdy, je to hmotnost rostlinných pletiv v intaktním stavu (s obsaženou vodou). Pro analýzu růstu je však vhodnější uvést suchou hmotnost, což je hmotnost rostliny nebo části rostliny zaznamenaná po vysušení rostliny (obvykle v sušárnách při teplotách 60–100 °C) do konstantní hmotnosti [76, 77]. Čerstvou a suchou hmotnost kořenů u více druhů rostlin vážili Bashan a kol., obdobné měření provedli také Buthan a kol. u rostlin kukuřice [78, 79]. Samotné měření suché hmotnosti probíhá tak, že se nejprve kořeny rostliny se omyjí pod tekoucí vodou, aby se zbavily zbytků půdy a následně jsou vloženy do sušárny. Jakmile máme konstantní hmotnost separujeme jednotlivé části rostliny (u kukuřice je to kořen, výhonek a klas) a na analytických vahách zvážíme jejich hmotnost [74]. Jelikož se jedná o destruktivní metodu, suchou hmotnost jednotlivých částí rostliny měříme až po ukončení kultivace.

Füzy a kol. prováděli vizuální hodnocení stavu rostlin a také měření plochy listů. U každé rostliny se zaznamenává počet listů, v případě že je některý z listů uschlý je potřeba to poznamenat. U listů můžeme dále měřit délku, šířku ale také plochu listu. Délka a šířka listu se měří podobně jako u výšky pravítkem, nebo jiným měřidlem. Plochu listu (plocha jedné strany listu) můžeme stanovit s využitím digitálních zařízení a vhodného softwaru pro analýzu obrazu. Tyto kvantitativní znaky měříme pravidelně, každé 2–3 dny, v průběhu růstu rostliny [73].

Ke stanovení délky kořenů a dalších morfologických parametrů kořenového systému lze využít obrazovou analýzu. Narisetti a kol. analyzovali kořenový systém rostlin pěstovaných v půdě a v agaru. Protože v případě kultivace v půdě se jedná o destruktivní metodu, při níž rostlina musí být vyjmuta z půdy, toto měření provádíme pouze na konci experimentu [66].

4 CÍL PRÁCE

Cílem této části bakalářské práce je definovat a optimalizovat vhodné metodiky pro posouzení vlivu biouhlu na růst zvolené modelové rostliny. Aby mohl být vliv biouhlu na růst rostlin posouzen, je nutné provést realizaci kultivačního experimentu v pěstebním boxu s řízeným osvitem a závlahou. Podstatnou částí práce je také zhodnocení naměřených dat a formulace závěrů.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 Použité chemikálie, materiály, přístroje a pomůcky

5.1.1 Chemikálie a použité materiály

- biouhel Phlanzenkohle (Sonnenerde GmbH, Rakousko),
- biouhel NovoTerra (NovoCarbo GmbH, Německo),
- modální kambizem,
- arenická černoze,
- písčité aridní půda,
- glejová černice,
- perlit (AGRO perlit).

5.1.2 Přístroje a pomůcky

- váhy, $d=0,01$ g, (MERCY, s.r.o.),
- váhy, $d=0,0001$ g, (SCALTEC SBC 31),
- Thermo – Hydro metr (VERK, Digitální teploměr HTC–2),
- pH metr a konduktometr (METTER TOLEDO, S47 SevenMulti),
- kultivační box (Probox BASIC 80, $80 \times 80 \times 160$ cm),
- manuální spínací hodiny (Elektrobock ZS10)
- osvitové lampy (Viparspectra V900 Reflector, Viparspectra V300 Reflector),
- impulsní svářečka (C & C Líně spol. s.r.o.),
- polypropylenová textilie (zakoupeno: Kars Brno),
- květináče (Toku květináč 700 a 1500 ml, zakoupeno: Speciální zahradnictví–Radek Tichý),
- černý lesklý papír,
- skener (Epson Perfection V19),
- běžné laboratorní sklo a pomůcky.

5.2 Charakteristika použitých půd

Pro tento experiment byly použity čtyři druhy půd, lišící se zejména v obsahu organické hmoty. Tyto půdy představují běžné půdní typy vyskytující se na území České republiky. Prvním typem je modální kambizem z Náměště nad Oslavou (49.213263°N , 16.162481°E). Druhá půda je arenická černoze z oblasti Žabčice u Brna (49.006433°N , 16.591367°E) a třetí je písčité aridní půda, odebraná v lokalitě Hodonín–Pánov (48.878150°N , 17.132275°E). Vzorke těchto půd byly odebrány 28. 5. 2020. Poslední půdou je glejová černice (dále označovaná jako fluvizem), odebraná 5. 10. 2019 v oblasti Iváň (49.921686°N , 16.561494°E).

5.3 Kultivační experimenty

5.3.1 Dlouhodobé kultivace

S využitím impulsní svářečky a polypropylenové textilie byly vyrobeny pytlíky, do kterých se navázilo potřebné množství biouhlu (5 g). Celkem bylo vyrobeno a naplněno 96 pytlíků, označených 1–96, které obsahovaly dva typy biouhlu (1–48 biouhel Phlanzenkohle a 49–96 biouhel NovoTerra).

Do každého z 48 květináčů se navázilo 1000 g půdy a přidalo doporučené množství perlitu (250 ml). Perlit se s půdou důkladně promísil. Do takto připravených květináčů se vložily pytlíky s biouhlem, kde aplikační dávky byly 0;10 a 20 g biouhlu na kilogram půdy, tzn. (0; 2 a 4 pytlíky). Všechny květináče byly opatřeny štítkem s označením (1–48) a typem a navázkou biouhlu a půdy. Sumarizace jednotlivých připravených vzorků a jejich rozdělení dle typu půdy a použitým typem a dávkou biouhlu je znázorněna v tabulkách (Tabulka 3–6).

Jako modelová rostlina byla použita kukuřice setá (*Zea mays*). Z klasu kukuřice se vyloupala jednotlivá semínka, která byla poté zabalena do papírového ubrousku a vložena do kádinky s vodou. Klíčení probíhalo 5 dní.



Obrázek 7: Naklíčená kukuřice

Naklíčené kukuřice (Obrázek 7) byly 19. 9. 2020 zasazeny do připravených květináčů (přibližně 3 cm hluboko do půdy) a umístěny do pěstební boxu vybaveného osvitovými lampami. Lamy se každý den zapnuly v 6:15 a vypnuly v 18:30, tyto hodnoty představují průměrnou dobu východu a západu slunce v České republice. Zavlažování probíhalo třikrát týdně odstátou kohoutkovou vodou. Při každém zavlažování byla změřena hodnota konduktivity a pH vody, zaznamenána byla také teplota a relativní vlhkost vzduchu v pěstebním boxu. Rovněž byla vždy změřena výška rostliny a zaznamenán počet listů.

Tabulka 3: Navážky fluvizemě a dávky a typ biouhlu využité pro dlouhodobý kultivační experiment.

označení	rostlina	typ biouhlu	m_{biouhel} [g]	$m_{\text{b+pytlík}}$ [g]	$m_{\text{půda}}$ [g]
1	NE	-	-	-	1001
2	ANO	-	-	-	1001
3	ANO	Novoterra	20,13	23,74	1001
4	ANO	Novoterra	20,08	22,6	1001
5	ANO	Novoterra	10,07	11,38	1001
6	ANO	Novoterra	10,07	11,24	1003
31	NE	-	-	-	1000
32	ANO	-	-	-	1001
33	ANO	Phlanzenkohle	10,05	11,18	1001
34	ANO	Phlanzenkohle	10,04	10,89	1000
37	ANO	Phlanzenkohle	20,13	22,07	1000
38	ANO	Phlanzenkohle	20,13	22,19	1001

Tabulka 4: Navážky písčité půdy a dávky a typ biouhlu využité pro dlouhodobý kultivační experiment.

označení	rostlina	typ biouhlu	m_{biouhel} [g]	$m_{\text{b+pytlík}}$ [g]	$m_{\text{půda}}$ [g]
7	NE	-	-	-	1003
8	ANO	-	-	-	1002
9	ANO	Phlanzenkohle	20,08	22,58	1001
10	ANO	Phlanzenkohle	20,13	22,05	1000
11	ANO	Phlanzenkohle	10,05	11,14	1001
12	ANO	Phlanzenkohle	10,01	11,27	1001
13	NE	-	-	-	1001
14	ANO	-	-	-	1001
15	ANO	Novoterra	20,17	22,9	1001
16	ANO	Novoterra	20,11	22,77	1000
17	ANO	Novoterra	10,07	11,34	1000
18	ANO	Novoterra	10,02	11,41	1000

Tabulka 5: Navážky kambizemě a dávky a typ biouhlu využité pro dlouhodobý kultivační experiment.

označení	rostlina	typ biouhlu	m_{biouhel} [g]	$m_{\text{b+pytlík}}$ [g]	$m_{\text{půda}}$ [g]
19	ANO	Novoterra	20,17	22,59	1000
20	ANO	Novoterra	19,98	22,52	1001
21	ANO	Novoterra	10,1	11,48	1001
22	ANO	Novoterra	10,05	11,47	1001
23	ANO	-	-	-	1001
24	ANO	-	-	-	1001
25	NE	-	-	-	1001
26	ANO	-	-	-	1001
27	ANO	Phlanzenkohle	20,05	22,49	1001
28	ANO	Phlanzenkohle	20,04	22,05	1000
29	ANO	Phlanzenkohle	10,07	11,31	1001
30	ANO	Phlanzenkohle	10,05	11,22	1001

Tabulka 6: Navážky černozemě a dávky a typ biouhlu využité pro dlouhodobý kultivační experiment.

označení	rostlina	typ biouhlu	m_{biouhel} [g]	$m_{\text{b+pytlík}}$ [g]	$m_{\text{půda}}$ [g]
35	ANO	Novoterra	10,03	11,48	1000
36	ANO	Novoterra	10,02	11,34	1000
39	NE	-	-	-	1000
40	ANO	-	-	-	1000
41	ANO	Novoterra	20,14	22,81	1000
42	ANO	Novoterra	20,22	23,17	1001
43	ANO	Phlanzenkohle	10,09	10,92	1000
44	ANO	Phlanzenkohle	10,09	11,16	1000
45	ANO	-	-	-	1001
46	NE	-	-	-	1001
47	ANO	Phlanzenkohle	20,15	22,32	1000
48	ANO	Phlanzenkohle	20,15	22,52	1001

Kultivace byla ukončena 30. 11. 2020 (kultivační experiment trval celkem 72 dní). Dále již rostliny nebyly zalévány. Po týdnu od ukončení kultivace byly rostliny vyjmuty z půdy a sušeny na vzduchu až do konstantní hmotnosti. Sušení probíhalo dva týdny. Pro vyhodnocení vlivu biouhlu na růst rostlin bylo potřeba zvážit suchou hmotnost jednotlivých částí kukuřice. Rostliny byly tedy separovány na nadzemní a podzemní část, kdy z nadzemní části byly odseparovány ještě klasy. Jednotlivé části byly následně zváženy na analytických vahách. Vážila se vždy podzemní část (kořen), nadzemní část i s klasem a poté samostatně pouze klas. Všechny údaje byly zapsány do tabulky.

5.3.2 Kultivace pro obrazovou analýzu

Na krátkodobou kultivaci pro obrazovou analýzu bylo do větší plastové nádoby naváženo 500 g půdy a potřebné množství biouhlu (0, 5 a 10 g biouhlu na 500 g půdy). Dále se přidal perlit (125 ml), vše se důkladně promíchalo a převedlo do připravených a označených květináčů. Klíčení kukuřice probíhalo stejně jako u dlouhodobého experimentu. Po vyklíčení se kukuřice 7. 5. 2021 zasadily do připravených květináčů a umístily do pěstebního boxu. Nastavení kultivačního experimentu (doba osvětlení, zavlažování) bylo totožné jako u předchozí kultivace.

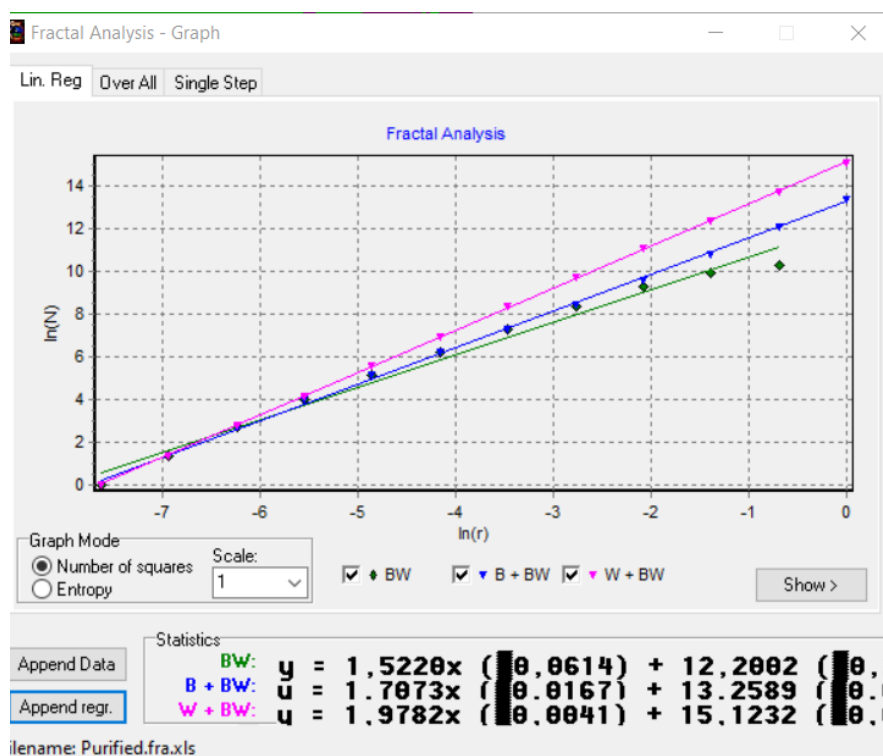
Kultivační experiment byl ukončen 21. 5. 2021 (kultivace trvala celkem 14 dní). Po ukončení experimentu se kořeny z půdy vymývaly pod tekoucí vodou, aby struktura jemných kořínků zůstala neporušená. Poté se rostliny sušily na vzduchu dva týdny.

Po usušení byly rostliny separovány na podzemní a nadzemní část. U podzemní části bylo nutno separovat také semínko kukuřice. Kořeny byly oskenovány na lesklém černém papíře a převedeny do digitální podoby pro další zpracování (obrazová analýza, viz. kapitola 5.4). Nakonec byly zváženy suché hmotnosti kořenů.

5.4 Obrazová analýza

Pro zpracování obrazu pomocí obrazové analýzy bylo nutné nejdříve kořeny rostlin převést do digitální podoby. K získání digitálního obrazu byl použit skener, do kterého byl vložen černý, lesklý papír, jež sloužil jako pozadí kořenů. Kořeny se rovnoměrně rozprostřely na papír a pomocí štětečku byly odstraněny viditelné nečistoty. Následně proběhlo skenování, kdy jsme získali obraz, se kterým se dále pracovalo. Všechny obrazy byly zpracovány nejdříve v programu ImageJ a následně v programu Harfa.

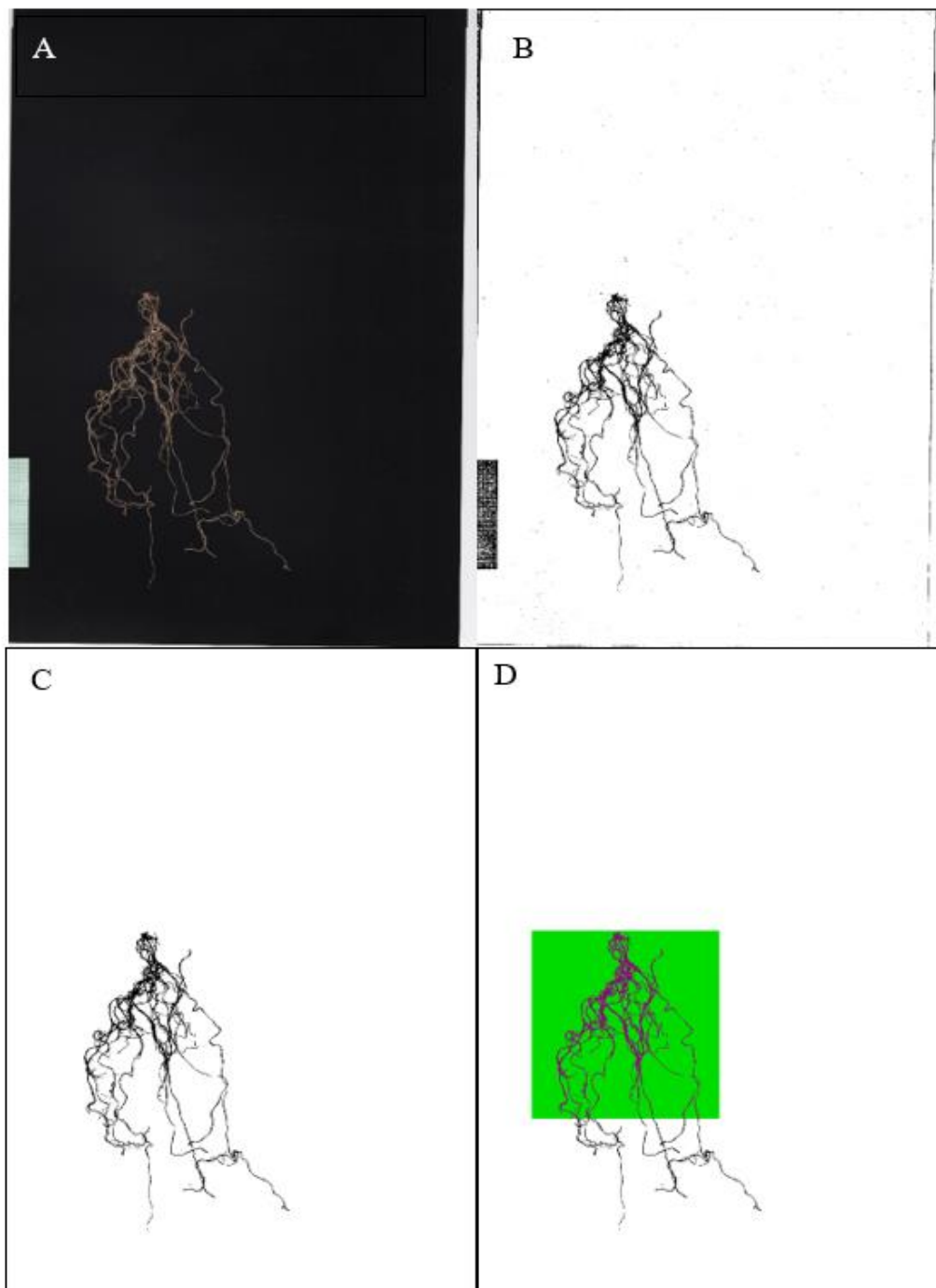
Původní obrázek, který byl vložen do programu ImageJ byl nejdříve pomocí funkce Invert převeden na 8-bitový obraz ve stupních šedi (Obrázek 9–B). Dále s využitím funkce Treshold dochází k prahování (Obrázek 9–C). Prahování je založeno na rozdílné úrovni intenzity objektu a pozadí. Nakonec byl obraz s využitím pluginu BoneJ vyčištěn od drobných úlomků a nečistot. Takto předzpracovaný obraz byl převeden do programu Harfa, kde bylo využito vlnkové (waveletové) analýzy 2D. K analýze byla vybrána plocha o velikosti 2048 x 2048 pixelů (Obrázek 9–D). V programu Harfa jsme získali fraktální parametry obrazu a získaná grafická data byla uložena do textového souboru, čímž byly pixely převedeny na souřadnice, následně byla data exportována do MS Excel.



Obrázek 8: Vzorový výstup z fraktální analýzy pomocí softwaru Harfa.

Ukázka vzorového výstupu z fraktální analýzy pomocí softwaru Harfa (Obrázek 8). Pro získání hodnot fraktální dimenze D a fraktální míry K se využívá metoda box counting. Tímto způsobem jsou analyzovány černobílé obrázky, na které se pokládá čtvercová síť, z níž zjistíme počet černých, bílých a hraničních čtverců. Tento postup pokládání sítě se opakuje pro různé velikosti čtverců. Vynesením závislosti logaritmu počtu čtverců $\ln(N)$ na reciproké hodnotě logaritmu velikosti sítě získáme přímkovou závislost, kde hodnota fraktální dimenze je rovna

směrnici regresní přímky a fraktální míra je rovna úseku na ose y [80]. Výsledkem jsou hodnoty zobrazené v tabulce (BW, B+BW, W+BW). V našem případě analýzy kořenů B+BW značí černou plochu – celková plocha kořenů, W+BW značí bílou plochu – pozadí a BW je hraniční plocha mezi pozadím a kořeny, tedy povrch kořenů.



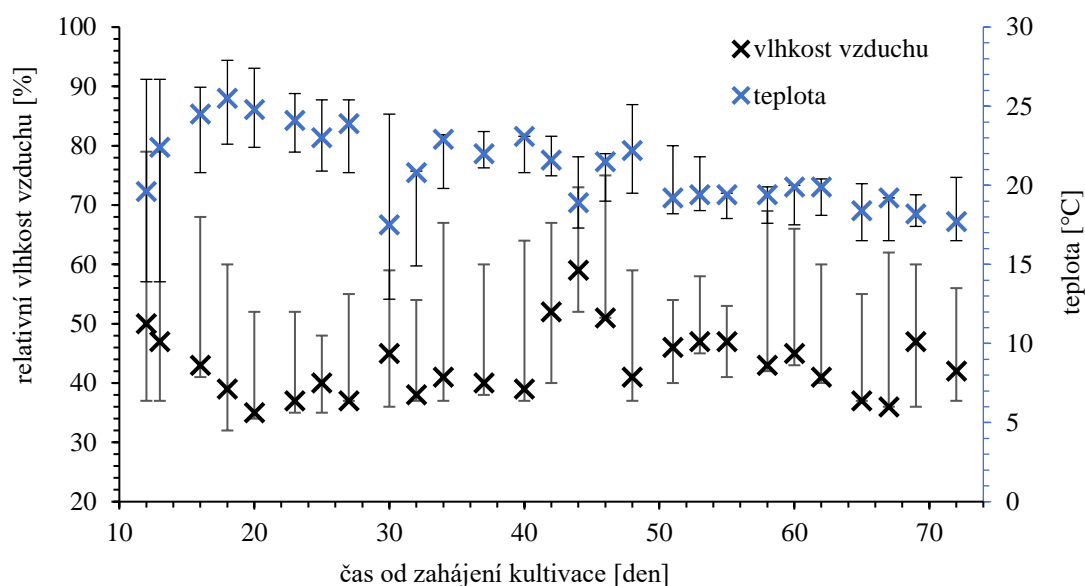
Obrázek 9: Základní kroky zpracování a analýza obrazu kořene pomocí programů ImageJ a Harfa: A–původní obraz, B–obraz po prahování, C–obraz po vyčištění, D–vybraná oblast pro analýzu v programu Harfa.

6 VÝSLEDKY A DISKUZE

Cílem této bakalářské práce bylo posoudit vliv biouhlu na růst kukuřice seté (*Zea mays*). Nastavení kultivačních experimentů je blíže popsáno v kapitole 5.3 a podmínky při kultivaci v pěstebním boxu jsou shrnuty v kapitole 6.1. Experimentální část práce se zaměřuje na posouzení vlivu biouhlu na růst modelové rostliny při různých aplikačních dávkách biouhlů (dva typy biouhlu) ve čtyřech vybraných půdách.

6.1 Podmínky kultivačních experimentů

V průběhu dlouhodobé kultivace byla třikrát týdně pomocí Thermo–Hydro metru měřena teplota a relativní vlhkost vzduchu v pěstebním boxu. Závislost relativní vlhkosti vzduchu a teploty na čase (počtu dní od zahájení kultivace) je zobrazena v grafu (Obrázek 10). Dále bylo měřeno také pH a konduktivita odstáté kohoutkové vody, která se využívala k zavlažování. Z naměřených hodnot byly vypočteny průměrné hodnoty charakteristik odstáté kohoutkové vody. Průměrná hodnota pH vody je $7,7 \pm 0,3$ a průměrná hodnota konduktivity byla vypočtena na $650 \pm 45 \mu\text{S/cm}$. Jednotlivá naměřená data jsou uvedena v tabulce (Tabulka 10) v příloze bakalářské práce.



Obrázek 10: Závislost teploty a relativní vlhkosti vzduchu na čase.

6.2 Vliv biouhlu na růst kukuřice seté (*Zea mays*)

Tato část práce se zabývá posouzením vlivu biouhlu Phlanzenkohle a biouhlu Novoterra (v obou případech byly použity dvě rozdílné dávky biouhlu 10 a 20 g na 1 kg půdy a blank bez biouhlu) na růst kukuřice pěstované ve čtyřech odlišných půdách, které představují běžné typy půd vyskytující se v České republice [81]. Vzorky biouhlů použité v rámci experimentu mají evropský certifikát od EBC (European Biochar Certificate) pro využití v zemědělství [82]. V rámci této části práce jsou rozebrány kvantitativní charakteristiky rostlin pěstovaných při dlouhodobém kultivačním experimentu (kapitola 6.2.1), což na základě literární rešerše byly jednak parametry sledované v průběhu růstu rostlin (výška, počet listů, vzhled) a dále rovněž po ukončení kultivačního experimentu (hmotnost rostlin, přítomnost a hmotnost klasu).

V druhé části práce byly realizovány krátkodobé experimenty, kde bylo cílem metodami obrazové analýzy porovnat rozdíly v základních charakteristikách kořenového systému v závislosti na použité půdě a dávce biouhlu (kapitola 6.2.2). Na následujících obrázcích (Obrázek 11–13) jsou zobrazeny rostliny kukuřice v různých stádiích dlouhodobé kultivace (23, 44 a 72 dnů od začátku kultivačního experimentu).



Obrázek 11: Rostliny kukuřice v pěstebním boxu–23 dnů od začátku kultivace.



Obrázek 12: Rostliny kukuřice v pěstebním boxu–44 dnů od začátku kultivace.

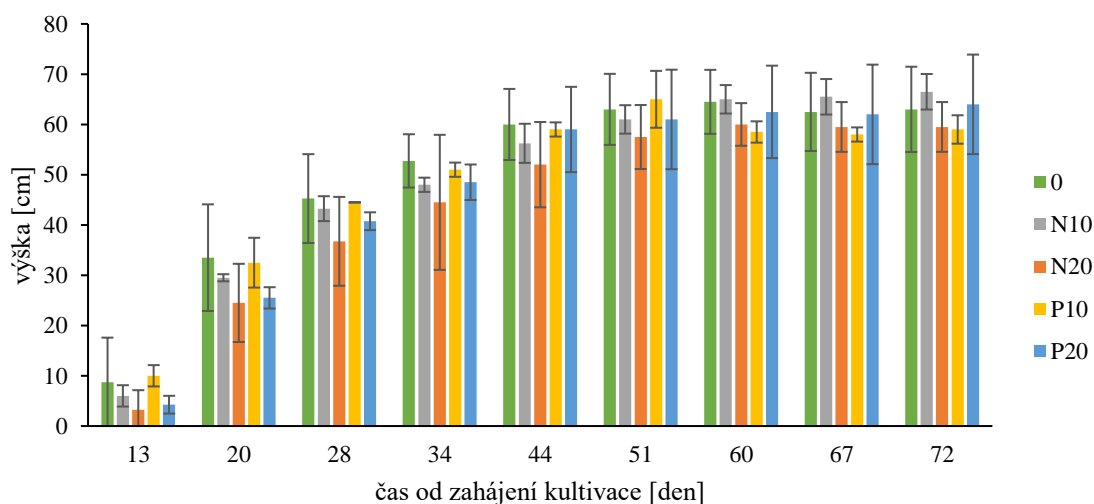


Obrázek 13: Rostliny kukuřice v pěstebním boxu–ukončení kultivace po 72 dnech.

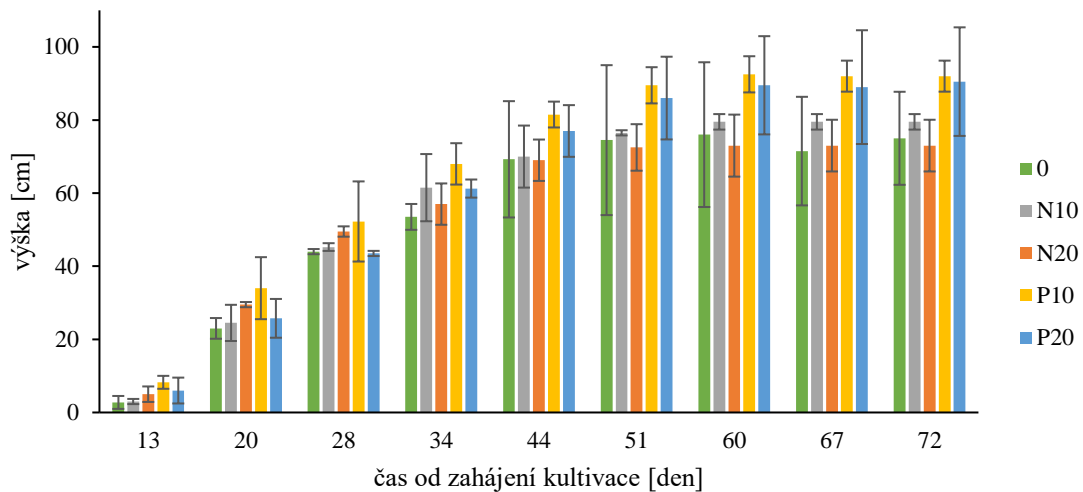
6.2.1 Kvantitativní charakteristiky

Cílem bylo posoudit vliv biouhlu (2 typy biouhlu) na kvantitativní vlastnosti kukuřice seté ve čtyřech vybraných půdách (modální kambizem, arenická černozem, fluvizem a písčité aridní půda). Zkoumanými parametry dlouhodobého kultivačního experimentu tedy byly výška rostliny, počet listů, vzhled a suchá hmotnost jednotlivých rostlin.

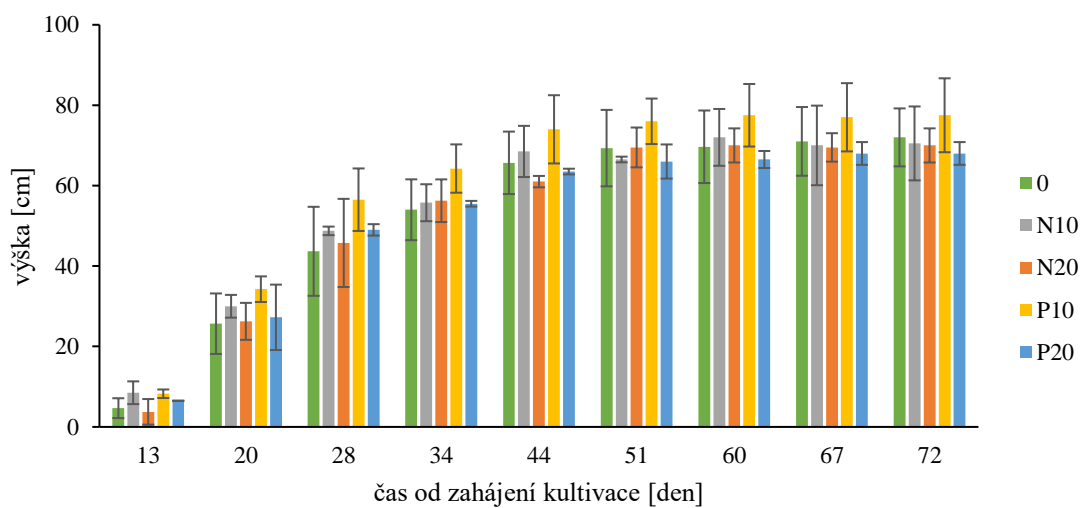
Na následujících grafech (Obrázek 14–17) lze sledovat růst rostlin kukuřice v čase. Jednotlivé obrázky jsou rozděleny podle druhu půdy, ve které jsou rostliny pěstovány. N10 a N20 (P10 a P20) značí dávku biouhlu NovoTerra (Phlanzenkohle). Označení 0 znamená, že do půdy nebyl přidán žádný biouhel.



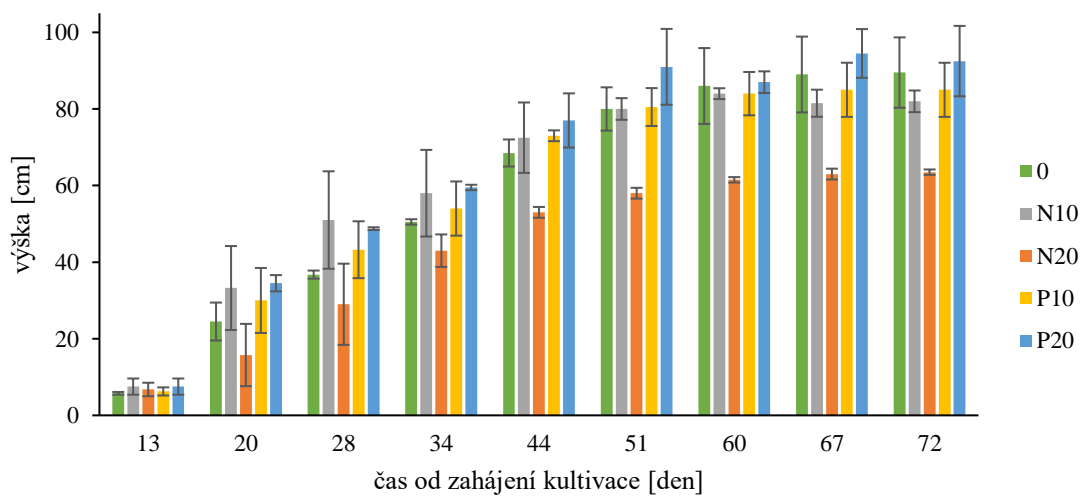
Obrázek 14: Grafická závislost výšky rostlin v čase – fluvizem.



Obrázek 15: Grafická závislost výšky rostlin v čase – písčitá půda.



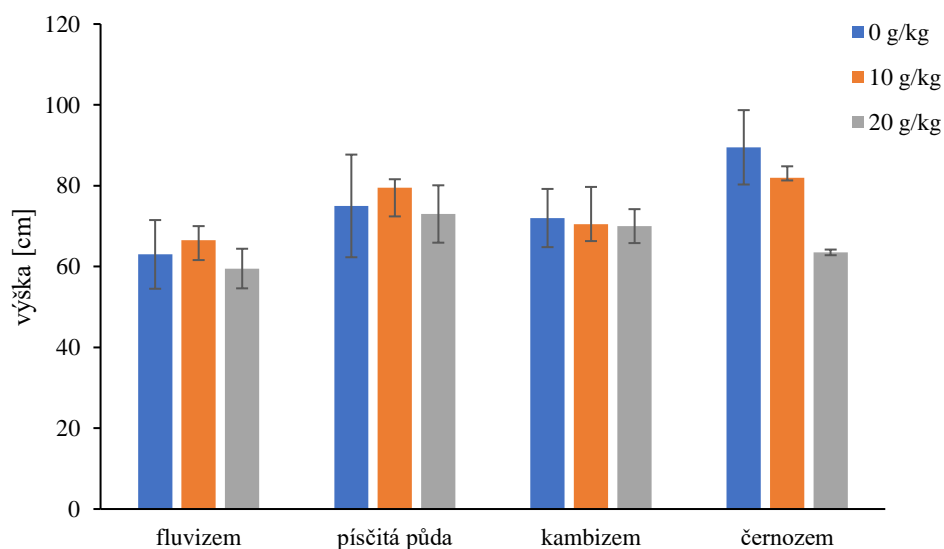
Obrázek 16: Grafická závislost výšky rostlin v čase – kambizem.



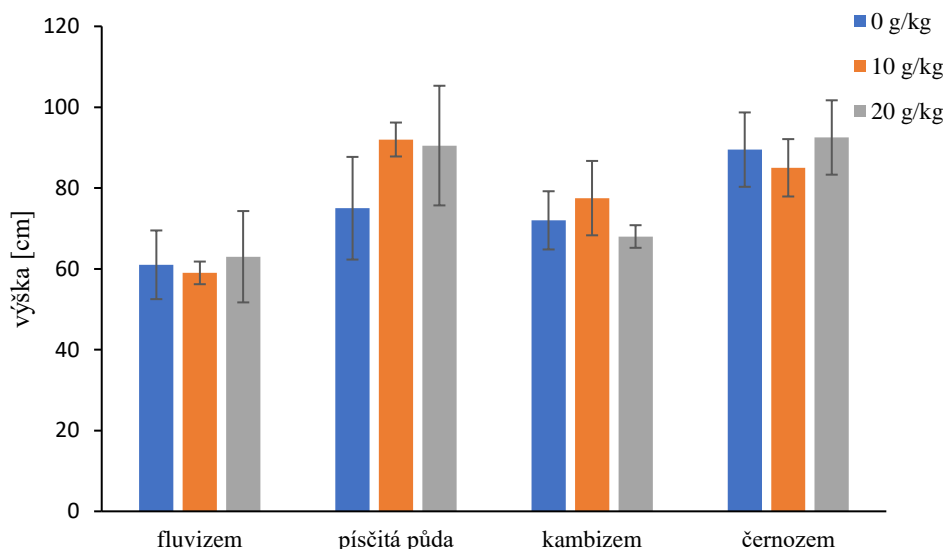
Obrázek 17: Grafická závislost výšky rostlin v čase – černozem.

Při běžném pěstování kukuřice na polích dochází ke vzejití rostlin při optimálních podmínkách (teplota a vlhkost půdy) 5–7 dní po zasazení semínek do půdy (asi 1–2 palce hluboko). Chlad, sucho nebo hluboká sadba mohou vzejití rostlin oddálit až o několik dní. Po vzejití rostlin vstupují rostliny do vegetativní fáze růstu. V této fázi dochází nejdříve k vývoji mladé rostliny, následuje prodlužovací růst a nakonec metání, kterým vegetativní fáze končí a začíná fáze reprodukční. Na konci vegetativní fáze dosahuje rostlina téměř maximální výšky (přibližně 53. dní od výsadby) [83].

Z naměřených výšek jednotlivých rostlin (Obrázek 14–17) vyplývá, že nejvýraznější růst byl u rostlin pozorován v prvních týdnech (2–3 týden od začátku kultivačního experimentu), kdy během jednoho týdne rostliny vyrostly až o 32 cm – konkrétně se jedná o rostlinu zasazenou v černozemi s aplikační dávkou 10 g biouhlu na 1 kg půdy. V průběhu kultivace lze také sledovat, že nejvyšších výšek téměř ve všech půdách dosahují rostliny s přidavkem 10 a 20 g biouhlu Phlanzenkohle na 1 kg půdy (P10 a P20). U všech druhů půd dochází k výraznému zpomalení růstu od 51 dne kultivačního experimentu, což je v souladu s výše popsaným vegetačním cyklem kukuřice [83]. V čase ukončení kultivačního experimentu dosahovaly nejvyššího vzrůstu rostliny v půdách ošetřených biouhlem Phlanzenkohle. V případě fluvizemě, černozemě a písčité půdy to bylo s dávkou biouhlu 20 g/kg (P20) a u kambizemě s přidavkem 10 g/kg.



Obrázek 18: Porovnání výšky rostlin v závislosti na druhu půdy a dávce biouhlu NovoTerra v čase ukončení kultivačního experimentu.



Obrázek 19: Porovnání výšky rostlin v závislosti na druhu půdy a dávce biouhlu Phlanzenkohle v čase ukončení kultivačního experimentu.

V grafu (Obrázek 18) jsou znázorněny výšky rostlin v půdách s přidavkem biouhlu NovoTerra. Pozitivní vliv biouhlu na růst rostlin (jejich výšku) lze sledovat pouze v případě fluvizemi a písčité půdy, kdy byla aplikační dávka 10 g/kg biouhlu NovoTerra. Další graf (Obrázek 19) srovnává výšky rostlin v půdách s biouhlem Phlanzenkohle. Vidíme, že všechny rostliny, které s biouhlem Phlanzenkohle interagují svou výškou předčily rostliny bez kontaktu s biouhlem. Nejvýraznější rozdíl je pozorován u písčité půdy, kde přidavek biouhlu nejvíce ovlivnil výšku rostlin.

Při porovnání dvojice biouhlů můžeme konstatovat, že rostliny pěstované v půdách s přidavkem biouhlu Phlanzenkohle dosahují vyššího vzrůstu než rostliny v půdách s přidavkem biouhlu NovoTerra. Tento trend můžeme sledovat u všech půd s aplikační dávkou 10 i 20 g/kg pouze s výjimkou rostlin pěstovaných ve fluvizemi s přidavkem 10 g/kg biouhlu. Například v černozemi s přidavkem 20 g/kg činí rozdíl výšek dvou typů biouhlů až 29 cm.

Tabulka 7: Průměrné suché hmotnosti jednotlivých částí kukuřice po ukončení kultivačních experimentů v půdách s přidavkem biouhlu NovoTerra.

	dávka [g/kg]	fluvizem	písčítá půda	kambizem	černozem
$m_{\text{podzemní}} \text{ [g]}$	0	0,84±0,62	3,44±0,70	0,88±0,28	1,33±0,07
	10	1,23±0,00	2,51±0,33	1,11±0,14	1,28±0,77
	20	0,73±0,01	3,42±1,07	1,62±0,00	0,55±0,08
$m_{\text{nadzemní}} \text{ [g]}$	0	4,23±2,98	7,18±0,95	4,77±1,53	6,97±0,02
	10	4,99±1,82	6,70±1,30	6,44±0,50	7,08±1,44
	20	3,63±0,96	8,60±1,68	6,80±1,40	2,71±0,77
$m_{\text{klas}} \text{ [g]}$	0	0,088±0,066	0,136±0,004	0,058±0,036	0,135±0,106
	10	0,063±0,013	0,084±0,020	0,225±0,024	0,170±0,045
	20	0,042±0,059	0,201±0,011	0,204±0,167	0,015±0,021

Tabulka 8: Průměrné suché hmotnosti jednotlivých částí kukuřice po ukončení kultivačních experimentů v půdách s přidavkem biouhlu Phlanzenkohle.

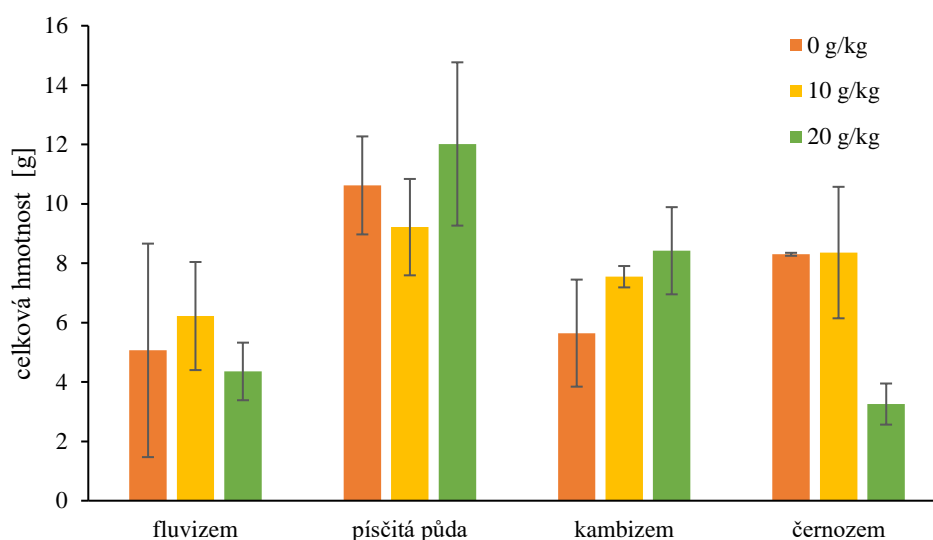
	dávka [g/kg]	fluvizem	písčité půda	kambizem	černozem
$m_{\text{podzemní}} \text{ [g]}$	0	0,84±0,62	3,44±0,70	0,88±0,28	1,33±0,07
	10	0,84±0,10	2,41±0,74	1,46±0,44	1,46±0,30
	20	0,69±0,01	2,58±0,20	1,07±0,07	1,16±0,22
$m_{\text{nadzemní}} \text{ [g]}$	0	4,23±2,98	7,18±0,95	4,77±1,53	6,97±0,02
	10	4,13±0,64	7,75±3,15	4,77±1,53	7,80±1,08
	20	3,57±0,40	9,30±1,32	7,20±1,45	5,96±0,39
$m_{\text{klas}} \text{ [g]}$	0	0,088±0,066	0,136±0,004	0,058±0,036	0,135±0,106
	10	0,085±0,029	0,062±0,066	0,233±0,078	0,245±0,128
	20	0,060±0,023	0,231±0,111	0,237±0,047	1,160±0,222

V tabulkách (Tabulka 7 a 8) jsou zaznamenány průměrné suché hmotnosti jednotlivých částí rostliny (podzemní část, nadzemní část a klas). Je vidět, že rostliny s nižší dávkou biouhlu (10 g/kg) mají často bohatší (těžší) kořeny, ve většině případů potom u rostlin s dávkou 20 g/kg biouhlu dochází k poklesu hmotnosti podzemní části. Co se týče hmotnosti nadzemní části lze pozorovat, že v písčité půdě a kambizemi je s vyšší dávkou biouhlu vyšší hmotnost nadzemní části rostlin. U fluvizemě a černozemě je tomu naopak a rostliny s nižší dávkou biouhlu dosahují vyšší hmotnosti nadzemní části. Tento trend můžeme sledovat jak u biouhlu Novoterra, tak u biouhlu Phlazenkohle.

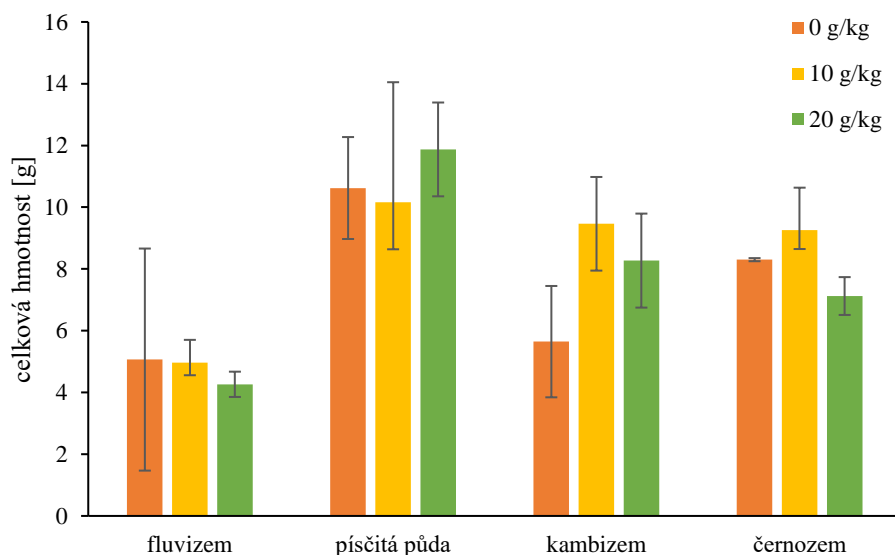
Hmotnost klasu je v tabulce zapsána samostatně a je zároveň také součástí nadzemní hmotnosti rostliny. S výjimkou dvou rostlin pěstovaných ve fluvizemi a černozemi měly rostliny klasy. Na osmi rostlinách byly nalezeny dokonce 2 klasy, tyto rostliny se vyskytovaly pouze v písčité půdě a kambizemi a všechny interagovaly s biouhlem.



Obrázek 20: Ukázka klasu kukuřice po usušení na vzduchu.



Obrázek 21: Porovnání celkových hmotností rostlin v závislosti na druhu půdy a aplikační dávce biouhlu NovoTerra po ukončení kultivačního experimentu.



Obrázek 22: Porovnání celkových hmotností rostlin v závislosti na druhu půdy a aplikační dávce biouhlu Phlanzenkohle po ukončení kultivačního experimentu.

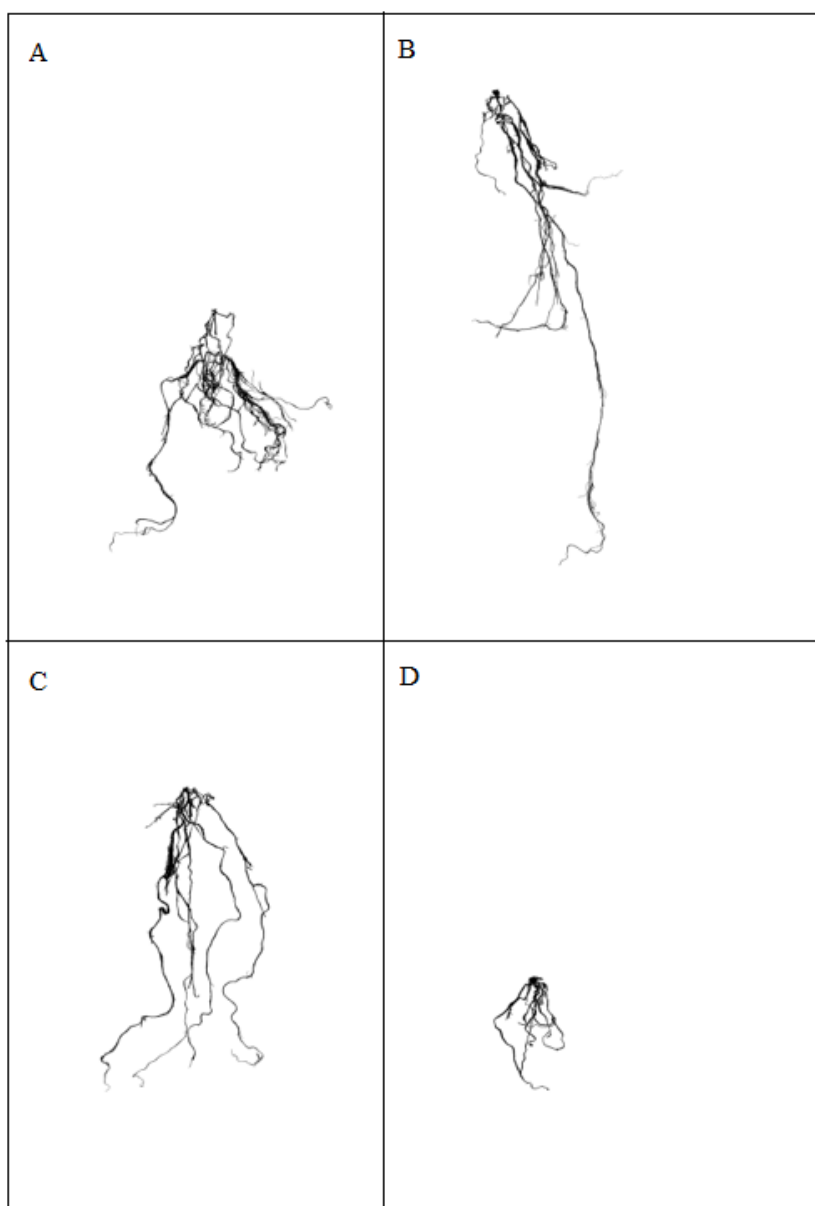
Obrázek 21 obsahuje srovnání celkových hmotností rostlin v půdách s různými dávkami biouhlu NovoTerra. V případě písčité půdy a kambizemě mají rostliny největší hmotnost s přidavkem biouhlu 20 g/kg. Naopak je tomu u fluvizemě a černozemě, kde rostliny s dávkou 20 g/kg mají nejmenší hmotnost. Při porovnání všech půd největší celková hmotnost je $(12,02 \pm 2,7)$ g dosahují jí rostliny v písčité půdě s největší dávkou biouhlu. Nejmenší hmotnost $(3,26 \pm 0,69)$ g mají pak rostliny pěstované v černozemi s přidavkem biouhlu rovněž 20 g/kg.

U biouhlu Phlanzenkohle (Obrázek 22) dosahují největší hmotnosti rostliny v písčité půdě stejně jako u předchozího případu s biouhlem NovoTerra. V kambizemi a černozemi má na celkovou hmotnost rostlin nejlepší vliv dávka biouhlu 10 g/kg. U fluvizemě je hmotnost rostlin

bez biouhlu velmi podobná jako s přidavkem 10 g/kg a nejmenší hmotnost pak mají rostliny s největší dávkou biouhlu.

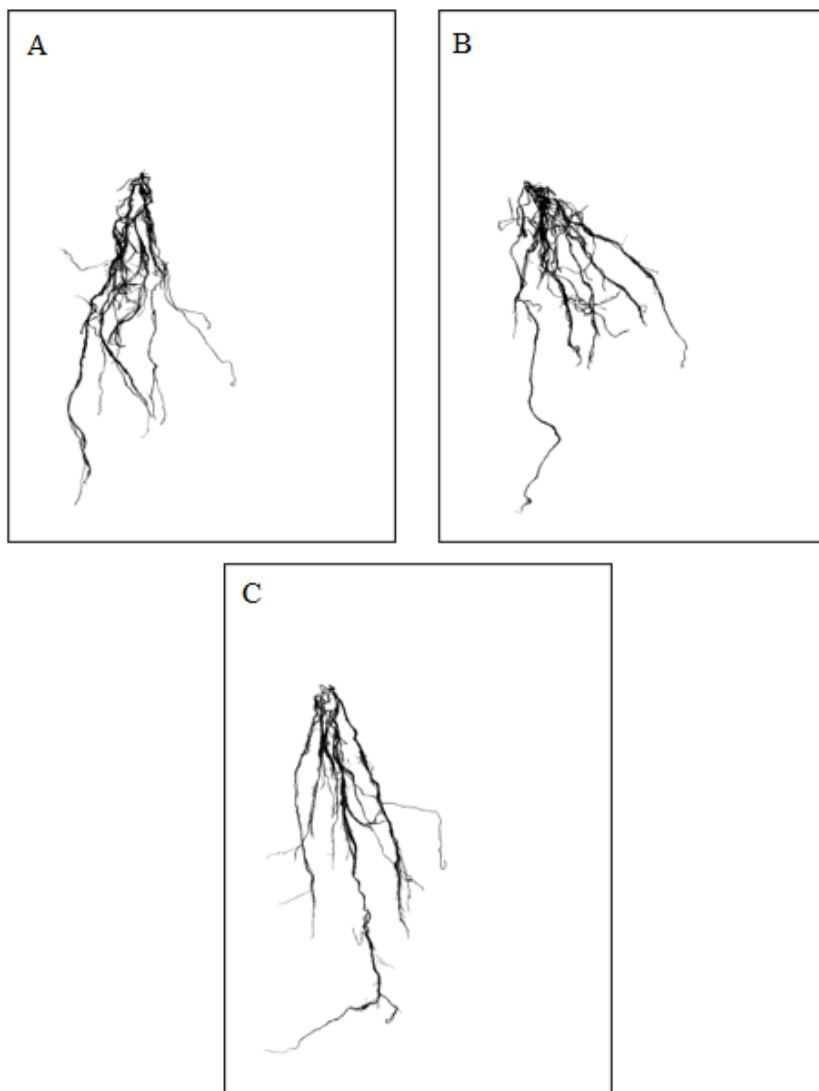
6.2.2 Obrazová analýza kořenového systému

Tato kapitola se zabývá vyhodnocením krátkodobého kultivačního experimentu, jehož cílem bylo kvantifikovat růst kořenů metodami grafického zpracování tak, aby výstupem bylo číslo. Jednotlivé kořeny rostlin byly převedeny do digitální podoby a zpracovány pomocí programů ImageJ a Harfa (popis digitalizace a zpracování je uveden v kapitole 5.4). Příklad získaných digitalizovaných obrázků kořenů zpracovaných pro obrazovou analýzu je znázorněn na následujícím obrázku (Obrázek 23). V této kapitole jsou srovnávány jednotlivé kořenové systémy rostlin v závislosti na typu půdy (rozdílný obsah organické hmoty) a dávce a typu biouhlu.



Obrázek 23: Zpracované obrázky kořenů s dávkou 20 g/kg biouhlu NovoTerra: A – fluvizemě, B – písčité půdy, C – kambizemě, D – černozemě.

Obrázky kořenů, zpracované pomocí ImageJ zobrazuje Obrázek 23. Ve všech půdách byl přidán biouhel NovoTerra v dávce 20 g/kg. Nejdelší kořeny má rostlina v písčité půdě. Z důvodu nízkého obsahu organické hmoty kořeny v této půdě hledají živiny a vodu, a proto jsou velmi dlouhé. U půd s vyšším obsahem organické hmoty lze pozorovat bohatší větvení kořenů, tyto kořeny však nedosahují takových délek jako v případě písčité půdy. U černozemě jsou kořeny sice dobře větvené, ale jsou velmi krátké.



Obrázek 24: Srovnání kořenů pěstovaných v písčité půdě s různými dávkami biouhlu Phlazenkohle:

A – bez biouhlu, B – dávka 10 g/kg, C – dávka 20 g/kg.

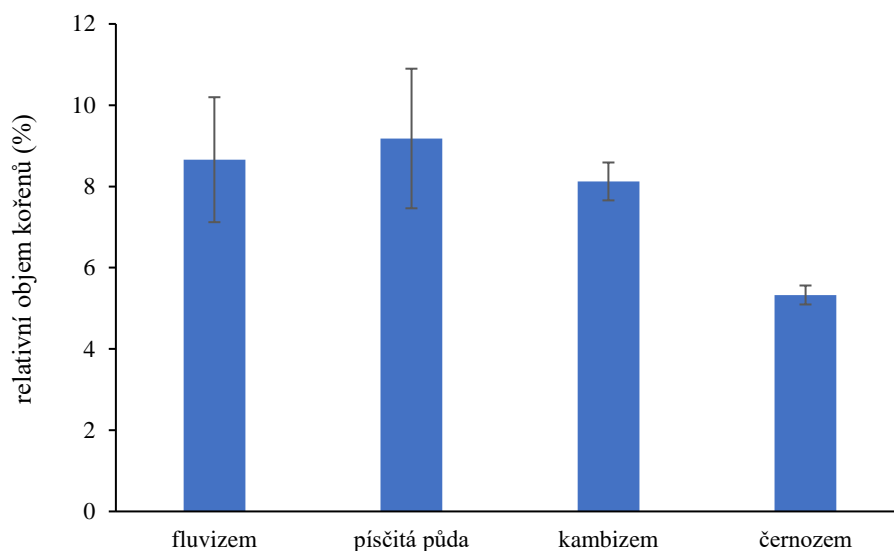
Na obrázku (Obrázek 24) jsou srovnány zpracované obrázky kořenů v písčité půdě s aplikačními dávkami 0, 10 a 20 g/kg biouhlu Phlazenkohle. Lze vidět, že kořeny na obrázku A jsou nejkratší a nejméně větvené, na obrázku B jsou kořeny více větvené ale dosahují přibližně stejné délky. Nejdelší kořeny jsou potom vidět na obrázku C, kde je aplikační dávka 20 g/kg.

Tabulka 9: Naměřené a vypočtené hodnoty pro kvantifikaci kořenového systému v písčité půdě.

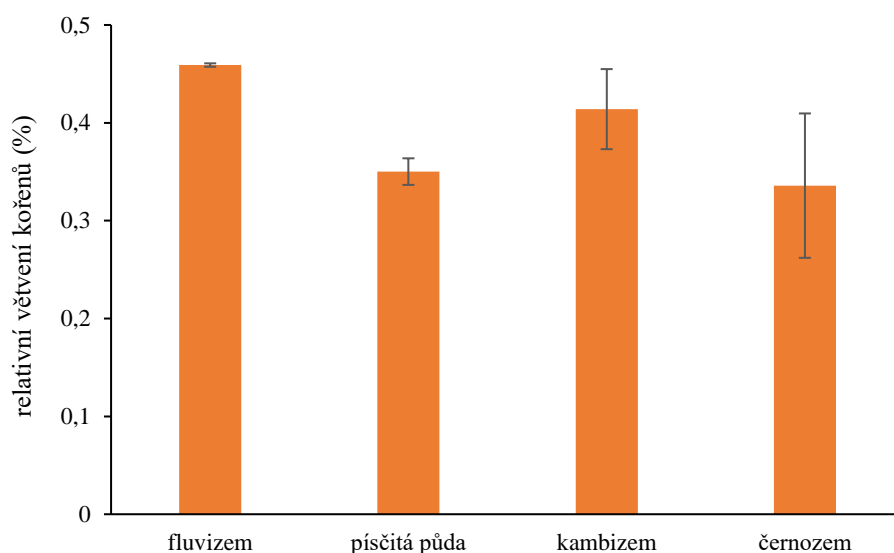
	dávka biouhlu (g/kg půdy)				
	BEZ BIOUHLU	S10	S20	N10	N20
D[B+BW]	1,669	1,686	1,707	1,587	1,66
D[BW]	1,484	1,514	1,529	1,445	1,488
K[B+BW]	385030	497341	481149	349524	389016
K[BW]	135307	185393	171207	151667	175403
rel. K[B+BW] (%)	9,2	11,9	11,5	8,5	13,4
rel. K[BW] (%)	3,2	4,4	4,1	3,6	4,2
větvení kořene (%)	0,35	0,377	0,396	0,43	0,431
hmotnost kořene (g)	0,095	0,089	0,0704	0,1104	0,1009

V tabulce (Tabulka 9) jsou vidět data z obrazové analýzy kořenů (v písčité půdě) získaná pomocí softwaru Harfa (hodnoty fraktální dimenze a fraktální míry) a vypočtené hodnoty pro kvantifikaci kořenů (relativní počet pixelů a větvení kořene). Tabulky s hodnotami pro další půdy (fluvizemě, kambizemě a černozemě) jsou uvedeny v příloze této bakalářské práce (Tabulka 11–13). Postup pro získání hodnot fraktální dimenze D a fraktální míry K je uveden v kapitole 5.4. Hodnoty B+BW značí objem kořenů a hodnoty BW, které zahrnují rozhraní mezi kořeny a pozadím, značí povrch kořenů. Relativní počet pixelů získáme podělením hodnot fraktální míry K (počet pixelů) celkovým počtem pixelů analyzované plochy (2048x2048 pixelů). Pokud podělíme počet pixelů připadajících na B+BW celkovým počtem pixelů a tuto hodnotu vynásobíme 100, tak získáme relativní objem kořenů v %. Stejným způsobem lze stanovit relativní povrch kořenů, kdy počet pixelů připadajících na BW vydělíme opět celkovým počtem pixelů analyzované plochy. Větvení kořene (specifický povrch kořene) je potom povrch kořenů K[BW] podělený počtem pixelů v objemu (K[B+BW]).

Z vypočtených hodnot můžeme v případě písčité půdy vidět, že rostliny v kontaktu s biouhlem mají téměř ve všech případech větší relativní objem a povrch kořenů. Kořeny rostlin pěstovaných v půdách s přidavkem biouhlu se také více větví, což je pro rostliny žádoucí, protože mohou lépe přijímat vodu a živiny z půdy. V porovnání půd dochází k největšímu větvení kořenů v půdách s vyšším obsahem organické hmoty. Kořeny rostlin v písčité půdě měly dle výsledků obrazové analýzy největší objem, což je ve shodě s výsledky kapitoly 6.2.1, kdy byly kořeny rostlin z písčité půdy nejtěžší v porovnání s kořeny u ostatních půd. Vůbec nejvyšší hmotnost měl kořen v písčité půdě s dávkou 10 g/kg biouhlu Phlazenkohle.

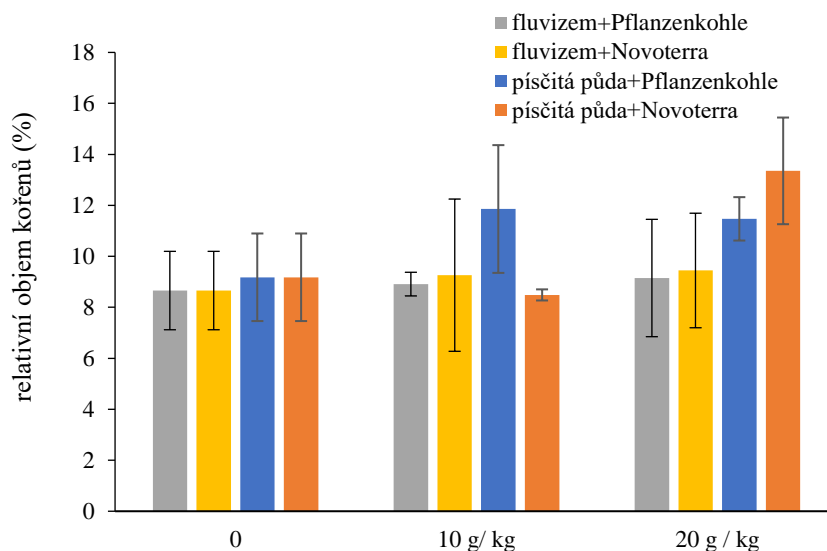


Obrázek 25: Porovnání relativního objemu kořenů (%) v půdách bez biouhlu.

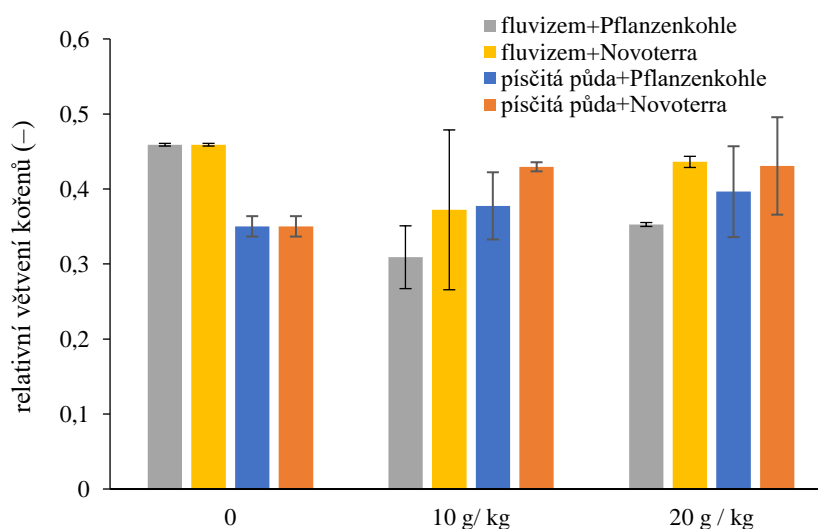


Obrázek 26: Porovnání větvení kořenů (%) v půdách bez biouhlu.

V grafech (Obrázek 25 a 26) lze pozorovat charakteristiky kořenových systémů v půdách bez přídavku biouhlu. Největšího objemu kořenů dosáhly rostliny pěstované v písčité půdě, jejich kořenový systém byl však nejméně větvený. Je to pravděpodobně způsobeno nízkým obsahem organické hmoty v této půdě, kde kořeny rostou spíše do délky a hledají živiny a vodu. Naopak je tomu v případě kambizemě a fluvizemě, které jsou nejvíce větvené ale v porovnání v písčitou půdou mají menší objem (způsobeno vysokým obsahem organické hmoty). Černozem z hlediska objemu vybočuje z řady. Vzhledem k nižšímu obsahu organické hmoty v černozemi se očekával větší objem kořenů, větvení je však porovnatelné s písčitou půdou.

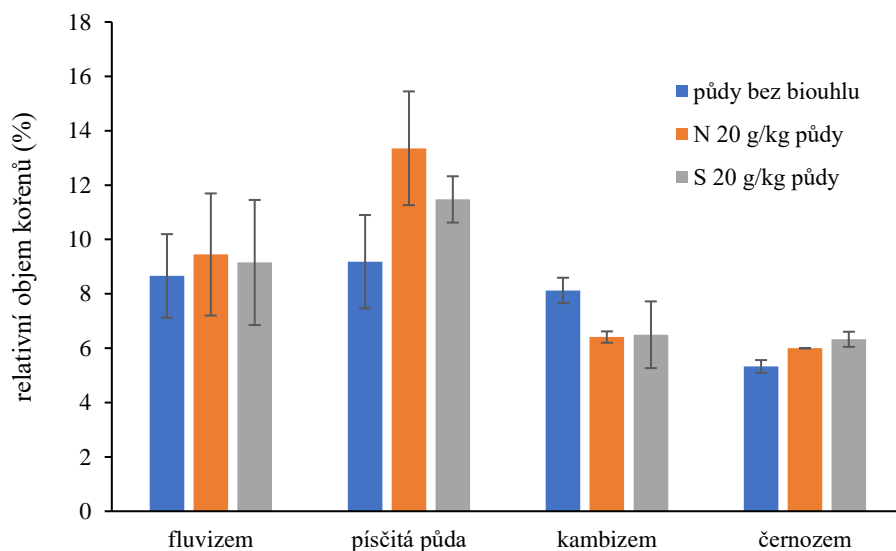


Obrázek 27: Porovnání vlivu dávky a typu biouhlu na relativní objem kořenového systému ve fluvizemi a písčité půdě.

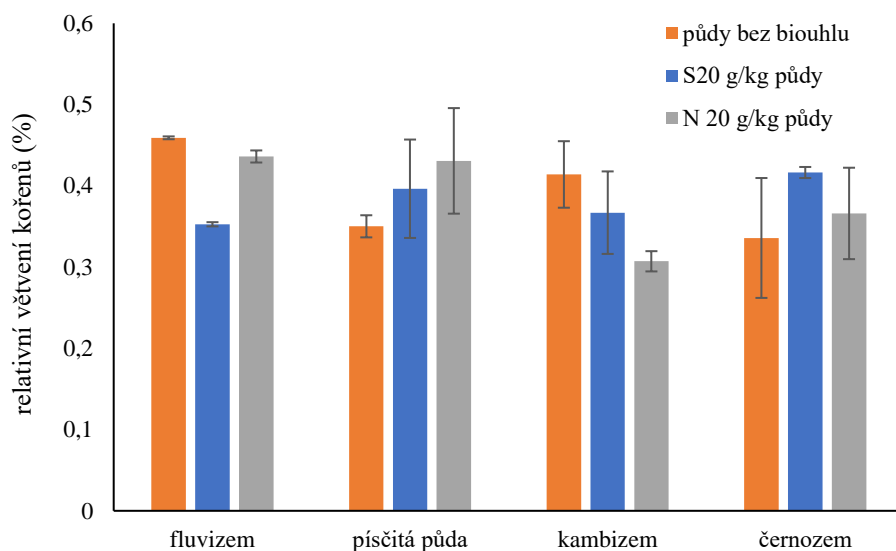


Obrázek 28: Porovnání vlivu dávky a typu biouhlu na relativní větvení kořenového systému ve fluvizemi a písčité půdě.

V grafech (Obrázek 27 a 28) lze pozorovat vliv dvou aplikačních dávek biouhlu na kořenový systém rostlin pěstovaných ve dvou rozdílných půdách – fluvizemi a písčité půdě. U půdy s vyšším obsahem organické hmoty (fluvizemě) přídavek biouhlu v dávkách 10 a 20 g/kg příliš neovlivnil objem kořenů. V případě větvení kořenového systému v této půdě lze vidět, že po přidání biouhlu do půdy větvení kořenů mírně klesá. U půdy s nižším obsahem organické hmoty (písčité půda) biouhel zvyšuje objem kořenů a zároveň jsou kořeny více větveny. Tento trend lze pozorovat u obou dávek a obou typů biouhlu, avšak u vyšší dávky biouhlu (20 g/kg) je rozdíl pozorovaných charakteristik kořenového systému znatelnější.



Obrázek 29: Porovnání relativního objemu kořenů bez přídavku a s přídavkem biouhlu ve vybraných půdách.



Obrázek 30: Porovnání relativního větvení kořenů bez přídavku a s přídavkem biouhlu ve vybraných půdách.

U písčité půdy je díky nízkému obsahu organické hmoty pozorován největší vliv biouhlu na kořenový systém, a to jak z hlediska objemu kořenů, tak jejich větvení (Obrázek 29 a 30). V případě černozemě lze sledovat podobný trend jako u písčité půdy, kdy vliv biouhlu je pozitivní ale ne tak znatelně. U půd s vyšším obsahem organické hmoty (fluvizem, kambizem) se přídavek biouhlu pozitivně spíše neprojevuje.

7 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo posoudit, zda má biouhel přidaný do půdy vliv na růst modelové rostliny – kukuřice seté (*Zea mays*). Kultivace rostlin proběhla ve čtyřech zvolených druzích půd, do nichž byl aplikován biouhel NovoTerra a Phlazenkohle v dávkách 0; 10 a 20 g/kg. K vyhodnocení vlivu biouhlu na růst rostlin bylo využito měření výšky rostlin v průběhu kultivačních experimentů v závislosti na době kultivace, dále vážení suchých hmotností jednotlivých částí rostlin po ukončení kultivačních experimentů a také obrazové analýzy kořenového systému.

Nejvyššího vzrůstu dosahovaly rostliny pěstované v písčité půdě a černozemi. V případě rostlin v písčité půdě byl nejvíce zřetelný výškový rozdíl mezi rostlinami v kontaktu s biouhlem Phlazenkohle a bez něj. Jedná se totiž o pórovitou půdu s nižším obsahem humusu. Po přidání biouhlu se do této půdy dodalo potřebné množství organické hmoty, což se projevilo na růstu rostlin. V černozemi byla výška rostlin v půdách bez biouhlu a s biouhlem srovnatelná. Je to pravděpodobně způsobeno vyšším obsahem humusu v těchto půdách a přídavek biouhlu se neprojevuje tak výrazně jako v případě půd písčitých. U kambizemě a fluvizemě s vysokým obsahem organické hmoty byl ve většině případů pozorován také pozitivní vliv biouhlu na růst rostlin, rozdíly však nebyly tak zjevné jako u zmiňované písčité půdy.

Porovnáním výšky a hmotnosti rostlin pěstovaných v písčité půdě a černozemi bylo zjištěno, že ačkoliv rostliny v černozemi s aplikační dávkou 20 g/kg biouhlu Phlazenkohle dosahovaly nejvyššího vzrůstu, jejich celková hmotnost byla zřetelně menší a obsahovaly pouze jeden klas v porovnání s obdobně vysokými rostlinami se stejnou aplikační dávkou biouhlu v písčité půdě. Rozdíl celkové hmotnosti rostlin v písčité půdě a černozemi je způsoben výrazně nižší hmotností podzemní části rostlin v černozemi, kde kořenový systém těchto rostlin nebyl dostatečně rozvinutý jako v případě rostlin v písčité půdě. V případě kambizemě měl biouhel pozitivní vliv na hmotnost rostlin, kdy rostliny v kontaktu s biouhlem měly vyšší celkovou hmotnost než rostliny v půdách bez biouhlu.

Po vyhodnocení kultivačního experimentu lze říci, že z vybraných půd na biouhel nejlépe reagovala písčitá půda odebraná v lokalitě Hodonín–Pánov. Důležitým faktorem byla také dávka a typ biouhlu. Pozitivní účinek na růst rostlin u vybrané písčité půdy měla jak dávka 10 g/kg tak i dávka 20 g/kg. Rostliny s dávkou 10 a 20 g/kg dosahovaly podobných výšek, avšak při srovnání celkových hmotností na tom byly lépe rostliny s aplikační dávkou 20 g/kg. Pokud jde o biouhly, lepší výsledky byly jednoznačně prokázány u biouhlu Phlazenkohle vyrobeného v Rakousku.

S využitím obrazové analýzy bylo možno po krátkodobé kultivaci posoudit vliv biouhlu na růst kořenového systému rostlin. Největší vliv biouhlu lze z vybraných půd pozorovat u písčité půdy s nízkým obsahem organické hmoty, kde byl pozorován nárůst v objemu kořenů i jejich větvení. U černozemě měl biouhel také pozitivní vliv na růst kořenů, rozdíly byly však méně zřetelné. V případě půd s vysokým obsahem organické hmoty (fluvizem a kambizem) se přídavek biouhlu téměř neprojevil.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] RAWAT, Jyoti, Jyoti SAXENA a Pankaj SANWAL, 2019. Biochar: A Sustainable Approach for Improving Plant Growth and Soil Properties. *Biochar-An Imperative Amendment for Soil and the Environment* [online]. IntechOpen, 2019-10-9. ISBN 978-1-83881-987-3.
- [2] WANG, Jianlong a Shizong WANG. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2019, 227, 1002-1022. ISSN 09596526.
- [3] SALAŠ, Petr: Evropský institut pro zadržování vody v krajině z.ú. ISBN 978-80-270-1479-8.
- [4] AHMED, Enas M. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications. *Journal of Advanced Research*. 2015, 6(2), 105-121. ISSN 20901232.
- [5] ROŽNOVSKÝ, Jaroslav, ed. Voda, půda a rostliny: sborník abstraktů a CD s příspěvky z mezinárodní konference: Křtiny 29.6.-30.6.2013. Praha: Nakladatelství Českého hydrometeorologického ústavu, 2013. ISBN 978-80-87577-17-2.
- [6] BAO, Ziting, Caihong XIAN, Qijuan YUAN, Guiting LIU a Jun WU. Natural Polymer-Based Hydrogels with Enhanced Mechanical Performances: Preparation, Structure, and Property. 2019, 8(17). ISSN 2192-2640.
- [7] NARJARY, B, P AGGARWAL, S KUMAR a MD MEENA, 2013. Significance of hydrogel and its application in agriculture. *Indian farming*. (62), 15-17.
- [8] TOMADONI, Bárbara, Claudia CASALONGUÉ a Vera A. ALVAREZ. Biopolymer-Based Hydrogels for Agriculture Applications: Swelling Behavior and Slow Release of Agrochemicals. GUTIÉRREZ, Tomy J., ed. *Polymers for Agri-Food Applications* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2019, 2019-08-02, s. 99-125 [cit. 2021-7-3]. ISBN 978-3-030-19415-4.
- [9] GUILHERME, Marcos R., Fauze A. AOUADA, André R. FAJARDO, Alessandro F. MARTINS, Alexandre T. PAULINO, Magali F.T. DAVI, Adley F. RUBIRA a Edvani C. MUNIZ. Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review. *European Polymer Journal* [online]. 2015, 72, 365-385 [cit. 2021-7-3]. ISSN 00143057.
- [10] ANEMANA, Timothy, Mihály ÓVÁRI, Ágnes SZEGEDI, et al., 2020. Optimization of Lignite Particle Size for Stabilization of Trivalent Chromium in Soils. 29(3), 272-291. ISSN 1532-0383.
- [11] PEHLIVAN, E. a G. ARSLAN. Removal of metal ions using lignite in aqueous solution—Low cost biosorbents. 2007, 88(1), 99-106. ISSN 03783820.
- [12] MIKULÁŠKOVÁ, Barbora, Lubomír LAPČÍK a Ivan MAŠEK. Lignite: Structure, properties and applications. *Chemické listy*. 1997, 91(3), 160-168.
- [13] UZINGER, Nikolett, Márk RÉKÁSI, Eszter DRASKOVITS a Attila ANTON. Stabilization of Cr, Pb, and Zn in Soil Using Lignite. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. 2013, 23(3), 270-286. ISSN 1532-0383.

- [14] CALIK, Umit a Erol SADOGLU. Engineering properties of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite. 2014, 6(4), 403-418. ISSN 2005 - 307X.
- [15] CALIK, Umit a Erol SADOGLU. Classification, shear strength, and durability of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite. 2014, 71(3), 1289-1303. ISSN 0921 - 030X.
- [16] DOGAN, Mehmet a Mahir ALKAN. Some physicochemical properties of perlite as an adsorbent. *Fresenius Environmental Bulletin*. 2004(13), 251-257
- [17] SILBER, A., B. BAR-YOSEF, I. LEVKOVITCH a S. SORYANO. PH-Dependent surface properties of perlite: Effects of plant growth. *Geoderma*. 2010, 158(3-4), 275-281. ISSN 00167061.
- [18] DAVIS, Mark E. a Raul F. LOBO, 1992. Zeolite and molecular sieve synthesis. *Chemistry of Materials*. 4(4), 756-768. DOI: 10.1021/cm00022a005. ISSN 0897-4756.
- [19] MOSHOESHOE, Mohau a Veronica OBUSENG. A Review of the Chemistry, Structure, Properties and Applications of Zeolites. *American Journal of Materials Scienc.* **2017**(7(5)), 196-221. ISSN 2162-9382.
- [20] Metal immobilization in soils using synthetic zeolites, 2002. *Journal of Environmental quality*. (3), 813-821. ISSN 00472425.
- [21] Vliv aplikace pomocných půdních látek na vývoj botanického složení extenzivního trávníku na výsušném stanovišti. ISBN 978-80-87361-83-2.
- [22] EAGRI: Portál farmáře, © 2009-2020. Ministerstvo zemědělství. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/farmar/EPH/registr-hnojiv.html>
- [23] SALAŠ, Petr, 2012. Opatření vedoucí k zamezení biologické degradace půd a zvýšení biodiverzity v suchých oblastech ČR: certifikovaná metodika. Brno: Mendelova univerzita v Brně. ISBN 978-80-7375-585-0.
- [24] KLOSS, Stefanie, Franz ZEHETNER, Bernhard WIMMER, Jannis BUECKER, Franziska REMPT a Gerhard SOJA, 2014. Biochar application to temperate soils: Effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 177(1), 3-15. DOI: 10.1002/jpln.201200282. ISSN 14368730.
- [25] WIJITKOSUM, Saowanee a Preamsuda JIWNOK. Elemental Composition of Biochar Obtained from Agricultural Waste for Soil Amendment and Carbon Sequestration. *Applied Sciences* [online]. 2019, **9**(19) [cit. 2021-7-3]. ISSN 2076-3417.
- [26] LEHMANN, Johannes a Stephen JOSEPH, ed. *Biochar for Environmental Management: science and technology*. Abingdon: Earthscan, 2006. ISBN 978-1-84407-658-1.
- [27] BEZERRA, Joana, Esther TURNHOUT, Isabel Melo VASQUEZ, Tatiana Francischinelli RITTL, Bas ARTS a Thomas W. KUYPER. The promises of the Amazonian soil: shifts in discourses of Terra Preta and biochar. *Journal of Environmental Policy & Planning*. 2019, 21(5), 623-635. ISSN 1523 - 908X.

- [28] SOENTGEN, Jens, Klaus HILBERT, Carolin VON GROOTE-BIDLINGMAIER, Gabriele HERZOG-SCHRÖDER, Eije ERICH PABST a Sabine TIMPF. Terra preta de índio: Commodification and Mythification of the Amazonian Dark Earths. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*. 2017, 26(2), 136-143. ISSN 0940-5550.
- [29] GLASER, Bruno, Ludwig HAUMAIER, Georg GUGGENBERGER a Wolfgang ZECH. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*. 2001, 88(1), 37-41. ISSN 0028-1042.
- [30] MASCHIO, G., C. KOUFOPANOS a A. LUCCHESI. Pyrolysis, a promising route for biomass utilization. *Bioresource Technology*. 1992, 42(3), 219-231. ISSN 09608524.
- [31] YADAV, Krishna a Sheeja JAGADEVAN. Influence of Process Parameters on Synthesis of Biochar by Pyrolysis of Biomass: An Alternative Source of Energy. *IntechOpen*, 2020, 2020-1-22. ISBN 978-1-78984-063-6.
- [32] HASSAN, Masud, Yanju LIU, Ravi NAIDU, Sanjai J. PARIKH, Jianhua DU, Fangjie QI a Ian R. WILLETT. Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*. 2020, 744. ISSN 00489697.
- [33] SOHI, S.P., E. KRULL, E. LOPEZ-CAPEL a R. BOL. A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. Elsevier, 2010, 2010, s. 47-82. *Advances in Agronomy*. ISBN 9780123810236.
- [34] MAAZ, Tai McClellan, William C. HOCKADAY a Jonathan L. DEENIK. Biochar Volatile Matter and Feedstock Effects on Soil Nitrogen Mineralization and Soil Fungal Colonization. *Sustainability* [online]. 2021, **13**(4) [cit. 2021-7-3]. ISSN 2071-1050.
- [35] TOMCZYK, Agnieszka, Zofia SOKOŁOWSKA a Patrycja BOGUTA. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* [online]. 2020, **19**(1), 191-215 [cit. 2021-7-3]. ISSN 1569-1705.
- [36] LEHMANN, Johannes a Stephen JOSEPH, ed. *Biochar for Environmental Management: science and technology*. Abingdon: Earthscan, 2006. ISBN 978-1-84407-658-1.
- [37] SINGH, Balwant, Marta CAMPS-ARBESTAIN a Johannes LEHMANN. *Biochar: a guide to analytical methods*. Clayton, Victoria: CSIRO Publishing, 2017. ISBN 9781486305094.
- [38] WEBER, Kathrin a Peter QUICKER. Properties of biochar. *Fuel* [online]. 2018, **217**, 240-261 [cit. 2021-7-3]. ISSN 00162361.
- [39] NARTEY, Obemah D. a Baowei ZHAO. Biochar Preparation, Characterization, and Adsorptive Capacity and Its Effect on Bioavailability of Contaminants: An Overview. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. 2014, **2014**, 1-12 [cit. 2021-7-3]. ISSN 1687-8434.

- [40] LENG, Lijian, Qin XIONG, Lihong YANG, et al., 2021. An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. *Science of The Total Environment*. 763. ISSN 00489697.
- [41] ALLER, M. Fernanda. Biochar properties: Transport, fate, and impact. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2016, 46(14-15), 1183-1296. ISSN 1064-3389.
- [42] LEE, Jechan, Ki-Hyun KIM a Eilhann E. KWON. Biochar as a Catalyst. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 77, 70-79. ISSN 13640321.
- [43] SCHMIDT, HP a K WILSON, 2014. The Biochar Journal: The 55 uses of biochar. *Arbaz*. ISSN 2297-1114.
- [44] DUWIEJUAH, Abudu Ballu, Abdul Halim ABUBAKARI, Albert Kojo QUAINOO a Yakubu AMADU. Review of Biochar Properties and Remediation of Metal Pollution of Water and Soil. *Journal of Health and Pollution* [online]. 2020, 10(27) [cit. 2021-7-3]. ISSN 2156-9614.
- [45] PANWAR, N. L., Ashish PAWAR a B. L. SALVI. Comprehensive review on production and utilization of biochar. *SN Applied Sciences* [online]. 2019, 1(2) [cit. 2021-7-3]. ISSN 2523-3963.
- [46] ZHANG, Xiaokai, Hailong WANG, Lizhi HE, et al. Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. 2013, 20(12), 8472-8483 [cit. 2021-7-3]. ISSN 0944-1344.
- [47] BRASSARD, Patrick, Stéphane GODBOUT a Vijaya RAGHAVAN. Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved. *Journal of Environmental Management* [online]. 2016, 181, 484-497 [cit. 2021-7-21]. ISSN 03014797.
- [48] Biouhel v půdě. Dostupné z: https://biouhel.cz/?page_id=67
- [49] DAS, Shaon Kumar, Goutam Kumar GHOSH a Ravikant AVASTHE. Application of biochar in agriculture and environment, and its safety issues. *Biomass Conversion and Biorefinery*. ISSN 2190-6815.
- [50] BLANCO-CANQUI, Humberto. Biochar and Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal* [online]. 2017, 81(4), 687-711 [cit. 2021-7-3]. ISSN 03615995.
- [51] BIČÍK, Ivan a Jiří CIBULKA. Půda v České republice. Editor Ivo HAUPTMAN, editor Zdeněk KUKAL, editor Karel POŠMOURNÝ. Praha: Pro Ministerstvo životního prostředí a Ministerstvo zemědělství vydal Consult, 2009. ISBN 80-903482-4-6.
- [52] DORAN, J.W., D.C. COLEMAN, D.F. BEZDICEK a B.A. STEWART, ed. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1994, 2015-10-26, s. 1-21. ISBN 9780891189305.
- [53] VOPRAVIL, Jan. Půda a její hodnocení v ČR. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2011. ISBN 978-80-87361-02-3.

- [54] ŠIMEK, Miloslav. *Základy nauky o půdě*. České Budějovice: Jihočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7040-629-1.
- [55] ŠANTRŮČKOVÁ, H., 2014. *Základy ekologie půdy*. 1. České Budějovice. ISBN 978-80-7394-480-3.
- [56] ŠIMEK, Miroslav. *Živá půda 1. Kdo v půdě žije? Živa*. Nakladatelství Academia, 2020, 27-32. ISSN 0044-4812.
- [57] POKORNÝ, Eduard a Bořivoj ŠARAPATKA. *Půdoznalství pro ekozemědělce*. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací, 2003. Příručka ekologického zemědělce. ISBN 80-7084-295-4.
- [58] VANĚK, Václav, KOLÁŘ, Ladislav, PAVLÍKOVÁ, Daniela: *Úloha organické hmoty v půdě*. Racionální použití hnojiv-sborník z konference, ISBN 978-80-213-2006-2
- [59] VRBA, Vladimír, HULEŠ, Ludvík: *Humus-půda-rostlina (2) Humus a půda*. Biom.cz. 2006-11-14. ISSN: 1801-2655.
- [60] PAVLŮ, Lenka, 2018. *Základy pedologie a ochrany půdy*. ISBN 978-80-213-2876-1.
- [61] POKORNÝ, Eduard, Bořivoj ŠARAPATKA a Květuše HEJÁTKOVÁ. *Hodnocení kvality půdy v ekologicky hospodařícím podniku: metodická pomůcka*. Náměšť nad Oslavou: ZERA-Zemědělská a ekologická regionální agentura, 2007. ISBN 80-903548-5-8.
- [62] STAWARCZYK, Michał a Kinga STAWARCZYK. Use of the ImageJ Program to Assess the Damage of Plants By Snails. *Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology* [online]. 2015, **20**(1-2), 67-73 [cit. 2021-7-3]. ISSN 2084-4506.
- [63] MENDOZA, Fernando a Renfu LU. Basics of Image Analysis. PARK, Bosoon a Renfu LU, ed. *Hyperspectral Imaging Technology in Food and Agriculture* [online]. New York, NY: Springer New York, 2015, 2015, s. 9-56 [cit. 2021-7-3]. Food Engineering Series. ISBN 978-1-4939-2835-4.
- [64] LUKÁŠ, Jan, 2008. *Využití obrazové analýzy v rostlinolékařské praxi: metodika pro útvary státní správy* [online]. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby [cit. 2020-06-29]. ISBN978-80-87011-69-0.
- [65] GALKOVSKIY, Taras, Yuriy MILEYKO, Alexander BUCKSCH, et al. GiA Roots: software for the high throughput analysis of plant root system architecture. *BMC Plant Biology* [online]. 2012, **12**(1) [cit. 2021-7-3]. ISSN 1471-2229.
- [66] NARISSETTI, Narendra, Michael HENKE, Christiane SEILER, Rongli SHI, Astrid JUNKER, Thomas ALTMANN a Evgeny GLADILIN. Semi-automated Root Image Analysis (saRIA). *Scientific Reports* [online]. 2019, **9**(1) [cit. 2021-7-18]. ISSN 2045-2322.
- [67] LOBET, Guillaume, Loïc PAGÈS a Xavier DRAYE. A Novel Image-Analysis Toolbox Enabling Quantitative Analysis of Root System Architecture. *Plant Physiology* [online]. 2011, **157**(1), 29-39 [cit. 2021-7-3]. ISSN 1532-2548.
- [68] LOBET, Guillaume, Iko T. KOEVOETS, Manuel NOLL, Patrick E. MEYER, Pierre TOCQUIN, Loïc PAGÈS a Claire PÉRILLEUX. Using a Structural Root System Model to Evaluate and Improve the Accuracy of Root Image Analysis

- Pipelines. *Frontiers in Plant Science* [online]. 2017, **8** [cit. 2021-7-3]. ISSN 1664-462X.
- [69] TANURE, Maria Maiara Cazotti, Liovando Marciano DA COSTA, Hugo Alberto HUIZ, Raphael Bragança Alves FERNANDES, Paulo Roberto CECON, José Domingos PEREIRA JUNIOR a José Maria Rodrigues DA LUZ. Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. *Soil and Tillage Research* [online]. 2019, **192**, 164-173 [cit. 2021-7-3]. ISSN 01671987.
- [70] AHMAD, Munir, Adel R.A. USMAN, Abdullah S. AL-FARAJ, Mahtab AHMAD, Abdelazeem SALLAM a Mohammad I. AL-WABEL. Phosphorus-loaded biochar changes soil heavy metals availability and uptake potential of maize (*Zea mays* L.) plants. *Chemosphere* [online]. 2018, **194**, 327-339 [cit. 2021-7-3]. ISSN 00456535.
- [71] SYUHADA, A.B., J. SHAMSHUDDIN, C.I. FAUZIAH, A.B. ROSENANI, A. ARIFIN a Francis ZVOMUYA. Biochar as soil amendment: Impact on chemical properties and corn nutrient uptake in a Podzol. *Canadian Journal of Soil Science* [online]. 2016, **96**(4), 400-412 [cit. 2021-7-3]. ISSN 0008-4271.
- [72] BRUKHIN, V. a N. MOROZOVA. Plant Growth and Development-Basic Knowledge and Current Views. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena* [online]. 2011, **6**(2), 1-53 [cit. 2021-7-18]. ISSN 0973-5348.
- [73] FÜZY, Anna, Ramóna KOVÁCS, Imre CSERESNYÉS, István PARÁDI, Tibor SZILIKOVÁCS, Bettina KELEMEN, Kálmán RAJKAI a Tünde TAKÁCS. Selection of plant physiological parameters to detect stress effects in pot experiments using principal component analysis. *Acta Physiologiae Plantarum* [online]. 2019, **41**(5) [cit. 2021-7-18]. ISSN 0137-5881.
- [74] Science Buddies: Measuring Plant Growth, *Science Buddies* [online]. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/references/measuring-plant-growth>
- [75] WANG, Xu, Daljit SINGH, Sandeep MARLA, Geoffrey MORRIS a Jesse POLAND. Field-based high-throughput phenotyping of plant height in sorghum using different sensing technologies. *Plant Methods* [online]. 2018, **14**(1) [cit. 2021-7-18]. ISSN 1746-4811.
- [76] HUANG, Weiwei, David RATKOWSKY, Cang HUI, Ping WANG, Jialu SU a Peijian SHI. Leaf Fresh Weight Versus Dry Weight: Which is Better for Describing the Scaling Relationship between Leaf Biomass and Leaf Area for Broad-Leaved Plants? *Forests* [online]. 2019, **10**(3) [cit. 2021-7-21]. ISSN 1999-4907.
- [77] NULTSCH, Wilhelm, 1971. General botany [online]. Academic Press [cit. 2021-7-21]. ISBN 9781483219011.
- [78] BASHAN, Yoav a Luz E. DE-BASHAN, 2005. Fresh-weight measurements of roots provide inaccurate estimates of the effects of plant growth-promoting bacteria on root growth: a critical examination. *Soil Biology and Biochemistry* [online]. **37**(10), 1795-1804 [cit. 2021-7-19]. ISSN 00380717.

- [79] BUTNAN, Somchai, Jonathan L. DEENIK, Banyong TOOMSAN, Michael J. ANTAL a Patma VITYAKON. Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy. *Geoderma* [online]. 2015, **237-238**, 105-116 [cit. 2021-7-19]. ISSN 00167061.
- [80] Zmeškal, O., Nežádal, M., Sedlák, O. Využití fraktální analýzy při hodnocení tiskovin. In *V. polygrafický seminář*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2001. s. 92, ISBN: 80-7149-372- X.
- [81] EKatalog BPEJ [online], 2019. © VÚMOP [cit. 2021-7-23]. Dostupné z: <https://bpej.vumop.cz/>
- [82] EBC European Biochar Certification [online]. Švýcarsko [cit. 2021-7-23]. Dostupné z: <https://www.european-biochar.org/en>
- [83] KWS osiva s.r.o.: KWS SAAT SE & Co. [online]. [cit. 2021-7-23]. Dostupné z <https://www.kws.com/cz/cs/>

PŘÍLOHY

Tabulka 10: Naměřené charakteristiky vzduchu v pěstebním boxu a odstáté kohoutkové vody používané na závlahu rostlin.

Datum	teplota vzduchu [°C]	teplota min [°C]	teplota max [°C]	vlhkost vzduchu [%]	vlhkost min [%]	vlhkost max [%]	pH vody [-]	konduktivita [μS/cm]
25.9	21,8	-	-	-	-	-	6,83	560
29.9	17,4	-	-	51	-	-	7,35	638
1.10	19,6	13,9	26,7	50	37	79	7,03	696
2.10	22,4	13,9	26,7	47	37	79	7,15	648
5.10	24,5	20,8	26,2	43	41	68	7,81	642
7.10	25,5	22,6	27,9	39	32	60	7,92	646
9.10	24,8	22,4	27,4	35	34	52	7,91	565
12.10	24,1	22,1	25,8	37	35	52	7,71	622
14.10	23,0	20,9	25,4	40	35	48	7,60	697
16.10	23,9	20,8	25,4	37	37	55	7,63	726
19.10	17,5	12,8	24,5	45	36	59	7,40	683
21.10	20,8	14,9	20,9	38	37	54	8,06	717
23.10	22,9	19,8	23,2	41	37	67	7,95	638
26.10	22,0	21,1	23,4	40	38	60	8,10	630
29.10	23,1	20,8	23,1	39	37	64	8,05	657
31.10	21,6	20,6	23,1	52	40	67	7,92	665
2.11	18,9	17,3	21,8	59	52	73	7,90	584
4.11	21,5	19	22	51	51	75	7,77	675
6.11	22,2	19,5	25,1	41	37	59	7,92	681
9.11	19,2	18,2	22,5	46	40	54	7,99	631
11.11	19,4	18,4	21,8	47	45	58	7,85	668
13.11	19,4	17,9	19,5	47	41	53	7,57	585
16.11	19,4	17,6	19,9	43	42	69	7,53	626
18.11	19,9	17,5	20	45	43	66	7,82	663
20.11	19,9	18,1	20,4	41	40	60	7,77	659
23.11	18,4	16,5	20,1	37	37	55	7,83	605
25.11	19,2	16,5	19,2	36	36	62	7,75	615
27.11	18,2	17,4	19,4	47	36	60	7,59	701
30.11	17,7	16,5	20,5	42	37	56	7,78	726

Tabulka 11: Naměřené a vypočtené hodnoty pro kvantifikaci kořenového systému ve fluvizemi.

	dávka biouhlu (g/kg půdy)				
	BEZ BIOUHLU	S10	S20	N10	N20
D[B+BW]	1,670	1,601	1,686	1,660	1,689
D[BW]	1,536	1,463	1,503	1,494	1,553
K[B+BW]	408756	373767	407592	441500	462818
K[BW]	187579	115090	143865	170968	201482
rel. K[B+BW] (%)	9,7	8,9	9,2	9,3	9,4
rel. K[BW] (%)	4,5	2,7	3,4	4,1	4,8
větvení kořene (%)	0,459	0,309	0,353	0,372	0,436
hmotnost kořene (g)	0,0796	0,0745	0,0875	0,0635	0,1001

Tabulka 12: Naměřené a vypočtené hodnoty pro kvantifikaci kořenového systému v kambizemi.

	dávka biouhlu (g/kg půdy)				
	BEZ BIOUHLU	S10	S20	N10	N20
D[B+BW]	1,638	1,641	1,621	1,631	1,628
D[BW]	1,482	1,493	1,471	1,446	1,421
K[B+BW]	332380	338704	308736	308344	262600
K[BW]	141575	135916	135463	98325	80697
rel. K[B+BW] (%)	8,1	8,1	6,5	7,4	6,4
rel. K[BW] (%)	3,4	3,2	2,6	2,2	1,9
větvení kořene (%)	0,414	0,400	0,367	0,352	0,307
hmotnost kořene (g)	0,0918	0,1027	0,0808	0,0609	0,0462

Tabulka 13: Naměřené a vypočtené hodnoty pro kvantifikaci kořenového systému v černozemi.

	dávka biouhlu (g/kg půdy)				
	BEZ BIOUHLU	S10	S20	N10	N20
D[B+BW]	1,468	1,612	1,608	1,445	1,505
D[BW]	1,260	1,465	1,444	1,248	1,310
K[B+BW]	154789	253097	257082	47989	142721
K[BW]	36917	131326	107001	15891	30781
rel. K[B+BW] (%)	5,3	6,2	6,3	4,7	6,0
rel. K[BW] (%)	1,5	2,5	2,6	0,7	0,4
větvení kořene (%)	0,336	0,410	0,416	0,331	0,323
hmotnost kořene (g)	0,0445	0,0464	0,0498	0,0832	0,0689