

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Uvolňování dusíku a fosforu z biocharu připraveného z
masokostního separátu**

Diplomová práce

Bc. Markéta Pohanková

Technologie odpadu

Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Tlustoš, CSc., dr. h. c.

Konzultantka práce: Ing. Altyn Taisheva, CSc.

© 2024 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci " Uvolňování dusíku a fosforu z biocharu připraveného z masokostního separátu " jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 20.4.2024

Poděkování

Ráda bych poděkovala prof. Ing. Pavlu Tlustošovi, CSc., dr. h. c. za odborné vedení, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování diplomové práce. Mé poděkování patří také Ing. Altyn Taisheva, CSc. za cenné rady, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování diplomové práce věnovala.

Uvolňování dusíku a fosforu z biocharu připraveného z masokostního separátu

Souhrn

Biochar, materiál bohatý na uhlík, je vyráběn z biomasy pomocí termochemického procesu pyrolýzy. Pyrolýza zahrnuje ohřev biomasy bez přítomnosti kyslíku, při kterém dochází k uvolňování plynu, kapaliny a vzniku pevného produktu – biocharu. Biochar je v současnosti velkým tématem, jelikož ho lze připravit z celé řady organických materiálů a prezentuje se řadou velmi důležitých vlastností. Mezi tyto materiály patří i odpady z jatek a kafilerií. S narůstající produkcí masa se zvyšuje i objem odpadních kostí a dalšího odpadu živočišného původu. Bonechar neboli kostní uhlí (kostní biochar) se jeví jako vhodné východisko z této situace.

Pro řešení diplomové práce byly navrženy následující hypotézy: Předpokládáme, že dusík a fosfor se z bonecharu, připraveného z jatečních odpadů uvolňují odlišně než po aplikaci minerálních hnojiv, ovlivňují tak tvorbu biomasy a obsah jmenovaných živin v nadzemní biomase ječmene jarního. Předpokládáme, že vlastnosti bonecharu ovlivní i přístupnost živin v půdě, zejména pak fosforu.

Hlavním cílem této diplomové práce bylo definovat vliv aplikace biocharu z termicky zpracovaného masokostního separátu na uvolňování živin, konkrétně dusíku a fosforu a porovnat jej s variantami hnojenými minerálními hnojivy na zemích ze dvou lokalit. Dalším z cílů bylo posoudit vliv bonecharu na výnos nadzemní biomasy ječmene jarního, na akumulaci živin v nadzemní biomase ječmene a na obsah přístupného fosforu v půdě při porovnání s variantami ošetřenými minerálními hnojivy.

V teoretické části byly zpracovány informace z publikací zabývající se odpadním materiálem z jatečního průmyslu. Jsou zde shrnuty základní poznatky o biocharu, jeho vlastnostech, způsobu výroby a využití, zejména aplikací do půdy pro potenciální zlepšení vlastností půdy a pozitivnímu ovlivnění růstu rostlin.

V experimentální části byl založen nádobový experiment. Jako pokusná rostlina byl vybrán ječmen jarní. Pro pokus byla použita zemina ze dvou lokalit (Kambizem – Žamberk, Fluvizem – Cítov), na každém typu půdy byly založeny varianty kontrolní, nehnojené, hnojené minerálním hnojivem a ošetřené biocharem. Po sklizni rostlin byly vzorky zváženy, usušeny a namlety. Následně v nich byl stanoven celkový obsah živin. Z nádob byly odebrány vzorky půd a v nich stanoven obsah přístupného P a hodnota pH. Výsledky chování pyrolyzovaných odpadních materiálů byly porovnány s chováním fosforečných hnojiv a s odbornou literaturou.

V rámci experimentu se potvrdil pozitivní vliv bonecharu na růst a výnos nadzemní biomasy ječmene. Ve srovnání s kontrolní nehnojenou variantou se výnos biomasy po aplikaci bonecharu zvýšil 2,3x pro půdu Žamberk, pro půdu Cítov byl výnos nadzemní biomasy vyšší 1,2x. Nejvyšší celkový odběr dusíku biomasou ječmene byl u varianty s TSP pro oba typy půd, oproti kontrolní nehnojené variantě se zvýšil 1,7x pro půdu Žamberk, 1,2x pro půdu Cítov. Mezi variantami hnojenými TSP a bonecharem neexistuje žádný statisticky významný rozdíl. Vliv aplikace bonecharu na pH půdy nebyl potvrzen. V souladu s výsledky našeho pokusu byl zaznamenán vliv bonecharu na dostupnost fosforu u kyselých půd Žamberk, kdy se zvýšil 2,7x oproti kontrolní nehnojené variantě. Aplikace bonecharu do alkalické půdy Cítov nezvýšila obsah přístupného fosforu v půdě ve srovnání s kontrolní variantou. Mezi kontrolní variantou a variantou s bonecharem neexistuje statisticky významný rozdíl. Termická úprava živočišného odpadu a jeho aplikace do půdy je smysluplná, ale vyžaduje další výzkum.

Klíčová slova: bonechar, dusík, fosfor, obsahy živin v biomase, přístupný P, ječmen jarní

The Release of Nitrogen and Phosphorus from Thermally Treated Slaughterhouse Waste

Summary

Biochar, a carbon-rich material, is produced from biomass by a thermochemical process called pyrolysis. Pyrolysis involves heating the biomass in the absence of oxygen and results in the release of gas, liquid and the formation of a solid by-product-biochar. Biochar is currently a big topic as it can be prepared from a wide range of organic materials. These materials include wastes from slaughterhouses and rendering plants. As meat production increases, so does the volume of waste bones. Bonechar or bone char appears to be a great solution to this situation.

The following hypotheses were proposed to solve the thesis task. We expect that the properties of bonechar will also affect the availability of phosphorus in the soil.

The main objective of this thesis was to define the effect of the application of biochar from thermally processed meat-bone meal on the release of nutrients (nitrogen and phosphorus), and to compare it with mineral fertilized variants. Another objective was to assess the effect of bonechar on the yield of barley biomass, on nutrient accumulation in barley biomass and on the available phosphorus content of the soil when compared with mineral fertilizer treated variants.

In the theoretical part, a summary on waste material from the slaughter industry was prepared. Furthermore, biochar, its properties, production and use were described.

In the experimental part, a vessel experiment was established. Barley was selected as the experimental plant. Soil from two locations (Kambizem - Žamberk, Fluvizem - Cítov) was used for the experiment, on each soil type were established variants of control, unfertilized, fertilized with mineral fertilizer and treated with biochar. After harvesting the plants, the samples were weighed, dried and ground. The total nutrient content was determined. Soil samples were taken from the containers and the available P content and pH were determined. The behavioural results of the pyrolysed waste materials were compared with the behaviour of phosphate fertiliser and with the literature.

The experiment confirmed the positive effect of bonechar on the growth and yield of barley biomass. Compared to the control unfertilized variant, the biomass yield after bonechar application increased 2.3 times for the Žamberk soil, and the biomass yield was 1.2 times higher for the Cítov soil. The highest total nitrogen uptake by barley biomass was in the TSP variant for both soil types, compared to the control unfertilized variant it increased 1.7 times for the Žamberk soil, 1.2 times for the Cítov soil. There is no statistically significant difference between the variants fertilized with TSP and bonechar. The effect of bonechar application on soil pH was not confirmed. In accordance with the results of our experiment, the effect of bonechar on phosphorus availability was observed for the acidic soil Žamberk, when it increased 2.7 times compared to the control unfertilized variant. Application of bonechar to the alkaline soil of Cítov did not increase the content of available phosphorus in the soil compared to the control variant. There was no statistically significant difference between the control and the variant with bonechar. Thermal treatment of animal waste and its application to soil is meaningful but requires further research.

Keywords: bonechar, nitrogen, phosphorus, nutrient contents in biomass, available P, barley

Obsah

1 Úvod	1
2 Vědecké hypotézy a cíle práce	2
3 Literární rešerše	3
3.1 Odpadní materiál z jatečního průmyslu	3
3.1.1 Droby	3
3.1.2 Krev	3
3.1.3 Kůže.....	3
3.1.4 Chlupy.....	4
3.1.5 Rohovinové kožní produkty	4
3.1.6 Peří.....	4
3.1.7 Tuková tkáň	4
3.1.8 Kostí.....	4
3.2 Masokostní moučka	5
3.2.1 Složení masokostních mouček.....	6
3.2.2 Využití masokostní moučky	8
3.2.2.1 Masokostní moučka jako hnojivo	8
3.2.2.2 Masokostní moučka jako zdroj bioplynu.....	8
3.2.2.3 Spalování masokostní moučky v cementárnách	9
3.3 Pyrolýza	10
3.3.1 Druhy pyrolýzy	12
3.3.2 Pyrolyzní produkty	13
3.4 Biochar	13
3.4.1 Základní vlastnosti biocharu.....	14
3.4.1.1 Chemické vlastnosti biocharu.....	14
3.4.1.2 Fyzikální vlastnosti biocharu	17
3.4.2 Složení biocharu	18
3.4.3 Využití biocharu	18
3.4.4 Certifikace biocharu.....	19
3.5 Biochar z masokostní moučky – bonechar	20
3.5.1 Vlastnosti bonecharu	20
3.5.2 Výroba bonecharu.....	20
3.5.3 Využití bonecharu.....	21
3.5.4 Živiny obsažené v bonecharu	22
3.5.5 Dusík.....	23
3.5.6 Fosfor.....	24
4 Materiál a metodika	25
4.1 Zemina a aplikovaná hnojiva	25

4.2	Charakteristika nádobového pokusu	26
4.3	Zpracování vzorků	26
4.3.1	Vzorky půdy	26
4.3.1.1	Hodnota pH	26
4.3.1.2	Půdní živiny	26
4.3.2	Vzorky biomasy	27
4.3.2.1	Stanovení C, N, H, S elementární analýzou	27
4.3.2.2	Stanovení živin mikrovlnným rozkladem	27
4.4	Statistické metody	27
5	Výsledky.....	28
5.1	Vliv aplikace bonecharu na pH půdy	28
5.1.1	Žamberk – hodnota pH	28
5.1.2	Cítov – hodnota pH.....	29
5.2	Vliv aplikace bonecharu na výnos biomasy ječmene	30
5.2.1	Žamberk.....	30
5.2.1.1	Celkový výnos nadzemní biomasy ječmene	30
5.2.1.2	Výnos nadzemní biomasy ječmene – sláma.....	31
5.2.1.3	Výnos nadzemní biomasy ječmene – zrno	32
5.2.2	Cítov.....	33
5.2.2.1	Celkový výnos nadzemní biomasy.....	33
5.2.2.2	Výnos nadzemní biomasy – sláma.....	34
5.2.2.3	Výnos nadzemní biomasy – zrno	35
5.3	Vliv aplikace bonecharu na odběr N rostlinou.....	36
5.3.1	Žamberk.....	36
5.3.2	Cítov.....	37
5.4	Vliv aplikace bonecharu na odběr P rostlinou	38
5.4.1	Žamberk	38
5.4.2	Cítov.....	39
5.5	Vliv aplikace bonecharu na obsah přístupného P v půdě	40
5.5.1	Žamberk obsah přístupného P v půdě.....	40
5.5.2	Cítov obsah přístupného P v půdě	41
6	Diskuze.....	42
6.1	Vliv bonecharu na pH půdy	42
6.2	Vliv aplikace bonecharu na výnos biomasy ječmene jarního	42
6.3	Odběry živin nadzemní biomasou ječmene jarního.....	43
6.3.1	Dusík.....	43
6.3.2	Fosfor.....	44
6.4	Obsah přístupného P v půdě.....	45

7 Závěr.....	47
8 Literatura.....	48
9 Seznam použitých zkratk a symbolů.....	57

1 Úvod

S rostoucím rozvojem civilizace, s nárůstem populace a se zvyšujícími se nároky obyvatel, tzv. konzumní společnosti, se mění i zaměření průmyslových výroby s cílem uspokojování lidských potřeb většinou na úkor životního prostředí. S nárůstem lidské populace souvisí i zvyšování produkce odpadu. Z tohoto odpadu je více než 50 % odpad organický a biologicky odbouratelný. Proto je důležité vyvíjet nové přístupy a technologie, vhodné pro zpracování organické frakce, které by přispěly ke zmírnění problémů s narůstajícím množstvím odpadů.

Biochar je v současnosti velkým tématem, jelikož ho lze připravit z celé řady organických materiálů. Tyto odpady jsou dobře dostupné a nemívají žádné další vhodné využití. V potravinářském průmyslu vzniká relativně velké množství odpadu nebo vedlejších produktů, které je možné dále různými způsoby zpracovávat. Mezi tyto materiály patří i odpady z jatek a kafilerii. S narůstající produkcí masa se zvyšuje i objem odpadních kostí, což je motivací k hledání smysluplných způsobů jejich využití. Každý den je ve světě vyprodukováno přes milion tun kostního odpadu a je tedy důležité najít užitečný způsob pro jeho úpravu a zpracování. Bonechar neboli kostní uhlí (kostní biochar), je skvělé východisko z této situace, kdy je možné kostní odpad zpracovávat pomocí pyrolýzy a produkovat tak velké množství kvalitního bonecharu.

Biochar ovlivňuje kvalitu půd a úrodnost především změnou jejich fyzikálních vlastností, jeho porézní struktura umožňuje lepší provzdušnění půdy. Na povrchu biocharu dochází k chemické vazbě prvků, které jsou následně uvolněny a rozpuštěny v půdní vodě. Biochar na sebe váže živiny (fosfor, dusík, draslík), které se pak z půdy nevyplavují a má retenční schopnost (zadržuje vodu v půdě). Jeho aplikace do půdy neumožňuje jen dodání živin do půdy, nýbrž i snížení emisí skleníkových plynů. Pro jeho využití v zemědělství je důležité znát legislativní nařízení daného státu a způsobu hospodaření, jelikož ne každý vyrobený biochar je vhodný pro konvenční zemědělství.

2 Vědecké hypotézy a cíle práce

Pro řešení diplomové práce byly navrženy následující hypotézy:

Předpokládáme, že dusík a fosfor se z bonecharu, připraveného z jatečních odpadů uvolňují odlišně než po aplikaci minerálních hnojiv, ovlivňují tak tvorbu biomasy a obsah jmenovaných živin v zrnu ječmene jarního.

Předpokládáme, že fyzikální vlastnosti bonecharu ovlivní i přístupnost živin v půdě, zejména pak fosforu.

Cílem této práce bylo definovat vliv úpravy jatečního odpadu pyrolýzou na tvorbu biomasy ječmene jarního. Primárním cílem práce bylo posouzení vlivů bonecharu z kostí drůbeže na akumulaci živin v nadzemní biomase ječmene jarního, konkrétně dusíku a fosforu, a porovnat ji s rostlinami hnojenými minerálními hnojivy na zeminách ze dvou lokalit. Dalším z cílů bylo stanovit vliv úpravy jatečního odpadu pyrolýzou na přístupnost půdního fosforu rostlinám při porovnání s variantami ošetřenými minerálními hnojivy.

3 Literární rešerše

3.1 Odpadní materiál z jatečního průmyslu

Mezi nejdůležitější vedlejší produkty z porážky (odpady), patří droby z poražených zvířat, krev, vnitřní orgány, kůže, kosti, žlázy s vnitřní sekrecí (farmaceutické suroviny), chrupavky a různé kožní deriváty a odpad. Tuková tkáň patří do zvláštní skupiny jatečních odpadů. Tuková tkáň získána na jatkách, anebo při bourání masa je surovinou pro výrobu masných výrobků. Vedlejší jateční produkty se dělí na požitelné a nepožitelné. Nepožitelné vedlejší produkty se vyvážejí z jatek do kafilerií, výsledné produkty mohou být uplatněny jako hnojiva nebo krmiva. Požitelné vedlejší jateční produkty se dále spotřebovávají k lidské výživě a jsou dodávány na trh spolu s výsekovým masem. Některé jsou zpracovávány v masných podnicích na masné výrobky (vnitřnosti, krev, střevo).

3.1.1 Droby

Droby jsou definovány jako jedlá část jatečně upraveného těla poraženého zvířete, která se nepovažuje za maso připravené na porážku. Tato skupina vedlejších produktů porážky zahrnuje orgány a některé další části vznikající při porážce. Droby mají vysoký obsah bílkovin, minerálů a vitamínů. Jsou mnohem méně stabilní než maso, protože obsahují více mikroorganismů a vody a při posmrtných změnách pH méně klesá. Proto je třeba je ihned po extrakci co nejdůkladněji očistit od krve, střevního obsahu atp. Při extrakci i zpracování je třeba dbát na hygienu. Po extrakci byly orgány ochlazeny na + 5 °C během 24 hodin. Vhodnou metodou je průběžné chlazení vnitřností ve vodě (Pipek 1995, Ingr 2004).

3.1.2 Krev

Krev je fyziologická tekutina červené barvy, mírně slané chuti, mírného zápachu, prochází cévním systémem po celém těle a rozvádí živiny a minerály do orgánů. Jedná se o roztok bílkovin, tuků, sacharidů a minerálních látek. Obsahuje vlastní stabilizační systém pro udržení stálého pH a její hustota je podobná vodě (Steinhauser 1995). Zvířecí krev je ceněna pro vysoký obsah bílkovin a železa. U zdravého zvířete bývá sterilní. Její obsah se pohybuje od 3 do 8 % živé hmotnosti. Krev se používá jako barvivo, stabilizátor, emulgátor a důležitá složka potravy. Běžně se používá jako krevní moučka pro krmení zvířat, poskytuje náhradu bílkovin, vitamínů a minerálů (Steinhauser 1995).

3.1.3 Kůže

Kůže jsou hlavní surovinou pro kožedělný průmysl, jsou cennou surovinou, pro jejich některé typické vlastnosti jsou nenahraditelné. V kožedělném průmyslu se hlavně uplatňují kůže vepřové, hovězí, ovčí a jelení. Z těchto kůží se vyrábí nejrůznější výrobky (rukavice, tašky, kabelky, peněženky, kožené sedačky, kabáty, kalhoty, pouzdra). Chrání zvíře před fyzikálními a mechanickými vlivy, také působí jako bariéra před infekcí MO. Kůže pokrývá téměř celý povrch těla zvířete. Skládá se ze tří vrstev – pokožka (epidermis), škůra (corium) a podkožní vazivo (tela subcutanea). Díky relativně velkému hmotnostnímu podílu (4–11 %) z živé váhy

zvířete se jedná o jeden z nejdražších VŽP během zpracování zvířat. Vzhledem ke své náchylnosti na bakterie a rozklad musí být kůže v co nejkratší době po sejmutí ze zvířete ošetřeny. Mezi základní postupy, jak kůže ochránit, je sušení vzduchem či ošetření solí (Kadlec 2002).

3.1.4 Chlupy

Na kůži je možné nalézt různé kožní produkty, mezi ně patří hovězí chlupy, vepřové štětiny, koňské žíně a hřívy, rohy, peří. Chlupy jsou vláknité útvary, které se vyskytují na celém povrchu těla, jako celek tvoří srst. Chlupy mají funkci ochrannou a termoregulační. Zpracovávají v kartáčnickém průmyslu pro výrobu kartáčů a štětců, také jako materiál do pohovek, matrací apod.

3.1.5 Rohovinové kožní produkty

Rohovinou se rozumí rohy a rohovinová pouzdra, která kryjí poslední distální článek prstu zvířete. Rohovina je pružná a pevná hmota, její základní stavební složkou je bílkovina keratin. Mezi rohovinové kožní útvary patří paroží, peří, spárky, koňská kopyta, paznehty, rohy aj. (Steinhauser 1995).

3.1.6 Peří

Celkový podíl peří na hmotnosti je zhruba 7 %. Z hlediska ekonomické využitelnosti a dalšího zpracování se jedná o velmi cenný vedlejší živočišný produkt. Pero se skládá z několika částí (stvol, brk, osten). Peří má proteinový základ, a to keratin. Proteiny tvoří zhruba 90 %, voda 8 % a tuk 1 %. Vyrobené krmivo obsahuje zhruba 70–80 % bílkovinné složky (Barbut 2015).

3.1.7 Tuková tkáň

Tuková tkáň je důležitým vedlejším produktem procesu porážky, je také důležitou součástí zvířecího těla. Její hlavní funkcí je ukládat energii, izolovat a chránit vnitřní orgány před nárazy (ledviny, srdce). Využívá se pro výrobu živočišných tuků nebo zůstává součástí výsekových či výrobních mas. Podle uložení rozeznáváme tuk podkožní, vnitřní, mezisvalový a nitrosvalový. Po porážce zvířat dochází k separaci tukové tkáně (Pipek 1995). Tuková tkáň je variací hladké tkáně, obsahuje asi 1,5 % bílkovin. Skládá se z tukových buněk a malého množství buněčné hmoty (kolagenových vláken). Tuková tkáň se dělí do dvou skupin (sádlo a živočišný tuk), podle obsahu nasycených mastných kyselin a vlastností tuku (Pipek 1995).

3.1.8 Kostí

Kosti jsou velmi důležitým vedlejším produktem masného průmyslu. Jejich celkový podíl na váze hospodářských zvířat se v závislosti na druhu pohybuje od 11 do 16 %. Používají se při výrobě želatiny nebo jako přísady do krmiv pro zvířata. Celý kosterní systém je tvořen kostmi, chrupavkami a klouby, které jsou nosnými složkami pohybového aparátu a tvoří 29–35 % tělesné hmotnosti zvířete. Výtěžnost kostí je u hovězího dobytka 20 %, u vepřového 19 %, u

ovcí a telat asi 30 % (Mokrejs 2009). Morek je také nedílnou součástí kosti, která se stále používá v kulinářství. S používáním kostí úzce souvisí proces zvaný mechanické vykostění. Tento proces umožňuje odstranit z kostí ještě větší procento masa než při tradičním mletí. Toto maso se však již pod stejným názvem nelze prodávat, proto se často přidává do masných výrobků jako náhražka a slouží k doplnění „masové“ části finálního produktu. Jeho procento v produktu je regulováno daným stavem, protože přidání velkého množství extraktantu ovlivňuje jak organoleptické vlastnosti (tmavší produkt), tak chuť. Nejde však jen o dodatečné procento, ale o úplný zákaz přidávání nebo uvádění na obal nad určité procento (Jayathilakan et al. 2012).

3.2 Masokostní moučka

Masokostní moučka se v České republice vyrábí od roku 1961, kdy byly vyráběny pod tlakem 0,3 MPa při teplotě 130–140 °C po dobu 30 minut. Původně z důvodu zneškodnění sporulujících bakterií (rodu *Clostridium*). Následnou legislativou byly podmínky zpracování masokostní moučky stanoveny na 133 °C, 0,3 MPa a 20 minut. Požadavky na vysokou teplotu a tlak by měly zajistit, že všechny proteiny, včetně prionů odpovědných za spongiformní encefalopatii, jsou během procesu denaturovány. Zkrmování masokostních mouček skotu Státní veterinární správa ČR zakázala nařízením ústředního ředitele č. 7 dne 4. 6. 1991. Vyhláška MZe ČR č. 362/1992 platná od 1. 6. 1992 pak stanovuje závazné receptury krmných směsí pro skot – jako povolená součást zde není zmíněna masokostní moučka vůbec. 1. listopadu 2003 vstoupilo v platnost ustanovení vyhlášky č. 284/2003 Sb., kterou se mění vyhláška č. 451/2000 Sb., kterou se provádí zákon č. 91/1996 Sb., o krmivech, ve znění pozdějších předpisů. Zákon o krmivech byl novelizován zákonem č. 45/2008 Sb., kterým byly provedeny změny zákona v souladu s legislativou Evropské unie o krmivech. Legislativa ošetřující nakládání s masokostní moučkou je obsažena v Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009 ze dne 21. října 2009. Toto nařízení stanoví pravidla pro nakládání s živočišnými vedlejšími produkty a jejich deriváty, včetně masokostních mouček, a má za cíl zajistit bezpečnost potravin a krmiv a prevenci šíření nemocí. Podle těchto právních předpisů je v České republice zakázáno používat kostních či masokostních mouček ke krmení hospodářských zvířat. Toto opatření dalo vzniknout problému, jak nadále masokostní moučku využívat. Ročně se v České republice zpracuje asi 300 000 tun vedlejších živočišných produktů. Asi 20 000 včetně tun specifikovaného nebezpečného materiálu (mícha, mozek, lymfatické uzliny) a přibližně 50 000 tun kadáverů a přibližně 230 000 tun materiálu kategorie 3 (podle nařízení ES č. 1774/2002). Celková roční produkce v ČR činí cca 78 000 tun masokostní moučky, z toho asi 22 % je vyrobeno z nebezpečných materiálů.

V minulosti se masokostní moučka běžně používala a používá se dodnes ve vápenkách a cementárnách jako palivo, zejména jako moučka z rizikových materiálů. Zpracování a nakládání s masokostní moučkou upravuje nařízení Evropského parlamentu a Rady č. 1774/2002 o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu, které nejsou určeny k lidské spotřebě. Nařízení stanovuje, že masokostní moučka může být bezpečně zlikvidována spálením v peci (cementárně) nebo přidána do kompostu ve schválených kompostovacích zařízeních. Lisováním lze získat technický tuk. Toto nařízení nabylo účinnosti dnem 3. května 2003 a vedlejší produkty živočišného původu jsou zde klasifikovány podle potenciální míry rizika. Důvodem aplikace tohoto nařízení je minimalizace možnosti šíření

infekčních onemocnění přímo na člověka prostřednictvím zpracovaných živočišných produktů, jakož i přenosem choroboplodných zárodků v živočišných materiálech zvířaty prostřednictvím krmiva apod. Vedlejší produkty živočišného původu jsou rozděleny do tří kategorií, přičemž kategorie 1 zahrnuje materiály s největším potenciálním rizikem a kategorie 3. typ s nejnižším rizikovým potenciálem (Valta, Svobodová 2005).

Materiál 1. kategorie obsahuje: zvířata s podezřením na „bovinní spongiformní encefalopatii“ (BSE) nebo s potvrzenou BSE, zvířata, která byla usmrcena v rámci programu vyhlazení BSE, domácí zvířata, zvířata z cirkusů, pokusná zvířata a zvířata ze zoologických zahrad. Také specifikovaný rizikový materiál (dle rozhodnutí komise EU z 29. června 2000) a celá těla zvířat, obsahující rizikový materiál. Dále sem patří výrobky ze zvířat, kterým byly podávány zakázané látky a výrobky ze zvířat, v nichž jsou překročeny maximální hodnoty pro určité kontaminanty životního prostředí dle skupiny B, bodu 3. (Dodatek směrnice 96/23/ES). Materiály 1. kategorie zahrnují také kuchyňské odpady z jídel z dopravních prostředků v přeshraničním provozu (Valta 2007).

Mezi **materiál 2. kategorie** patří: kejda, obsah žaludků a střev, živočišný materiál z úpravny odpadních vod z jatek. Jako další výrobky ze zvířat, v nichž jsou překročeny maximální hodnoty pro určité kontaminanty životního prostředí. Dále živočišné výrobky ze třetích zemí, které neodpovídají právním předpisům o nákazách zvířat nebo zvířata, která nezhynou porážkou pro konzumaci lidmi. V neposlední řadě také zvířata, která jsou usmrcována k vyhlazení nějaké nákazy (Valta 2007).

Materiál 3. kategorie zahrnuje: části těl jatečných zvířat způsobilé k požívání, ale nejsou určeny pro konzumaci lidmi. Patří sem také části těl jatečných zvířat nezpůsobilé k požívání bez známek přenosných nemocí. Dále kůže, kopyta, rohy, štětiny, peří a krev zvířat (s výjimkou přežvýkavců), která jsou způsobilá ke konzumaci lidmi. Mezi materiál 3. kategorie patří i potraviny živočišného původu, které jsou závadné a nejsou způsobilé pro konzumaci lidmi. Syrové mléko bez známek přenosných nemocí, ryby a mořská zvířata (s výjimkou savců) pro výrobu rybí moučky, vedlejší produkty pro zpracování ryb, vedlejší produkty z líhní ze zvířat bez známek přenosných nemocí (Valta 2007).

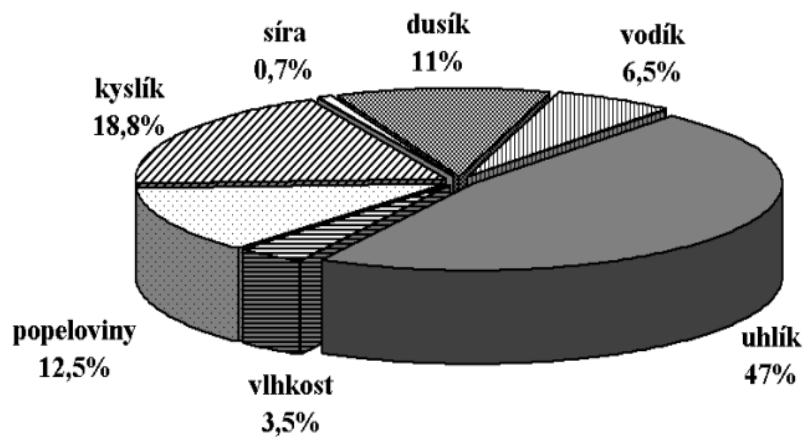
Důležité je správné rozdělení vedlejších produktů živočišného původu podle úrovně rizika a také je nutné zajistit vhodné skladování a bezpečnou přepravu do specializovaných zařízení. Masokostní moučka jako hnojivo je zvažována od roku 2003. Poté bylo v roce 2006 vydáno nařízení Komise (ES) č. 181/2006, které umožňuje použití MKM jako hnojiva pro rostliny ve velkých výsadbách.

3.2.1 Složení masokostních mouček

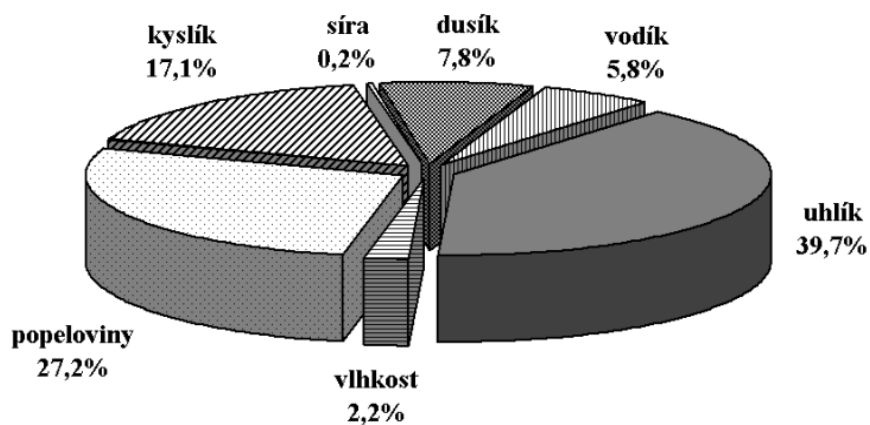
Složení masokostní moučky se liší v závislosti na podílu svaloviny, tuku a kostí v surovině. Masokostní moučka nesmí obsahovat míchu ani mozek. Hlavním zdrojem živin v této moučce jsou kvalitní, lehce stravitelné bílkoviny, které mohou tvořit až 48–62 % obsahu. U vysoce kvalitní masokostní moučky, moučky I. jakosti, je tento poměr minimálně 54 %. Některé aminokyseliny, zejména lysin, se při tepelné úpravě odbourávají. Obsah tuku se pohybuje od 8–18 %, nízký obsah tuku přispívá k delší trvanlivosti.

Přesné složení masokostní moučky se liší v závislosti na poměru svalových partií a ostatních složek jatečného těla (tuk a kosti) ve výchozí surovině. Složení masokostní moučky se také výrazně liší v obsahu minerálních látek v závislosti na podílu kostí ve vstupních

surovinách. Moučky s vyšším podílem kostí obvykle obsahují více minerálních látek, často dvojnásobně více ve srovnání s moučkami s nižším podílem kostí (viz Obr. 1 a Obr. 2) (Ryant 2007).



Obrázek 1 Složení masokostní moučky ze směšného veterinárního sanačního odpadu (zdroj: Ryant, 2007).



Obrázek 2 Složení masokostní moučky ze sanačního odpadu se zvýšeným podílem kostí (odpady z porážek skotu) (zdroj: Ryant, 2007).

3.2.2 Využití masokostní moučky

Masokostní moučka je produkt vzniklý zpracováním živočišného odpadu v masokombinátech. Vyrábí se z různých jatečních odpadů, celých částí těl zvířat, které nejsou určeny k lidské spotřebě. Z hlediska živin přístupných pro zvířata, moučka obsahuje velmi kvalitní a dobře stravitelné bílkoviny, tuk (čím méně tuku, tím je moučka trvanlivější) a ostatní makro i mikroprvky. Nejvyšší jsou moučky, kde byla většina tuku extrahována pomocí organických rozpouštědel. Z hlediska výživy rostlin obsahuje masokostní moučka dusík (N) 3–10 %, fosfor (P_2O_5) 2,6–6,5 %, vápník (CaO) min. 10 % a více. Je vedlejším produktem masného průmyslu, důležitým pro zemědělství, především díky své schopnosti rychle mineralizovat dusík (Tammeorg et al. 2014). Obecně však lze potvrdit, že při renovaci degradované půdy lze široce využít materiály s vysokým podílem organické hmoty. Zejména při zlepšování půdních vlastností v zemědělství. Proto je přítomnost důležitých živin a organické hmoty zodpovědná za příznivé využití těchto odpadů v zemědělství.

Z hlediska výživy rostlin je masokostní moučka materiálem s dlouhodobým hnojivým účinkem. V současné době se běžně nepoužívají k hnojení velkých plodin, ale doporučuje se jejich použití jako suroviny pro kompost. Registrace masokostních mouček jako hnojiva se provádí podle zákona č. 156/1998 Sb. o hnojivech, ve znění pozdějších předpisů. Závazná jsou však i prohlášení hygienických, zdravotnických a veterinárních orgánů, kdy Státní veterinární správa doporučuje používat masokostní moučku především pro výrobu kompostu nebo bioplynu.

3.2.2.1 Masokostní moučka jako hnojivo

Podle výše zmíněných právních předpisů je v České republice zakázáno použití kostních a masokostních mouček ke krmení hospodářských zvířat, ale není vyloučeno použití masokostních mouček na zemědělské půdě ke hnojení, pokud budou splněny podmínky zákona č. 156/1998 Sb., o hnojivech. Masokostní moučka má vysoký obsah živin s velice pozvolným hnojivým účinkem. Rychlejšímu uvolňování živin napomáhá dokonale namletí masokostní moučky. Pokud není namleta dostatečně precizně, je možné ji využít právě jako pomalu se uvolňující zdroj fosforu (Dhanarajan 2017).

Také byly s masokostní moučkou provedeny nádobové pokusy ve studii Ylivainio et al. (2008), kdy bylo hnojeno žito. Tyto pokusy z hlediska příjmu živin dopadly úspěšně, jelikož během těchto pokusů se také prokázalo, že je masokostní moučka dobrý zásobník fosforu pro rostliny, které mají delší vegetační dobu. Z výsledků polního poloprovozního pokusu bylo využito masokostní moučky jako hnojiva při hnojení kukuřice pěstované na zrno a následné statistické zhodnocení vlivu různých dávek masokostní moučky na výnos a vybrané kvalitativní parametry zrna a dále zjištění uvolňování dusíku a dalších živin do půdy, tohoto organického hnojiva (Rada & Ryant).

3.2.2.2 Masokostní moučka jako zdroj bioplynu

Jednou z dalších možností využití masokostní moučky je její využití v bioplynových stanicích při anaerobní fermentaci. Anaerobní fermentace je proces biologického rozkladu organické hmoty, probíhající za nepřítomnosti vzduchu. K tomuto procesu dochází přirozeně

v přírodě, například v bažinách, na dně jezer nebo například na komunálních skládkách. Při procesech anaerobní fermentace jsou simultánně odbourávány základní biologicky rozložitelné substráty. Mezi velmi dobře rozložitelné složky patří i bílkoviny, na něž jsou masokostní moučky bohaté. V procesu anaerobní fermentace je možné úplně rozložit kolem 40–60 % hmoty z veškeré organické hmoty substrátu. Tento proces probíhá bez přístupu vzduchu. Masokostní moučka je velmi dobrou surovinou pro bioplynové stanice. Je bohatá na tuky a bílkoviny. Díky tomu má velmi dobré podmínky na získávání velkého množství bioplynu s obsahem metanu. Masokostní moučka musí být do bioplynové stanice dodávána v určitém poměru s ostatními biologickými materiály, nikoli v čisté formě.

Masokostní moučka vyžaduje speciální podmínky pro bioplynové stanice, protože obsahuje vysoké koncentrace dusíku, který může být pro bakterie toxický. Je proto nutné respektovat optimální poměr mezi dusíkem a uhlíkem v surovině, který se pohybuje mezi 20:1 a 30:1. Masokostní moučka může obsahovat i sírany, které se mohou přeměnit na sirovodík, nebezpečný plyn, který zhoršuje kvalitu bioplynu. Proto by se masokostní moučka měla používat v kombinaci s jinými surovinami s nižším obsahem dusíku a síry, jako je kukuřičná siláž nebo farmářské hnojivo. Spolu s dalšími odpady je masokostní moučka velmi dobrou surovinou pro výrobu bioplynu. Obecně je anaerobní biomethanizace vhodná v tzv. kofermentačním zapojení, kdy jsou spolu s masokostní moučkou zpracovávány i další substráty, jejichž účelem není jen udržet stabilní mikrobiologické podmínky pro provoz reaktoru, ale také docílit optimální kvality tuhého zbytku odvodňovaného na kompostový substrát (Straka et al. 2003).

Množství rozloženého materiálu závisí na době zdržení (hydraulickém retenčním času) a aktivitě methanogenních bakterií. Tukové složky obsažené v masokostních moučkách jsou rovněž velmi účinně odbourávány s vysokými výtěžky plynu. Masokostní moučka obsahuje poměrně vysoké koncentrace minerálních složek, sestávajících převážně z fosforečnanu vápenatého. Proto obsahuje dostatečné množství fosforu, který je důležitý pro správnou činnost acidogenních i methanogenních bakterií. Biologicky nezpracovaný fosfor a přebytečný vápník přechází do tuhého zbytku ve formě nerozpustných fosfátů a karbonátů. Bioplyn je využíván k výrobě tepla a elektrické energie. Bioplyn je také možné zpracovávat a využívat jako palivo (CNG), tedy stlačený zemní plyn a využívat jej jako palivo pro motorová vozidla (Kajan 2005).

3.2.2.3 Spalování masokostní moučky v cementárnách

Spalování kostní moučky a masa v cementárně je proces využití kostní moučky jako paliva k výrobě tepla a elektřiny. Je to jeden ze způsobů, jak snížit množství odpadu při současném využití jeho energetického potenciálu (Straka 2005). V mnoha ohledech je masokostní moučka považována za náročné palivo, ale několik jejích vlastností z ní dělá cenný zdroj energie, který může přidat hodnotu k celkové udržitelné energetické bilanci. Je zřejmé, že fyzikálně-chemické složení masokostní moučky se může výrazně lišit v závislosti na původu surovin, což souvisí především s rozmanitostí procesů výroby masa. Zdá se však, že živočišná moučka má srovnatelnou výhřevnost s konvenčními palivy. Udávaná spalná hodnota masokostní moučky se běžně pohybovala mezi 14,2 a 21,4 MJ/kg (Cascarosa et al. 2011, Kantorek et al. 2019) byla naměřena i vyšší hodnota, tj. 30 MJ/kg (Fryda et al. 2006). Podle

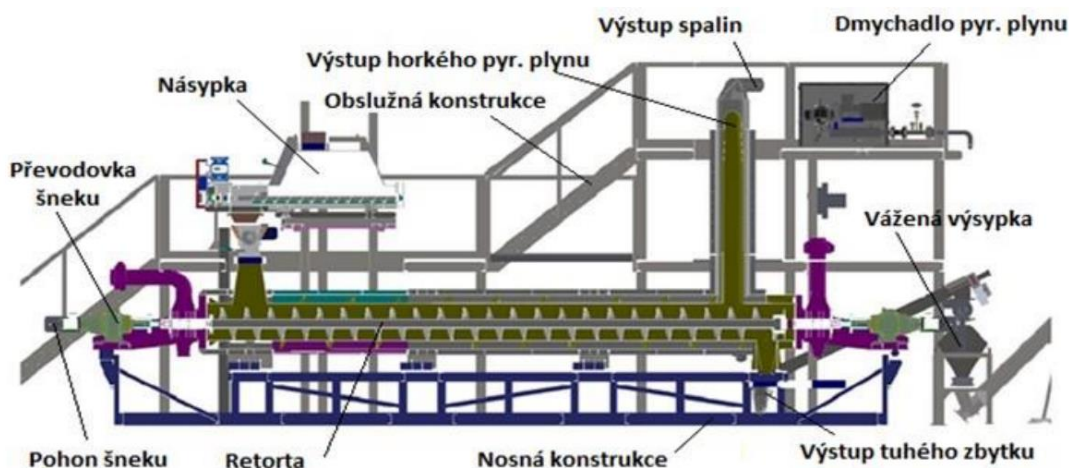
Hutla (2006) je obsah energie v masokostní moučce přibližně 2/3 energetického obsahu živočišného uhlí.

Vzhledem k tomu, že je zkrmování masokostní moučky zakázáno, masokostní moučka kategorie 1 a kategorie 2 se tedy využívá při výpalu slínku, a to jako palivo s vysokou výhřevností. Během procesu výpalu dochází k velmi vysokým teplotám a to kolem 2 000 °C. Při takto vysokých teplotách jsou všechny škodlivé látky účinně biologicky zničeny. Masokostní moučka je do pece přiváděna proudem vzduchu, kde jeho částice samovolně vzplanou (Scheuer 2003).

Popel vznikající při spalování se skládá z fosforečnanu vápenatého. Ten se může vázat na částice slínku, a tak s nimi reagovat. To ovlivňuje složení a kvalitu slínku. V praxi se tedy musí spalovat jen takové množství masokostní moučky, aby nedošlo k ovlivnění vlastností slínku a kvalita slínku byla zachována (Lieber 1974).

3.3 Pyrolýza

Slovo „pyrolýza“ je vytvořeno ze dvou starověkých řeckých slov pyro (πυρο) znamenající oheň a lýza (λύσις) znamenající oddělení, pyrolýza tedy znamená oddělení ohněm nebo teplem. Pyrolýza nebo také termolýza je v podstatě nevratný termochemický proces úpravy složitých pevných nebo kapalných chemických látek. Tento proces probíhá za zvýšených teplot v inertní nebo zcela bezkyslíkaté atmosféře. Rychlost pyrolýzy je závislá na teplotě a se stoupající teplotou se zvyšuje. Během pyrolýzy jsou molekuly vystaveny velmi vysokým teplotám, díky čemuž vznikají vysoké molekulární vibrace, při kterých dochází k rozpadu molekul na menší molekuly. Pyrolýza bývá prvním krokem i jiných procesů, jako je zplyňování a spalování, kde dochází k částečné nebo úplné oxidaci upravovaného materiálu. Procesy termochemického zpracování jsou obecně klasifikovány podle jejich ekvivalenčního poměru (ER), který je definován jako množství přidaného vzduchu vzhledem k množství vzduchu potřebného pro stechiometrické spalování (Ibrahim 2020).



Obrázek 3 Schéma pyrolyzní jednotky (zdroj: centrum ENET).

Poměr ekvivalence pro pyrolýzu je 0 ($ER = 0$), zatímco poměr ekvivalence pro Ekvivalenční poměr spalování je roven nebo větší než 1 ($ER \geq 1$) a poměr ekvivalence pro zplyňování se pohybuje mezi 0,25 a 0,50 ($ER = 0,25 - 0,50$) (Ibrahim 2020).

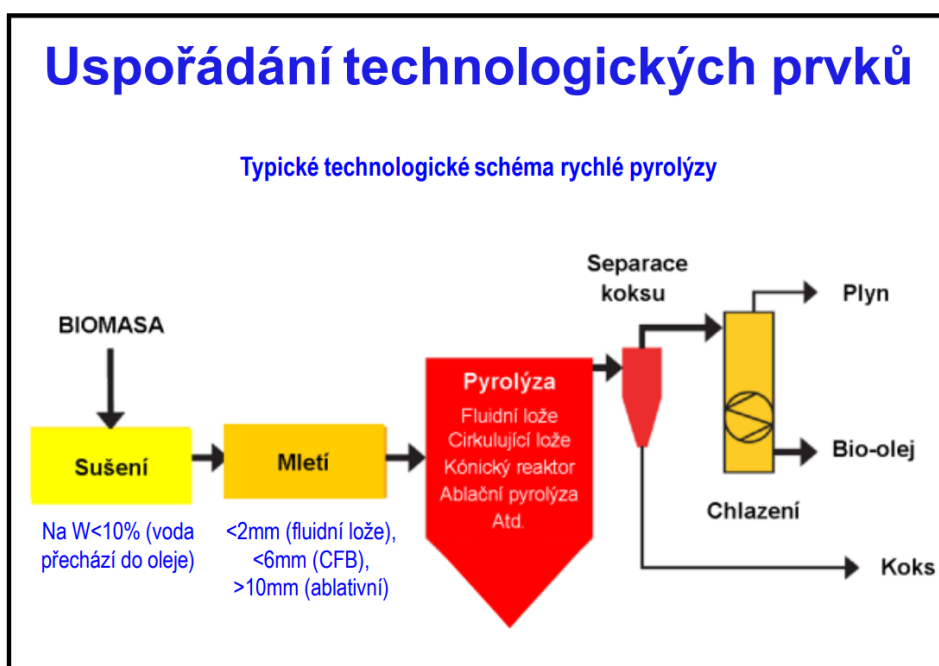
Pyrolýza je tedy proces tepelného rozkladu, při kterém se surovina s vysokou molekulovou hmotností rozloží za vzniku primárních těkavých látek. Primární tepelné rozkladné a dehydrogenační reakce jsou obecně doprovázeny sekundární polymerací a izomeračními reakcemi primárních těkavých látek. Rozsah sekundárních reakcí závisí na podmínkách pyrolýzy a také na typu použitého pyrolyzního reaktoru. Sekundární reakce jsou obecně podporovány vysokou dobou zdržení a vysokými teplotami. Protože je prakticky nemožné dosáhnout zcela bezkyslíkaté atmosféry, dochází také k malému množství oxidačních reakcí (Shafizadeh 1982).

Během procesu pyrolýzy se přírodní polymerní složky (tj. lignin, celulóza, tuky a škroby) díky působení vysokých teplot rozkládají na tři různé frakce: bioolej (kondenzované páry), biochar (pevná frakce) a nekondenzovatelné plyny (Mohan et al. 2006). V závislosti na rychlosti ohřevu a teplotě lze získat různé distribuce a výtěžky výše uvedených frakcí (Lu et al. 2009). Dříve se většina výzkumu pyrolýzy biomasy soustředila na výběr podmínek procesu s cílem maximalizovat výtěžek biooleje. Bylo to převážně díky tomu, že jde o surové kapalné biopalivo, které je možné bez úprav použít ve stacionárních aplikacích tepla a elektřiny nebo je lze dále modernizovat na biopalivo typu drop-in, které je funkčně rovnocenné ropným palivům (Bridgwater 1999). Naopak, pevná nebo zuhelnatělá frakce získaná z pyrolýzy biomasy byla často považována za odpadní produkt a následně spálena, aby poskytla potřebné teplo pro proces pyrolýzy. Nynější výzkumy však ukázaly, že uhlí z pyrolýzy lze použít také pro úpravu půdy a jejích vlastností. Tento produkt se nazývá biochar, a je možné ho využít k podstatnému zvýšení úrodnosti půdy (Novak et al. 2010; Jeffery et al. 2015).

3.3.1 Druhy pyrolýzy

Podle dosažené teploty se pyrolýza v technické praxi dělí do tří skupin: nízkoteplotní pyrolýza probíhající při teplotách do 500 °C, středněteplotní pyrolýza, ta se odehrává v rozmezí od 500 do 800 °C a vysokoteplotní pyrolýza, která probíhá při teplotách nad 800 °C (Raček et al. 2018). Při dosažení požadované rozkladové teploty, klesá stabilita vysokomolekulárních látek, které se začnou štěpit a dojde k uvolňování nízkomolekulárních látek. Jedním z dalších základních rozdělení pyrolýzy je rozdělení v závislosti na rychlosti, kterou probíhá. Pyrolýza se dá rozdělit na pyrolýzu rychlou a pomalou (Trávníček 2015).

Rychlá pyrolýza, někdy také blesková pyrolýza, je používána pro maximální produkci plynné a kapalné fáze, poskytující především tepelný užitek. Při rychlé pyrolýze dochází k mžikovému ohřevu vsázky, který se pohybuje v intervalu mezi 500 až 1000 °C za minutu a je dosahováno tlaku 0,1 MPa. Z důvodu rychlého ohřevu je nutné zpracovat materiál na malé kousky, řádově v milimetrech. Zde je zapotřebí, aby páry, které vznikají v reaktoru při rychlé pyrolýze, byly co nejrychleji zchlazeny a zkondenzovaly, aby zbytečně nedocházelo k sekundárním reakcím. Největší výtěžek z rychlé pyrolýzy tvoří bio-olej, který se pohybuje kolem 67–70 % hmoty. K rychlé pyrolýze se využívají např. fluidní reaktory s cirkulující i stacionární vrstvou nebo rotační kuželové reaktory (Trávníček 2015).



Obrázek 4 Typické technologické schéma rychlé pyrolýzy (zdroj: Ústav energetiky, VŠCHT Praha Ústav chemických procesů AV ČR, v.v.i. České asociace pro pyrolýzu a zplyňování o.s.).

Pomalá pyrolýza je známá také jako karbonizace. Procesní teplo je ve většině případů dodáváno z externího zdroje energie. Tímto externím zdrojem bývá spalování produkovaných plynů nebo částečné spalování suroviny biomasy (Laird et al. 2009). Při pomalé pyrolýze je dosahováno teplot v rozmezí od 400 do 600 °C a tlaků 0,001–0,1 MPa. Dosahujeme rychlosti ohřevu zhruba 5–7 °C za minutu, surovina v reaktoru zůstává přibližně půl hodiny. Zde je, díky delší době ohřevu, možné použít větší kusy materiálu, popřípadě heterogenní vsázku. Využívá se většinou válcových rotačních pecí, případně reaktorů s pevným ložem. Výtěžek z pomalé

pyrolýzy má přibližně stejné zastoupení všech tří fází, případně dominantní zastoupení pyrolýzního koksu, a využívá se tedy v případech, kdy je potřeba získat více pyrolýzního uhlí. Například k produkci dřevěného uhlí, to dnes nalézá využití k výrobě aktivního uhlí (aktivace vodní parou) a k výrobě peletovaného paliva. Používá se i ke grilování potravin a ohřevu kovových částí před jejich zpracováním v kovárnách (Trávníček 2015).

Tabulka 1 Rozdílné třídy pyrolýzní úpravy podle doby trvání procesu (zdroj: Raček et al. 2018).

Proces pyrolýzy	Procesní teplota [°C]	Doba procesu	Pyrolýzní produkty [%]		
			Pyrolýzní plyn	Pyrolýzní olej	Biochar
Blesková	800–1300	< 5 s	40	-	60
Rychlá	300–1200	< 20 s	15–25	50–70	10–30
Pomalá	100–1000	5 min–12 h	25–35	20–30	25–35
Torefakce	200–300	30 min–4 h	20–40	-	60–80

3.3.2 Pyrolýzní produkty

Pyrolýzou biomasy vznikají hodnotné vedlejší produkty a je tedy vysoce účinným procesem přeměny biomasy (Chen et al. 2012). Pyrolýza představuje tepelný rozklad paliva bez přítomnosti oxidačního média, jako je kyslík nebo vzduch. Díky absenci oksyličovadla se uvolněná směs plynů (CO a CO₂) nezapojí do dalších reakcí a stává se základem pro produkci energetického plynu. Materiály se při pyrolýze rozkládají na nekondenzovatelné plyny, kondenzovatelné organické kapaliny a uhlíkatou pevnou látku.

Jediným pevným produktem je pyrolýzní zbytek neboli biochar, který se skládá z 80–85 % tuhého uhlíku, 15–20 % prchavých látek a 0–2 % popela, přičemž obsah popela závisí na obsahu popelovin v daném palivu. Termín pyrolýzní tekutina se odkazuje na pyrolýzní olej, který vzniká jako konečný produkt pomalých pyrolýzních procesů. Pyrolýzní olej z biomasy je směsí tmavě hnědých až nažloutlých viskózních, kyselých produktů s různými vlastnostmi a může obsahovat nečistoty v podobě tuhých látek a vody, přičemž obsah vody závisí na vlhkosti daného paliva. Tyto produkty jsou převážně tvořeny aromatickými uhlovodíky a dehtem (Chen et al. 2011).

3.4 Biochar

Biochar je vysoce porézní pevná látka, vyrobená z různé biomasy pyrolýzou. Podmínky pyrolýzy i materiály v ní použité mohou podstatně ovlivňují vlastnosti biocharu. Pyrolýzní proces přeměňuje biomasu, jako je dřevní odpad, energetické plodiny, zbytky zemědělských odpadů, jateční zbytky, čistírenské kaly, anaerobní digestát nebo komunální odpad, na stabilní formu uhlíku, která může být použita jako půdní aditivum nebo pro trvalé ukládání uhlíku do půdy (Antal et al. 2003). Biochar má vysokou pórovitost a povrchovou plochu, což mu

umožňuje adsorbovat a uchovávat živiny, vodu a kontaminanty, čímž zlepšuje kvalitu půdy. Kromě toho je biochar zkoumán pro jeho potenciál v oblasti obnovitelné energie a jako filtr pro čištění vody (Liang et al. 2021).

3.4.1 Základní vlastnosti biocharu

Biochar je porézní uhlíkatý materiál s aromatickým jádrem. Díky přítomnosti kyslíkatých funkčních skupin, mezi které patří například: – OH, C = O, – COOH, chinony nebo laktony, vykazuje povrch biocharu hydrofobní vlastnosti. Složení biocharu je heterogenní. Mezi stabilní složky je řazen pevný uhlík, těkavé látky, minerální látky a vlhkost. Relativní podíl těchto složek určuje mimo chemické a fyzikální vlastnosti výsledného produktu také i jeho chování jako celku a možné způsoby aplikace (Verheijen et al. 2010).

3.4.1.1 Chemické vlastnosti biocharu

Každý biochar prokazuje unikátní chemické vlastnosti, zahrnující pH a koncentrace různých prvků a živin, jako je uhlík, kyslík, fosfor, draslík, vápník a další. Tyto charakteristiky jsou závislé na surovinách, ze kterých je biochar vyroben a na teplotě výroby.

Hodnota pH a elektrická vodivost

Hodnotu pH je důležité znát, zejména pokud chceme biochar zemědělsky využívat. Biomasa používaná pro výrobu biocharu obvykle nabývá hodnot pH 5 až 7,5 (Vassilev et al. 2001). Během procesu se zvyšuje obsah popele, který je zásaditý. Zvýšená hodnota pH v biocharu je tedy přímý důsledek pokračující karbonizace.

Hodnota pH v biocharech bývá v rozmezí 6–12 (Ahmad et al. 2012; Ippolito et al. 2015) Obecně platí, že biochary vyrobené z mořských řas, hnoje a zbytků plodin obsahují vyšší hladiny živin, mají vyšší pH, ale také méně stabilní uhlík ve srovnání s biochary vyráběnými z lignocelulózních zdrojů jako je například dřevo. Snížení pH biocharu může být způsobeno také přítomností negativně nabitých fenolových, karboxylových a hydroxylových skupin na jeho povrchu (Gul et al. 2015). Biochary vyrobené za vyšších teplot (>400 °C) mají pravděpodobně vyšší hodnoty pH než ty, které byly vytvořeny při nižších teplotách (<400 °C). Vysoké dávky biocharu do půdy mohou negativně ovlivnit rostliny citlivé na sůl. To je spojeno s elektrickou vodivostí, která koreluje s množstvím a povahou rozpustných solí v roztoku biocharu. Obsah popela v biocharu rovněž ovlivňuje vodivost; biochary z dřeva a papíru obvykle vykazují nižší hodnoty elektrické vodivosti ve srovnání s biochary z hnoje. Podobně jako u pH závisí elektrická vodivost na surovině a teplotě pyrolýzy, přičemž biochary vyráběné při vyšších teplotách obvykle mají vyšší měrnou vodivost (Singh et al. 2017).

Prvkové složení

Celkové složení biocharu je spíše heterogenní, najdeme zde stabilní i labilní oblasti. Jako hlavní složky jsou obecně jmenovány uhlík, minerální látky, těkavé látky a vlhkost (Antal et al. 2003). Podíl složek rozhoduje o chemických a fyzikálních vlastnostech biocharu jako celku, což potom určuje jeho vhodnou aplikaci i specifičnost pro danou lokalitu (Lehmann et al. 2010). Poměry H/C a O/C mají sklon být vyšší u biocharů vytvořených při nižších teplotách a krátkých intervalech ohřevu. Biochary, které jsou produkovány nad 350 °C, se často vyznačují

přítomností aromatických uhlovodíků s nízkou hodnotou poměru H/C. Tyto nízké poměry jsou pozorovány při laboratorní výrobě, vysokých teplotách a dlouhodobém ohřevu, což často vede ke snížení rostlinných biopolymerů uhlíku, jako je lignin, celulóza a hemi-celulóza (nad 500 °C) (Krull et al. 2009).

Tabulka 2 Elementární složení biocharů z různých rostlinných materiálů za teploty 550 °C (zdroj: Břendová et al. 2012).

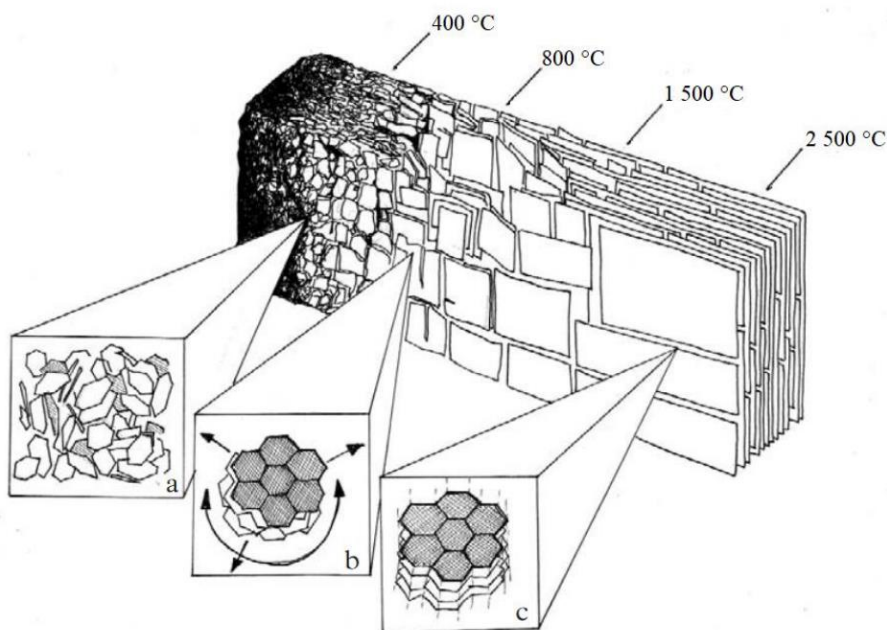
Druh biocharu	Pyrolýza (°C)	Elementární složení (%)				
		C	H	O	N	A
Dřevní směs	550	62,83	1,97	19,27	1,01	14,92
Kukuřice	550	44,19	1,56	22,73	1,79	29,73
Travní biomasa	550	52,24	1,83	17,63	1,66	23,64

Tabulka 3 Atomové poměry biocharů připravených za teploty 550 °C (zdroj: Břendová et al. 2012).

Druh biocharu	Pyrolýza (°C)	C:N	O:C	H:C
Dřevní směs	550	62,21	0,31	0,03
Kukuřice	550	24,69	0,51	0,04
Travní biomasa	550	33,28	0,32	0,03

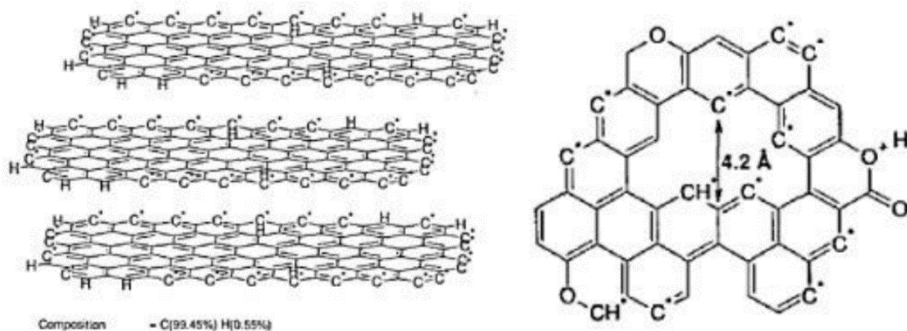
Prostorové uspořádání

Chemická struktura biocharu může být velmi variabilní, a proto je jejich chemická stabilita do značné míry ovlivněna stupněm aromaticity (viz Obr. 5). Biochar je složen z kombinace dvou hlavních strukturálních motivů: skládaných krystalických grafénových listů a náhodně uspořádaných amorfních aromatických struktur, které obvykle převažují (Jeffery et al. 2015).



Obrázek 5 Ideální vývoj struktury v závislosti na teplotě; (a) vysoký podíl aromatického uhlíku v amorfní formě, (b) náhodně uspořádané konjugované aromatické struktury, (c) vznik pravidelné krystalické 3D struktury (zdroj: Lehmann et al. 2009).

V průběhu pyrolýzy nevznikají perfektně poskládané listy šesterečných kruhů uhlíku spojených bez vodíku a kyslíku, které jsou, charakteristické pro grafit. Naopak grafit v biocharu zpravidla není významně přítomen. Struktura biocharu obsahuje více amorfního aromatického uspořádání uhlíku, které obsahuje kyslík a vodík, v některých případech i jiné atomy (Lehmann 2009). Další prvky jako vodík, kyslík, dusík, fosfor nebo síra jsou převážně přítomny v aromatických kruzích jako heteroatomy. Tyto prvky jsou považovány za zodpovědné za vysokou reaktivitu povrchu biocharu (Jeffery et al. 2015).



Obrázek 6 Předpokládaná struktura biocharu; vlevo je znázorněn model mikrokrystalické grafitové struktury a vpravo aromatická struktura obsahující kyslík a volné radikály uhlíku (zdroj: Lehmann et al. 2009).

3.4.1.2 Fyzikální vlastnosti biocharu

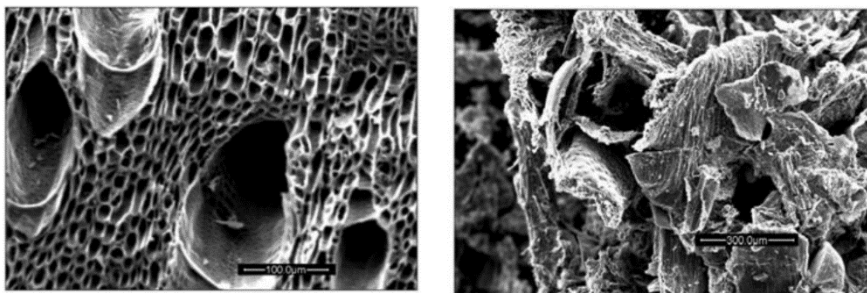
Fyzikální změny nastávají jako důsledek rozpadu vláknité struktury vstupní biomasy (Weber & Quicker 2018). Fyzikální vlastnosti závisí na výchozí biomase, ale také na způsobu výroby biocharu a podmínkách jeho zpracování (Downie et al. 2009).

Povrch a pórovitost

Jedním z důležitých faktorů pro posuzování chování biocharu v půdě je velikost pórů. Ty se dělí podle velikosti na mikro póry (menší než 2 nm), mezo póry (2–50 nm) a makro póry (větší než 50 nm). Mikro póry zajišťují velikost specifického povrchu biocharu a jsou tak zodpovědné za adsorpční schopnosti malých molekul, jako jsou například plyny. Mikropóry jsou často přítomny v uhlících s vysokým stupněm aktivace a poskytují velmi velkou povrchovou plochu pro adsorpci. Makro póry (viz Obr. 7) jsou důležité pro rychlou difúzi vody nebo také pro růst kořenů a fytoedafon. Celková pórovitost biocharu je často vyjádřena procentem objemu materiálu, který je tvořen póry. Biochar, který má větší pórovitost má také obvykle vyšší adsorpční kapacitu. Pórovitost biocharu podléhá změnám v důsledku uvolňování těkavých plynů během procesu karbonizace, což má za následek také modifikaci celkové specifické plochy biomasy. Pórovitost a velikost pórů jsou důležité parametry při výběru biocharu pro konkrétní aplikace, jako je čištění vody, odstranění pachů nebo čištění vzduchu (Downie et al. 2009).

Specifický povrch biocharu je 150–1200 m² /g (Gembalová et al. 2016). Výrazná povrchová plocha je spojena s různými charakteristikami, jako je například kapacita výměny kationtů nebo schopnost zadržování vody, což z ní činí klíčový prvek pro mnohé aplikace biocharu. Stupeň hydrofilnosti či hydrofobnosti biocharů, je ovlivněn poklesem funkčních skupin, který mění afinitu materiálu. Jako další z hlavních procesů pyrolýzy, který ovlivňuje stupeň hydrofilnosti nebo hydrofobnosti biocharů je zvýšení poréznosti, což ovlivňuje množství vody, které může být sorbováno, buď na povrchu biocharu nebo uvnitř jeho struktury. Hydrofobie je výsledkem přítomnosti alifatických povrchových funkčních skupin, které jsou eliminovány při teplotách okolo 400 až 500 °C. Hydrofilita neošetřené biomasy představuje jeden z důvodů, proč vnější skladování může vést k strukturálnímu a mikrobiálnímu rozkladu (Weber & Quicker 2018).

Biochary získané z pyrolýzy jsou charakterizovány vysokou specifickou plochou, naopak biochary z karbonizace mají tuto plochu velmi omezenou (Weber & Quicker 2018). Schopnost materiálu zadržovat vodu závisí mimo jiné na poréznosti a propojení pórů. Očekává se, že biochary vytvořené při vysokých teplotách (nad 900 °C) budou mít strukturu s vyšším obsahem vody. I přesto, že nízkoteplotní biochary mohou mít porézní strukturu, může být přístup k nim omezen kvůli menším pórům, nižší propojenosti a zbylým dehtovým složkám, které je mohou zacpat (Weber & Quicker 2018).



Obrázek 7 Porovnání snímků z elektronového rastrovacího mikroskopu (SEM) zobrazujících makropóry získané pomalou pyrolýzou; nalevo vstupní surovinou dřeva, napravo drůbeží hnůj (zdroj: Jouhara et al. 2018).

Objemová hmotnost

V rámci studia vlastností biocharu můžeme rozlišovat dva typy hustoty: hustotu částic a objemovou či zdánlivou hustotu. Hustota částic odkazuje na molekulární úroveň, spojenou se strukturou uhlíku. Objemová hmotnost charakterizuje konzistenci materiálu, zohledňující dutiny a póry. Zvyšování hustoty částic je často spojeno s klesající objemovou hustotou, avšak během pyrolýzy dochází k vývoji poréznosti. Toto pravidlo však není absolutní, protože poréznost roste s objemovou hustotou při teplotách pyrolýzy do 800 °C. Při překročení teploty 900 °C se však objemová hustota zvyšuje a poréznost snižuje v důsledku slinování. Hustota částic poskytuje hrubý odhad maximální použitelné teploty biocharu, bez ohledu na jeho předchozí zpracování (Downie et al. 2009).

3.4.2 Složení biocharu

Biochary získané pyrolýzou při vysokých teplotách za omezeného přístupu kyslíku mohou obsahovat různé kontaminanty, včetně polycyklických aromatických uhlovodíků, potenciálně toxických prvků, dioxinů a těkavých organických sloučenin. Kromě toho mohou vznikat i nové kontaminanty, jako jsou například kyanidy kovů nebo radikály. Tyto látky mají potenciál vyvolat různé negativní účinky, jako je fytotoxicita, cytotoxicita a neurotoxicita. Proto je důležité vyvinout účinné strategie pro kontrolu a eliminaci těchto kontaminantů s cílem udržitelného využití biocharu (Han et al. 2022).

3.4.3 Využití biocharu

Vzhledem k vlastnostem biocharu, je jedním z jeho hlavních účelů použití aplikace do půdy. Aplikace biocharu do půdy může velmi ovlivnit její pórovitost i úrodnost (Lechmann et al. 2009). V neposlední řadě jsou mnohé zájmy o biochar dány jeho schopnostmi sorbovat nežádoucí kontaminanty organického i anorganického původu, mezi ně patří pesticidy nebo těžké kovy. Jednou z dalších možností využití biocharu je jeho schopnost omezit mobilitu rizikových prvků (Gomez et al. 2011).

3.4.4 Certifikace biocharu

Podle kvality jsou biochary certifikovány do 2 skupin: základní a prémium. Pro udělení Evropského certifikátu pro biochar je třeba splnit určitá kritéria, která zahrnují typ použité biomasy, způsob produkce, jeho vlastnosti a způsob aplikace (EBC 2012).

Pro výrobu biocharu je nutné využít pouze organický odpad, který byl očištěn od nežádoucích anorganických složek, jako jsou plastové části, gumové materiály či rozpouštědla. Dále je doporučeno, aby tento materiál nebyl dopravován na vzdálenost přesahující 80 kilometrů. Výjimkou jsou situace, kdy se jedná o pyrolýzní přísady nebo speciální druhy biomasy, které jsou určeny pro testování procesů. Je rovněž důležité, aby byla zachována veškerá dokumentace týkající se použitých materiálů pro další referenční účely a sledování procesů.

V certifikaci jsou uvedeny mezní hodnoty pro škodlivé látky, a to:

Tabulka 2 Mezní hodnoty pro organické kontaminanty, vztaheny na 1 kg sušiny biocharu (zdroj: EBC 2012).

	základní biochar	prémiový biochar
polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU)¹⁾	< 12 mg/kg	< 4 mg/kg
Polychlorované bifenyly (PCB)²⁾	< 0,2 mg/kg	< 0,2 mg/kg
Dioxiny a furany (PCDD/PCDF)²⁾	< 20 ng/kg I-TEQ	< 20 ng/kg I-TEQ

¹⁾ Součet 16 prioritních znečišťujících látek podle EPA (seznam je uveden dále)

²⁾ Celkový součet kongenerů

Tabulka 3 Mezní hodnoty pro těžké kovy, vztaheny na 1 kg sušiny biocharu (zdroj: EBC 2012).

	základní biochar	prémiový biochar
olovo	< 150 mg/kg	< 120 mg/kg
kadmium	< 1,5 mg/kg	< 1 mg/kg
měď	< 100 mg/kg	< 100 mg/kg
nikl	< 50 mg/kg	< 30 mg/kg
rtuť	< 1 mg/kg	< 1 mg/kg
zinek	< 400 mg/kg	< 400 mg/kg
chrom	< 90 mg/kg	< 80 mg/kg

Téměř veškeré množství těžkých kovů obsažených ve vstupním materiálu zůstane i v produktu (EBC 2012).

Množství látek v konečném produktu je převážně ovlivněno procesem pyrolýzy spíše než samotným vstupním materiálem. Za použití moderních technologií bývá obsah těchto látek obvykle velmi nízký (EBC 2012).

Han et al. (2022) také zdůrazňují význam konstrukce pyrolýzní jednotky (schéma pyrolýzní jednotky viz Obr. 3), která plně odděluje pyrolýzní kapaliny a pevné látky po pyrolýzní zóně. Optimalizace parametrů pyrolýzy přispívá k tomu, že organické nečistoty v pyrolýzních kapalinách nekondenzují na biocharu. Navíc postprodukční úpravy, jako je tepelné zpracování nebo přirozené a umělé stárnutí, mohou pomoci odstraňovat a rozkládat organické kontaminanty.

3.5 Biochar z masokostní moučky – bonechar

Bonechar představuje produkt vzniklý tepelným rozkladem kostí a dalších zbytků těl živočichů bez přítomnosti kyslíku, tzv. pyrolýzou. Oproti biocharu vyrobeného z rostlinné biomasy obsahuje bonechar obvykle vyšší množství fosforu (přibližné hodnoty v sušině: 15–30 % C, 2–4 % N, 12–16 % P) (Piccola et al. 2021; Tlustoš et al. 2021). Je to adsorbent kombinující uhlík a fosforečnan vápenatý v podobě hydroxyapatitu. Tuto moučku lze vytvořit kalcinací kostí za nízkého obsahu kyslíku (částečná kalcinace) nebo pyrolýzou, kdy je v průběhu tepelného zpracování vyloučen kyslík (Rojas-Mayorga et al. 2013). Výzkum od Siebers & Leinweber (2013) se zabývá substitucí minerálních fosforečnanových hnojiv právě za masokostní moučku. Problematickým aspektem minerálních hnojiv může být kontaminace půdy kadmíem. Jedním z možných řešení této problematiky by mohlo být využití biocharu z masokostní moučky, jehož aplikací se může zvyšovat obsah fosforu, vápníku a hořčíku v půdě.

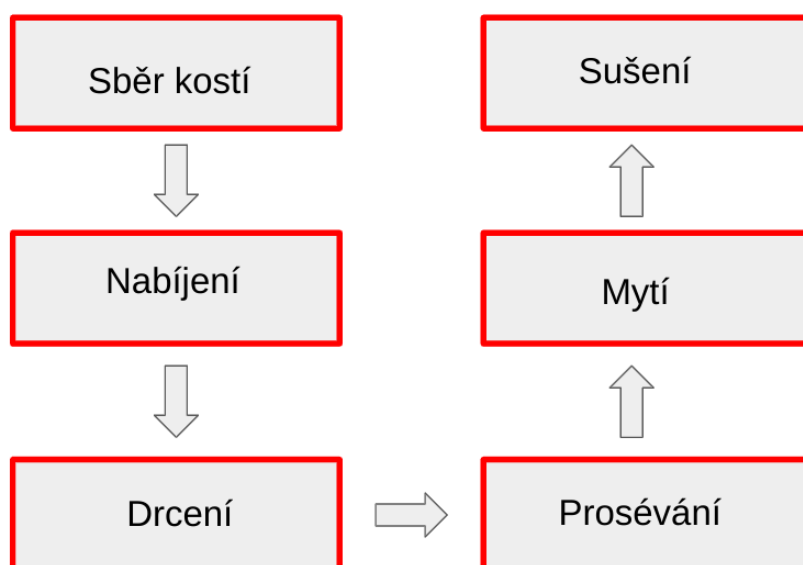
3.5.1 Vlastnosti bonecharu

Na základě použitých surovin a podmínkách výroby se mění také vzhled bonecharu. Obecně lze říci, že má tmavou barvu, od hnědé až po černou, podobně jako ostatní druhy biocharu. Barva se mění v závislosti na teplotě pyrolýzy a obsahu organických látek. Vlivem degradace kolagenu a bílkovin na organické molekuly se může změnit také na šedou nebo až bílou barvu (Leinweber 2019). Struktura bonecharu je porézní, s velkým množstvím makro i mikro pórů. Jeho pórovitost ovlivňuje schopnost bonecharu zadržovat vodu a látky v půdě. Díky specifickému povrchu je schopen adsorpce a desorpce iontů, což přispívá ke zlepšení úrodnosti půdy (Shadid 2020). Textura se mění v závislosti na podmínkách výroby, může být od jemné až po hrubou. Velikost částic je různá a závisí na procesu výroby. Bonechary se vyskytují ve formě prášku nebo granulí. Proces výroby lze upravit tak, aby výsledný produkt byl vhodný pro konkrétní následnou aplikaci.

3.5.2 Výroba bonecharu

Bonechar je granulovaná látka složená převážně z hydroxyapatitu, který se vyrábí pyrolýzou zvířecích kostí a odpadního masa je tedy speciálním druhem biocharu (Mei et al. 2022). Existují také různé alternativy výroby bonecharu. Jedna z těchto alternativ byla popsána ve studii od Ramanan (2022) (viz Obr. 8).

Dle studie od Ramanan (2022) byly surové kosti v nabíjecí fázi zhuženy kladivem a následně byl na povrch umístěn hořlavý materiál. Na zuhelnatění 143,5 kg kostí bylo použito 2 kg dřevěného uhlí a 500 ml petroleje. Během procesu bylo ztraceno cca 40 % hmotnosti surových kostí. Následovalo drcení a prosévání, které probíhalo ve dvou strojích. Přibližně 20 % surového zuhelnatělého kostního materiálu bylo pomocí prosévání odděleno ve formě jemného prachu. Prosetý materiál se následně promývá vodou. Bonechar se k dokončení výrobního procesu suší, zde konkrétně byl vysušen pomocí slunečního světla.



Obrázek 8 Schéma produkce bonecharu (upraveno podle zdroj: Ramanan 2022).

3.5.3 Využití bonecharu

Díky své silné adsorpci se bonechar používá jako imobilizační činidlo na ionty těžkých kovů. Tato imobilizace zahrnuje různé mechanismy včetně iontové výměny, elektrostatické přitažlivosti a povrchové komplexace (Siebers et al. 2014). Díky své zásaditosti může být také používán pro zvýšení hodnoty pH v půdě, což vede k vytvoření příznivých podmínek pro imobilizaci některých kationtů těžkých kovů. Bonechar je velice bohatý na fosfor, který je důležitou živinou zajišťující růst plodin.

Je to potenciální čisté a obnovitelné fosforečné hnojivo, které má schopnost imobilizovat Cd. Ve studii Siebers et al. (2014) byly hodnoceny, jeho účinky na růst a zásobování fosforem, různé plodiny (salát, pšenice, brambory). Dále byla ve studii sledována jeho schopnost snižovat příjem Cd z půd, které jsou mírně kontaminované Cd a mají nedostatek P. Jeho účinky byly také sledovány u půd kontaminovaných Cd s dostatečnou zásobou P. Celková koncentrace Cd v celé rostlině se přidáním hnojiva snížila ve všech plodinách v půdě s mírnou kontaminací Cd i při velmi nízkých hodnotách úrovně aplikace kostního uhlí. Podobné výsledky byly získány i v půdách s vysokou kontaminací Cd. Tato studie tedy prokázala potenciál bonecharu jako fosforečného hnojiva, které dokáže účinně snížit kontaminaci Cd.

V další studii (Becerra-Pérez et al. 2021) byla sledována separace ethanolu, propanolu a butanolu z vodných roztoků, pomocí adsorpce na bonechar. Adsorpční kinetika a

termodynamické parametry této separační metody byly studovány za různých podmínek pH a teploty. Výsledky ukázaly, že maximální adsorpční kapacity těchto bioalkoholů byly získány při hodnotě pH 6 a teplotě 20 °C. Byla identifikována exotermická separace, která může být spojena hlavně s hydrofobními interakcemi mezi povrchem bonecharu a bioalkoholy. Byly také provedeny studie binární adsorpce za použití směsí těchto bioalkoholů. Antagonistická adsorpce byla pozorována u všech bioalkoholů, kde byla separace ethanolu a propanolu významně ovlivněna butanolem. Becerra-Peréz et al. (2021) dospěli k závěru, že bonechar by mohl být zajímavým adsorbentem pro udržitelné oddělování a získávání bioalkoholů z fermentačních bujónů, které jsou ve skutečnosti považovány za nově vznikající kapalná biopaliva. Adsorpce je alternativou k regeneraci kapalných biopaliv získaných různými způsoby zpracování. Tato separační metoda je energeticky úsporná a šetrná k životnímu prostředí, při které lze adsorbenty použité jako separační médium regenerovat a znovu použít, čímž se snižují náklady na čištění a jejich dopad na životní prostředí.

Ve studii (Mei et al. 2022) bylo potvrzeno, že biochar může sloužit jako potenciálně nákladově efektivní činidlo pro imobilizaci těžkých kovů pro zemědělskou půdu kontaminovanou těžkými kovy. Bonechar se stále ve velké míře používá při rafinaci cukru jako adsorbent k jeho odbarvení. Po použití se regeneruje promýváním a kalcinací, takže může projít mnoha provozními cykly, než jeho aktivita poklesne na velmi nízkou úroveň, kdy je pro odbarvování nevyužitelný (Benett et al. 1967).

Choy et al. (2004) uvádí, že proces odbarvování odstraňuje více než barvu, protože barviva interagují s barevnými prekurzory, koloidním materiálem, organickými necukry a anorganickými složkami tvořícími popel. Hodnota kostního uhlí jako pomocného prostředku při rafinaci cukru tedy spočívá v jeho jednoduchém působení při odstraňování jak barviv, tak anorganických složek tvořících popel.

Podle Sawangjang (2021) závisí kapacita adsorpce fluoridu více na specifickém povrchu bonechar než na obsahu hydroxiapatitu. Adsorpční kapacita byla zkoumána na třech typech bonecharu, včetně kravského bonecharu, bonecharu z prasečích a kuřecích kostí. Při optimálních podmínkách, teplotě a času, zuhelnatění měl nejvyšší obsah hydroxyapatitu bonechar z prasečích kostí (0,928 g-HAP/g-BC), zatímco nejvyšší specifický povrch měl bonechar z kuřecích kostí (103,11 m²/g-BC). Maximální hodnoty adsorpční kapacity fluoridu dosáhl bonechar při hodnotách pH 6 v roztoku. Nejvyšší desorpce fluoridu nastala při hodnotách pH vyšších než 11 roztoku.

3.5.4 Živiny obsažené v bonecharu

Pro všechny rostliny je získávání živin z půdy klíčové pro jejich růst. Aby byl vývoj a růst rostlin efektivní, přijímají živiny v anorganické formě (Naeem et al. 2017). Esenciální živiny jsou pro rostliny klíčové a jsou přímo součástí metabolismu rostlin. Mezi tyto základní živiny patří uhlík (C), vodík (H) a kyslík (O), které jsou základními stavebními bloky sacharidů, jako jsou cukry a škroby, a zároveň slouží jako zdroj energie pro rostliny. Rostliny získávají tyto prvky z vzduchu (CO₂) a vody (H₂O). Makroživiny jsou další důležitou skupinou esenciálních živin, které jsou potřebné větším množstvím než mikroživiny. Zahrnují dusík (N), fosfor (P), draslík (K), síru (S), vápník (Ca) a hořčík (Mg). Třetí skupinou jsou mikroživiny,

které jsou potřebné v menších množstvích a zahrnují prvky jako Zn, Fe, Mn, Cu, B, Mo, Cl, Co a Ni (Naeem et al. 2017).

Tabulka 4 Obsah živin v biocharu připraveném za různých teplot z dřevní biomasy (zdroj: Thustoš et al. 2021).

		300 °C	350 °C	400 °C	450 °C	500 °C
Ca	mg/kg	2090±14	2752±91	3460±118	3907±348	3843±137
Cu	mg/kg	1.86±0.29	2.14±0.04	3.11±0.54	3.09±0.21	2.87±0.14
Fe	mg/kg	35.1±0.0	45.2±10.3	66.5±3.9	63.0±5.6	64.2±10.4
K	mg/kg	828±4	1171±9	1424±51	1607±104	1635±15
Mg	mg/kg	351±3	473±14	558±12	649±54	629±13
Mn	mg/kg	44.8±8.2	104±3.4	152±10.9	135±1.4	181.2±3.5
Na	mg/kg	24.2±0.6	30.3±0.2	39.8±0.7	44.7±2.5	44.5±0.3
P	mg/kg	127±3	168±11	203±6	230±17	224±14
S	mg/kg	50.1±2.6	64.0±0.7	68.6±0.4	68.9±4.9	64.6±0.8
Zn	mg/kg	18.6±1.0	24.8±1.0	28.8±0.1	33.8±3.7	31.4±2.4
N	%	0.100±0.01	0.139±0.05	0.140±0.01	0.146±0.002	0.144±0.0
C	%	68.3±0.1	73.5±0.2	76.0±0.3	79.6±0.3	83.8±0.0

3.5.5 Dusík

Dusík je nejrozšířenějším prvkem v přírodě, vyskytuje se v litosféře, atmosféře i hydrosféře. Rostliny přijímají dusík ve formě dusičnanových (NO_3^-) iontů nebo amonných (NH_4^+) iontů v závislosti na vlastnostech půdy, jako je například pH. Zavisí také na druhu rostliny. Dusík je velice mobilní prvek, který je snadno rozpustný ve vodě. Je obvykle přijímán rostlinami v nitrátových formách. Většina N se nachází v organických vazbách a je pomocí mineralizace přeměněna na NO_3^- a NH_4^+ . Mineralizace je definována jako produkce amonných a následně nitrátových iontů z půdní organické hmoty (Kendall et al. 1999).

Intenzita mineralizace organických forem N na NO_3^- a NH_4^+ v substrátu určuje rychlost jejich příjmu. Translokace dusíku probíhá v rostlinách převážně ve formě dusičnanů a aminokyselin xylémem od kořenů směrem k horním částem rostliny (Kirkby 2001).

Koncentrace rozpuštěných dusíkatých látek v půdě, zejména dusičnanů, může podléhat rychlým změnám vlivem různých procesů. To může zahrnovat aktivní příjem dusíku kořeny rostlin a mikroorganismy, vyluhování nebo také denitrifikaci. V anaerobních podmínkách, jako jsou například zaplavené půdy, bývá obvykle vyšší koncentrace amoniaku, zatímco v aerobních podmínkách je obvykle nižší díky rychlé nitrifikaci amoniaku. Rostliny s dostatečným zásobením dusíkem typicky obsahují mezi 1 až 5 % dusíku (Karthika et al. 2018). Dusík je pro rostliny klíčovým prvkem, neboť je součástí mnoha důležitých sloučenin, zejména proteinů, aminokyselin, nukleových kyselin a chlorofylu. Existuje několik zdrojů dusíku pro rostliny, jako je biologická fixace dusíku z atmosféry a dostupnost dusíku ve formě organických i anorganických hnojiv. Dostatečná zásoba dusíku v půdě je nezbytná pro klíčové rostlinné

procesy, včetně fotosyntézy. Nedostatek dusíku by mohl mít za následek omezený růst a chlorózu listů rostlin (Naeem et al. 2017).

3.5.6 Fosfor

Fosfor je základním prvkem v živých organismech a hraje zásadní roli v životních aktivitách. Je nezbytný pro růst rostlin a podílí se také na fotosyntéze v rostlinných bioprocesech, využití cukru a škrobu a procesu přenosu energie (Wu 2019). Ve vlastní přírodě je fosfor uvolňován skrze procesy zvětrávání a rozpouštění hornin a minerálů s velmi nízkou rozpustností. Sloučeniny fosforu jsou pro rostliny dostupné pouze v anorganické formě jako HPO_4^{2-} nebo H_2PO_4^- (Schachtman et al. 1998).

Fosfor je významným prvkem ovlivňujícím růst rostlin. Přibližně 0,2 % hmotnosti sušiny rostliny tvoří fosfor. Je součástí klíčových molekul, jako jsou nukleové kyseliny, fosfolipidy a ATP, a proto rostliny nemohou růst bez spolehlivého přísunu této živiny. Jak rostliny přijímají půdní fosfor je vyobrazeno na Obrázku č. 10. Protože v půdním roztoku je fosforu velmi málo (jen několik desetin mg.l^{-1}), je důležité, aby se po odčerpání fosforu z roztoku rostlinami tento doplňoval dostatečně rychle z pevné fáze z chemických anorganických sloučenin, především vápenatých, ale i z organických sloučenin (Ryant 2003). Podílí se také na řízení klíčových enzymatických reakcí a na regulaci metabolických drah. Rostliny jsou schopné přijímat fosfor pouze z půdního roztoku převážně ve formě dihydrogen a hydrogen fosforečnanů (Sachtman 1998). Půda není schopna uvolnit dostatek půdního fosforu dostupného pro rostliny (Zwetsloot et al. 2016, Siebers et al. 2013), Proto je nutné dodávat fosfor do půdy ve formě organického nebo minerálního fosforečného hnojiva, za účelem zvýšení koncentrace dostupných fosfátů. Současné zemědělství využívá fosforečná hnojiva zpracovaná převážně z těžených fosfátů, které patří mezi neobnovitelné zdroje a jsou strategickou surovinou (Gilbert 2009).

Z tohoto důvodu je zapotřebí alternativních obnovitelných zdrojů fosforu, které neobsahují kontaminující látky, za účelem splnění požadavků na udržitelnou produkci potravin. Jedním z takových zdrojů je i bonechar, který obsahuje cca 10–15 % P a neobsahuje Cd (Warren et al. 2009).

Forma, ve které se fosfor vyskytuje v roztoku, se mění podle hodnoty pH. Intenzita příjmu fosforu je podle Ryant (2003) závislá také na obsahu kyslíku v živném prostředí, světle, teplotě (optimum při 20 °C), poměru H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} a na přítomnosti Ca^{2+} , NO_3^- a BO_3^{3-} . Příjem fosforu z půdy inhibují OH^- ionty. Naopak pozitivní vliv na příjem, transport a kumulaci fosforu v zrnu obilnin má dostatečný přísun hořčíku (Ryant 2003).

4 Materiál a metodika

4.1 Zemina a aplikovaná hnojiva

Pro experiment byly vybrány půdy kambizem modální (Žamberk, Česká republika) a půdy fluvizem modální (Cítov, Česká republika). Kambizem je méně úrodná půda často nacházející se v lesních oblastech s dobrou zrnitostí a hlubokou strukturou, zatímco fluvizem je půda vytvořená erozí a sedimentací poblíž toků a řek, typicky bohatá na organické látky. Kambizem obvykle má kyselé až slabě kyselé pH hodnoty, zatímco fluvizem má tendenci mít mírně zásaditá až neutrální pH. U kyselé půdy Žamberk bylo naměřeno pH 5,2. Naměřená hodnota pH u půdy Cítov byla mírně zásaditá (7,2). Vzorky byly odebrány z horizontu pluhu (0–20 cm), vysušeny na vzduchu a před použitím prošly přes 10 mm ocelové síto. Každý květináč obsahoval cca 950 g půdy.

Tabulka 5 Přehled uvedených variant

Č. varianty	1.	2.	3.	4.
Varianta	Kontrola	TSP	RP	BC-500
Ošetření	Nehnojené	Trojité superfosfát	Mletý fosfát	Bonechar
Materiál (g/nádoba)	/	1,42	3,50	2,38
N (mg/nádoba)	/	47,5	47,5	47,5
K (mg/nádoba)	/	17,3	17,3	38,1
P (mg/nádoba)	/	293,21	293,21	293,21

Tabulka 6 Vlastnosti použitého bonecharu

pH	Popel (%)	C (%)	H (%)	H/C	N (%)	P (%)	K (%)	Mg (%)	Ca (%)
10,4 ±0,04	70,4 ±0,30	19,9 ±0,1	1,40 ±0,04	0,84 ±0,02	3,5 ±0,03	12,35 ±0,85	1,60 ±0,27	0,54 ±0,04	16,0 ±1,00

4.2 Charakteristika nádobového pokusu

Nádobový experiment trval od 28.04.2023 do 17.07.2023 pro půdu Žamberk a od 28.04.2023 do 31.07.2023 pro půdu Cítov. Jako pokusná rostlina byl vybrán ječmen jarní, který byl pěstován v plastových nádobách o objemu 1 litru, které byly umístěné ve venkovní precipitační vegetační hale s řízenou teplotou. Na každém typu půdy byly založeny varianty: nehnojené, hnojené minerálním hnojivem (TSP a RP) a s přidavkem bonecharu. Masokostní moučka byla před pyrolýzou protlačena přes 2 mm nerezové síto. Bonechar byl z MKM získán pyrolýzou při 500 °C. Před přenesením do květináčů byl důkladně promíchán s půdou. Aplikovaná dávka bonecharu byla 0,25 % hm. Všechny květináče kromě kontroly byly před setím hnojeny N v dávce 50 mg N na kg půdy (vodný roztok NH_4NO_3). Vodný roztok KCl byl aplikován do květináčů s TSP a RP rychlostí K vypočtenou na základě jeho dostupného obsahu v BC-500. Každá kombinace byla provedena v šesti opakováních, aby se minimalizovala možná zkreslení a výsledky měly dostatečnou vypovídající hodnotu. Půdní vzorky byly sušeny na vzduchu a před použitím prosety přes 10 mm síto.

Výsev byl proveden dne 28. dubna 2023. Do každého květináče bylo zaseto 10 neošetřených semen ječmene jarního. Po vyklíčení, když se na každé rostlině objevil třetí list, bylo provedeno prořezávání tak, aby v každé nádobě zůstalo 5 zdravých rostlin ječmene. Pozice květináčů byly náhodně rozmístěny jednou týdně. Všechny nádoby byly pravidelně zalévány deionizovanou vodou.

Sklizeň proběhla v červenci 2023. Nadzemní biomasa rostlin ječmene byla sklizena v plné zralosti 94. den po setí pro Žamberk, 108. den po setí pro půdu Cítov. Během sklizně byly také odebrány vzorky půdy. Rostliny i vzorky půdy byly řádně usušeny (vzorky biomasy byly sušeny při 60 °C po dobu 14 dnů) do konstantní hmotnosti a následně zváženy. Z rostlin bylo odděleno zrno. Výtěžek suché biomasy byl vypočten v gramech na nádobu a použit pro statistickou analýzu. Obsah živin byl stanoven zvlášť v zrně a ve slámě. Z půdních vzorků bylo stanoveno pH a koncentrace dostupných živin. Hlavním cílem experimentu bylo porovnání efektivity minerálního hnojiva a bonecharu a jejich vliv na růst ječmene jarního.

4.3 Zpracování vzorků

4.3.1 Vzorky půdy

4.3.1.1 Hodnota pH

Hodnota pH půd byla měřena smícháním vzorků s 0,01 mol/l roztoku CaCl_2 v poměru 1:5 (váha/objem). Měření pH probíhalo pomocí pH metru řady Sentron SI po protřepání směsi v horizontální třepačce po dobu 2 hodin při 180 kyvech za minutu a následném usazení po dobu 1 hodiny.

4.3.1.2 Půdní živiny

Dostupné obsahy půdních živin byly stanoveny v supernatantu extrakcí po dobu 16 h v 0,5 mol/l NaHCO_3 (1:20 w/v) a následnou centrifugací. Do 125 ml Erlenmeyerovy baňky bylo naváženo 2,5 g vzorku půdy, který byl vysušený vzduchem a rozemletý tak, aby prošel 2 mm

sítem. K vzorku bylo přidáno 50 ml extrakčního roztoku NaHCO_3 o koncentraci 0,5 mol/l, tento proces byl proveden při pokojové teplotě. Následovalo třepání po dobu 30 minut na třepače s vratným pohybem při 120 úderech za minutu. Následně byla provedena centrifugace. Poté byl extrakt filtrován do čistých vzorkovnic pomocí středně retenčního filtračního papíru (VWR 454). Pro stanovení bylo použito ICP-OES.

4.3.2 Vzorky biomasy

4.3.2.1 Stanovení C, N, H, S elementární analýzou

Pro stanovení množství neminerálních hlavních prvků, jako je uhlík, dusík, vodík a síra, byl použit analyzátor prvků Vario Macro (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Německo).

4.3.2.2 Stanovení živin mikrovlnným rozkladem

Vzorky byly rozemlety a následně rozloženy koncentrovanou (65 % obj.) HNO_3 (Analytika) a (30 % obj.) H_2O_2 (Analytika) v mikrovlnném digesčním systému Ethos 1 (MLS, Leutkirch, Německo). Vzorky se připravovaly následovně: do zkumavky se navázilo $0,4 \pm 0,2$ g usušené biomasy. Přesná hodnota, stejně jako číslo vzorku a pořadové číslo zkumavky byla zaznamenána. Kromě všech vzorků biomasy byly také začleněny dva kontrolní prázdné vzorky a jeden kontrolní vzorek s referenčním materiálem (1513a, Wheat flour), u něhož jsou předem známy výsledné hodnoty a lze tak posoudit přesnost stanovení u ostatních vzorků. Do každé zkumavky bylo nejprve přidáno 8,0 ml kyseliny dusičné, poté 2,0 ml peroxidu vodíku. Zkumavky byly uzavřeny speciálním víčkem, dány do keramického pouzdra a následně umístěny na příslušné místo stojanu v mikrovlnné troubě. Vzorky se ohřívaly celkově 45 min při různých teplotách a časových intervalech, nejprve 10 min při 110 °C poté 15 min při 160 °C a nakonec 25 min při 180 °C. Během rozkladu dochází k odstranění organické matrice vzorku (oxidací organické hmoty) a k převedení analytů do (vodného) roztoku. Jedná se o tzv. rozklad na mokré cestě za sníženého tlaku. Po skončení mikrovlnného rozkladu byly vzorky doplněny demineralizovanou vodou do objemu 50 ml.

Tím byly vzorky připraveny pro analýzu obsahu jednotlivých živin, ta byla provedena metodou emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES; Agilent 720, Agilent Technologies Inc., Santa Clara, CA).

4.4 Statistické metody

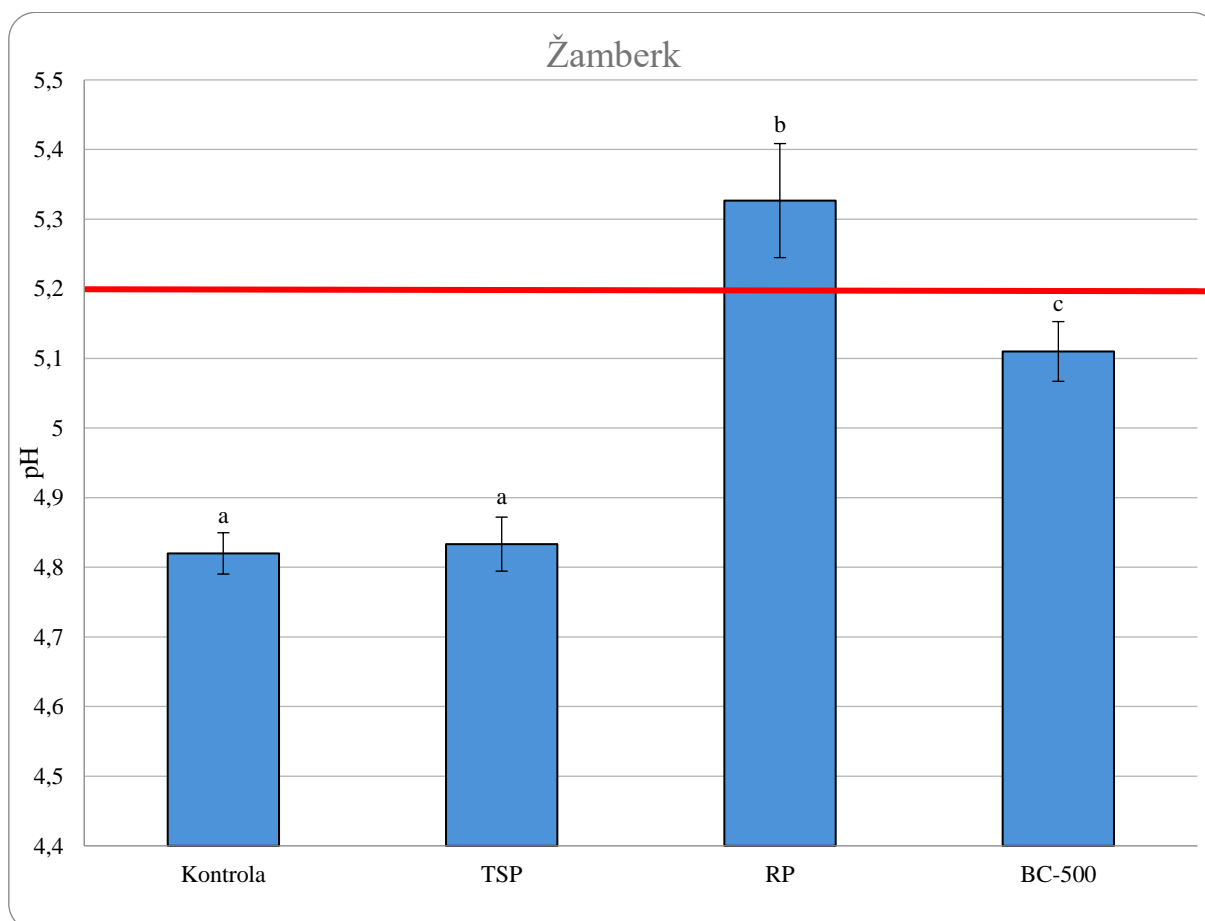
Ke zpracování a vyhodnocení výsledků byla použita kombinace softwaru pro statistickou analýzu Microsoft Excel 2021 a Statistica 12 (StatSoft, Inc. 2013). V programech byl ze získaných dat vypočten průměr a směrodatná odchylka a následně byla provedena jednosměrná analýza rozptylu s následným Tukeyovým post – hoc testem. Hladina významnosti byla určena na $\alpha = 0,05$. Statisticky významné rozdíly jsou zaznamenány pomocí písmen ve vygenerovaných grafech.

5 Výsledky

V tomto oddíle jsou prezentovány výsledky, kterých bylo v diplomové práci dosaženo. Varianty jsou pojmenovány podle označení určeného v metodice (viz Tabulka 5).

5.1 Vliv aplikace bonecharu na pH půdy

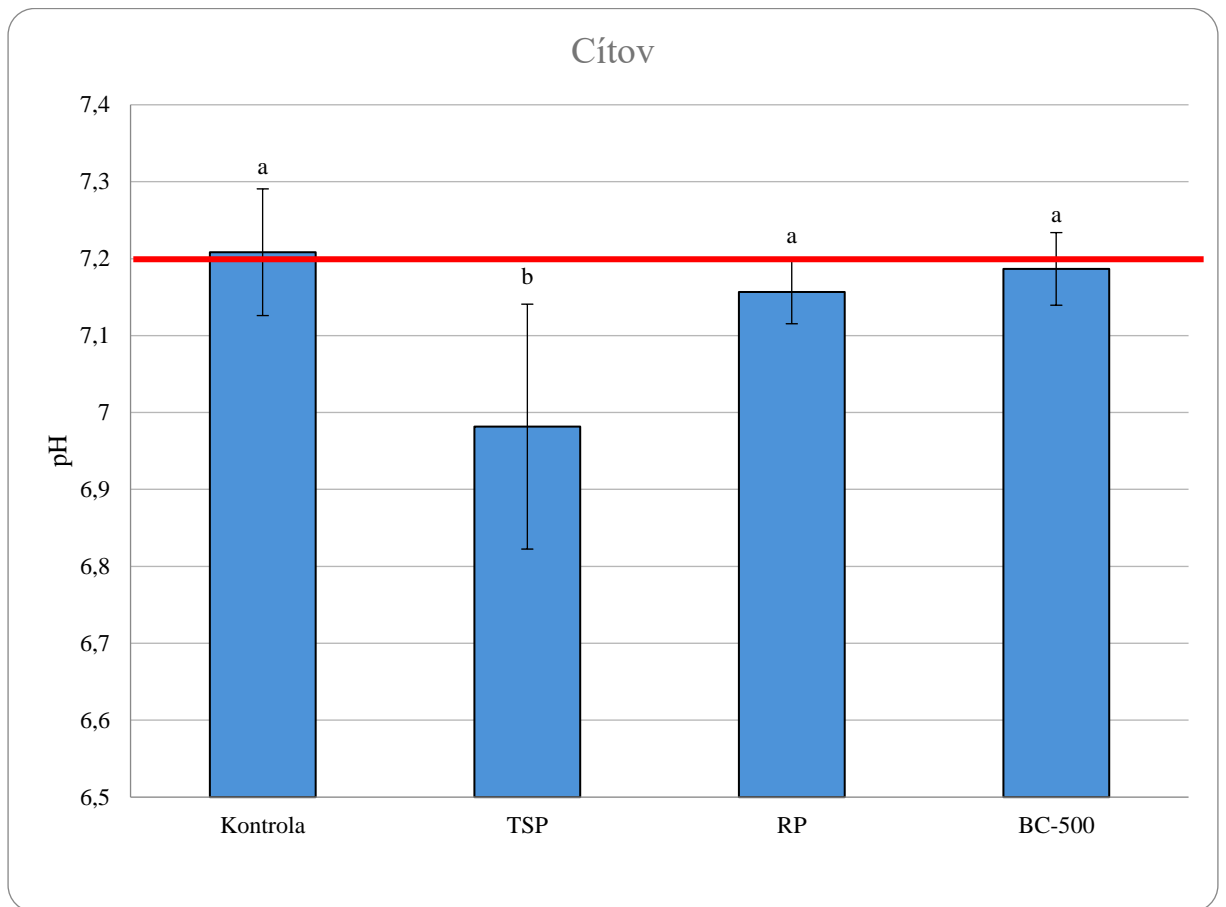
5.1.1 Žamberk – hodnota pH



Graf 1 Vliv aplikace hnojiv na hodnotu pH půdy Žamberk. Odlišná písmena znamenají statisticky významný rozdíl mezi hodnotami. Červené čára znázorňuje původní pH hodnotu půdy Žamberk.

Hodnota pH půdy Žamberk byla po sklizni nejvyšší u varianty 3, hnojené mletým fosfátem ($5,3 \pm 0,04$). V porovnání s původní hodnotou pH 5,2, se pouze mírně zvýšila. Po aplikaci biocharu z masokostní moučky (varianta 4) se hodnota pH oproti původní hodnotě nepatrně snížila ($5,1 \pm 0,04$). Mezi variantou s aplikací bonecharu a variantou hnojenou mletým fosfátem existuje statisticky významný rozdíl. Naopak u nehnojené varianty (varianta 1) ($4,8 \pm 0,08$) a varianty hnojené trojitým superfosfátem ($4,8 \pm 0,02$) (var. 2) je pokles oproti původní hodnotě pH viditelný. Mezi těmito variantami (1,2) se nevyskytuje žádný statisticky významný rozdíl.

5.1.2 Cítov – hodnota pH



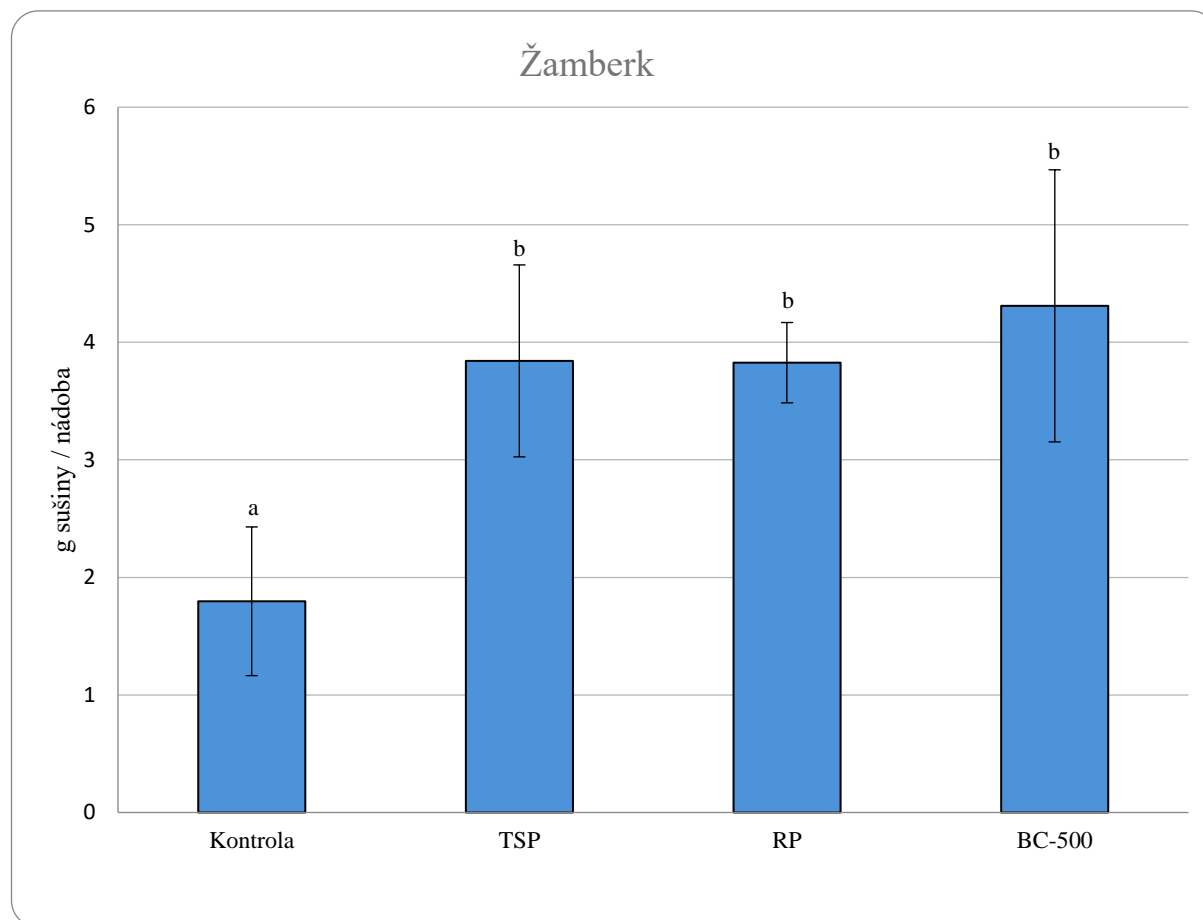
Graf 2 Vliv aplikace hnojiv na pH půdy Cítov. Odlišná písmena znamenají statisticky významný rozdíl mezi hodnotami. Červená čára znázorňuje původní pH hodnotu půdy Cítov.

Oproti původní hodně pH půdy Cítov (7,2) jsou změny způsobené aplikací bonecharu (BC-500) ($7,18 \pm 0,05$) minimální. Statisticky se varianta hnojená bonecharem neliší od kontrolní varianty. Hodnota pH půdy Cítov byla po aplikaci trojitého superfosfátu nižší ($6,9 \pm 0,2$), než původní hodnota pH (7,2). Statistickou analýzou byl zjištěn rozdíl mezi variantou 2 (TSP) a kontrolní variantou. Aplikací mletého fosfátu (RP) ($7,2 \pm 0,04$) a biocharu z masokostní moučky (BC-500) ($7,18 \pm 0,05$) nedošlo k výraznému ovlivnění pH hodnot. Mezi variantami 3 (RP) a 4 (BC-500) se nevyskytuje žádný statisticky významný rozdíl.

5.2 Vliv aplikace bonecharu na výnos biomasy ječmene

5.2.1 Žamberk

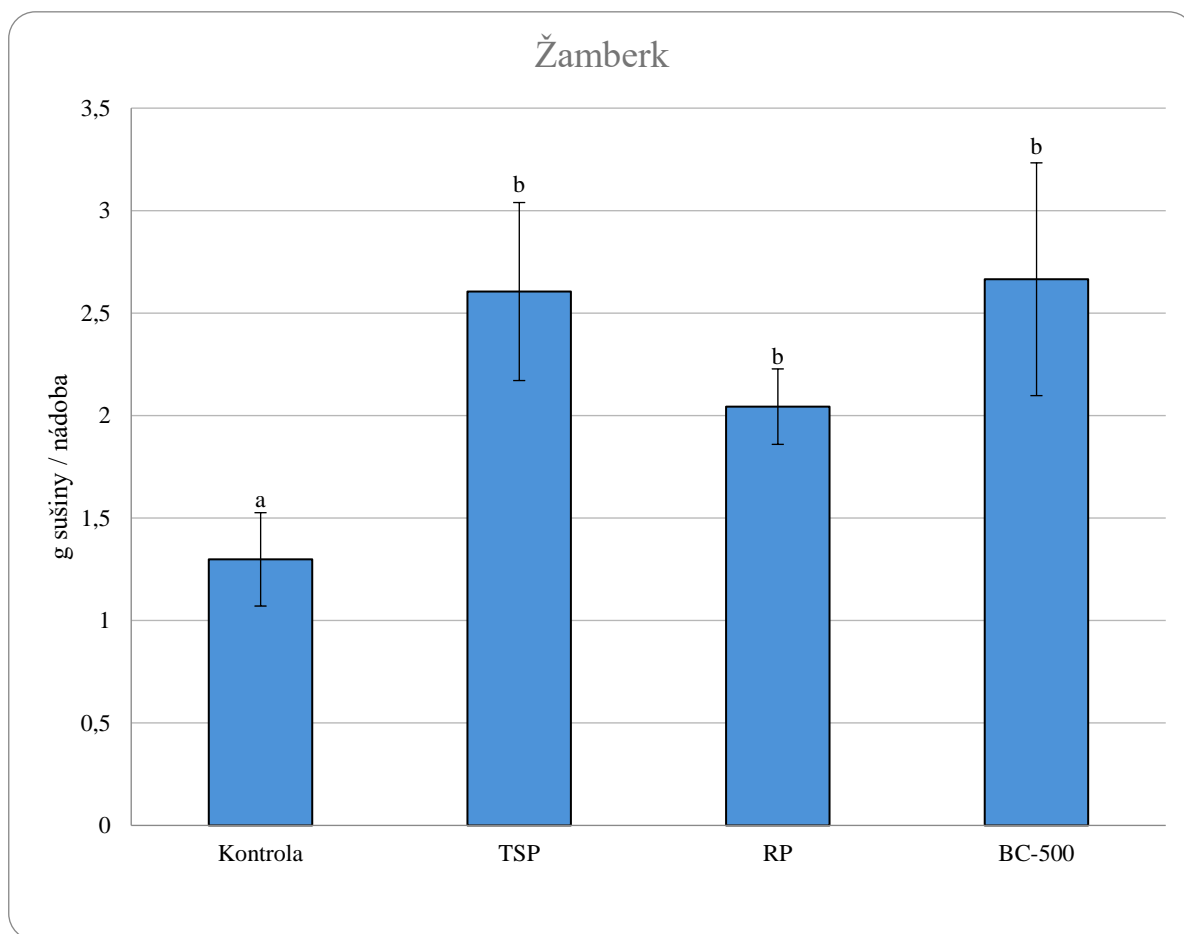
5.2.1.1 Celkový výnos nadzemní biomasy ječmene



Graf 3 Celkový výnos nadzemní biomasy ječmene u půdy Žamberk (g suché biomasy na nádobu). Odlišná písmena znamenají statisticky významný rozdíl mezi hodnotami.

Nejvyššího celkového výnosu biomasy dle Grafu 3 dosáhla varianta 4 hnojená bonecharem ($4,3 \pm 1,1$ g/nádoba). Mezi variantou s aplikací bonecharu a kontrolní variantou existuje statisticky významný rozdíl. Středními hodnotami disponují varianty 2 ($3,8 \pm 0,8$) g/nádoba a 3 ($3,8 \pm 0,4$) g/nádoba. Statistickou analýzou nebyly zjištěny rozdíly mezi hnojenými variantami. Naopak nejnižší výnos má nehnojená kontrolní nehnojená varianta ($1,8 \pm 0,6$) g/nádoba. Z Grafu 3 je zřejmé, že hnojením biocharem z masokostní moučky vyrobeném při 500 °C lze dosáhnout stejného i lepšího výnosu jako při hnojení konvenčně užívanými hnojivy.

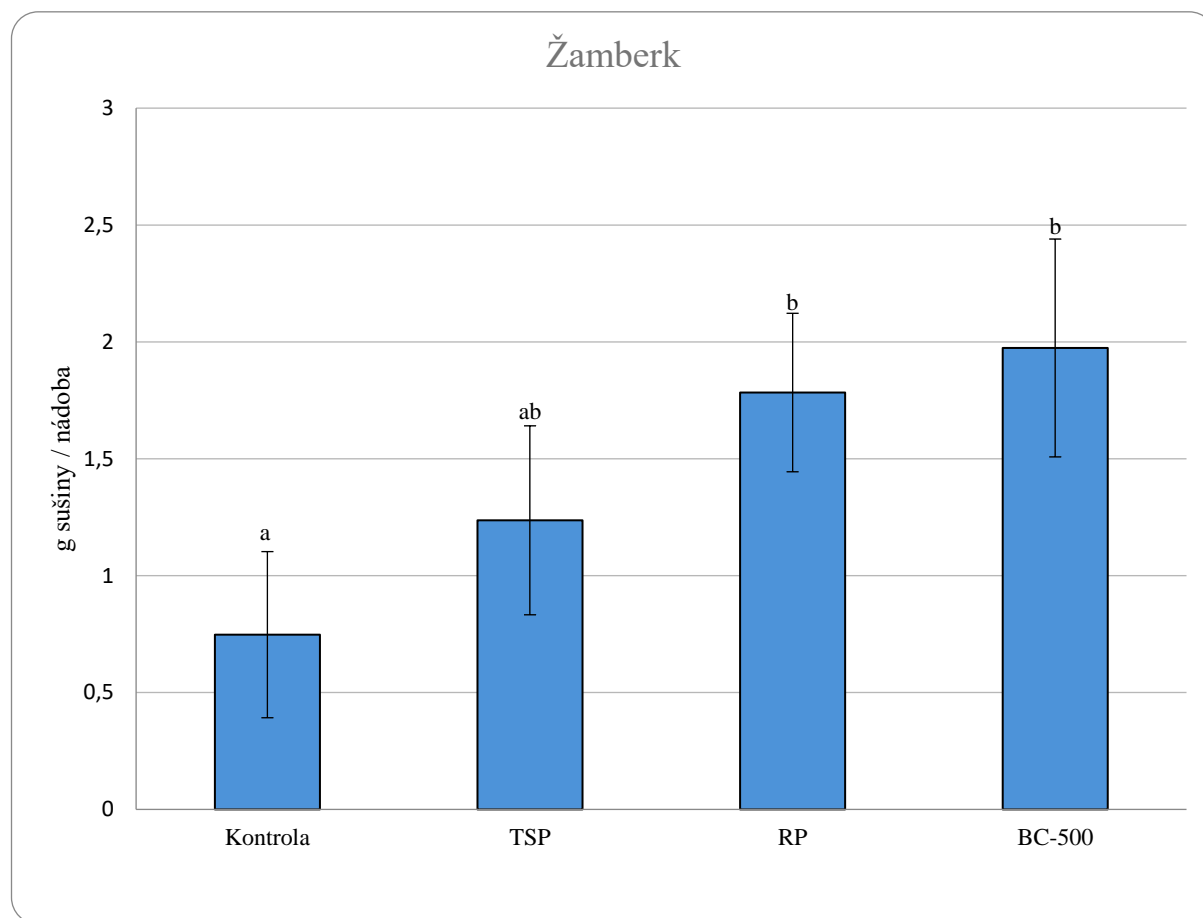
5.2.1.2 Výnos nadzemní biomasy ječmene – sláma



Graf 4 Výnos nadzemní biomasy (sláma) ječmene pro půdu Žamberk (g suché biomasy na nádobu). Odlišná písmena znamenají statisticky významný rozdíl mezi hodnotami.

Nejvyššího výnosu slámy dle Grafu 4 dosáhla varianta 4 ($2,7 \pm 0,6$) g/nádoba. Mezi kontrolní variantou a variantou s aplikací bonecharu existuje dle provedené analýzy statisticky významný rozdíl. Spolu s variantou 4 (BC) dosáhla nejvyšších hodnot výnosu slámy také varianta 2, hnojená pomocí trojitého superfosfátu ($2,6 \pm 0,4$) g/nádoba. Středních hodnot dosáhla varianta s aplikací mletého fosfátu ($2,0 \pm 0,2$) g/nádoba. Mezi variantou s aplikací bonecharu a variantami hnojenými minerálními hnojivy nebyly nalezeny statisticky významné rozdíly. Naopak nejnižší výnos nadzemní biomasy ječmene je viditelný u nehnojené varianty (varianta 1) ($1,3 \pm 0,2$) g/nádoba.

5.2.1.3 Výnos nadzemní biomasy ječmene – zrno

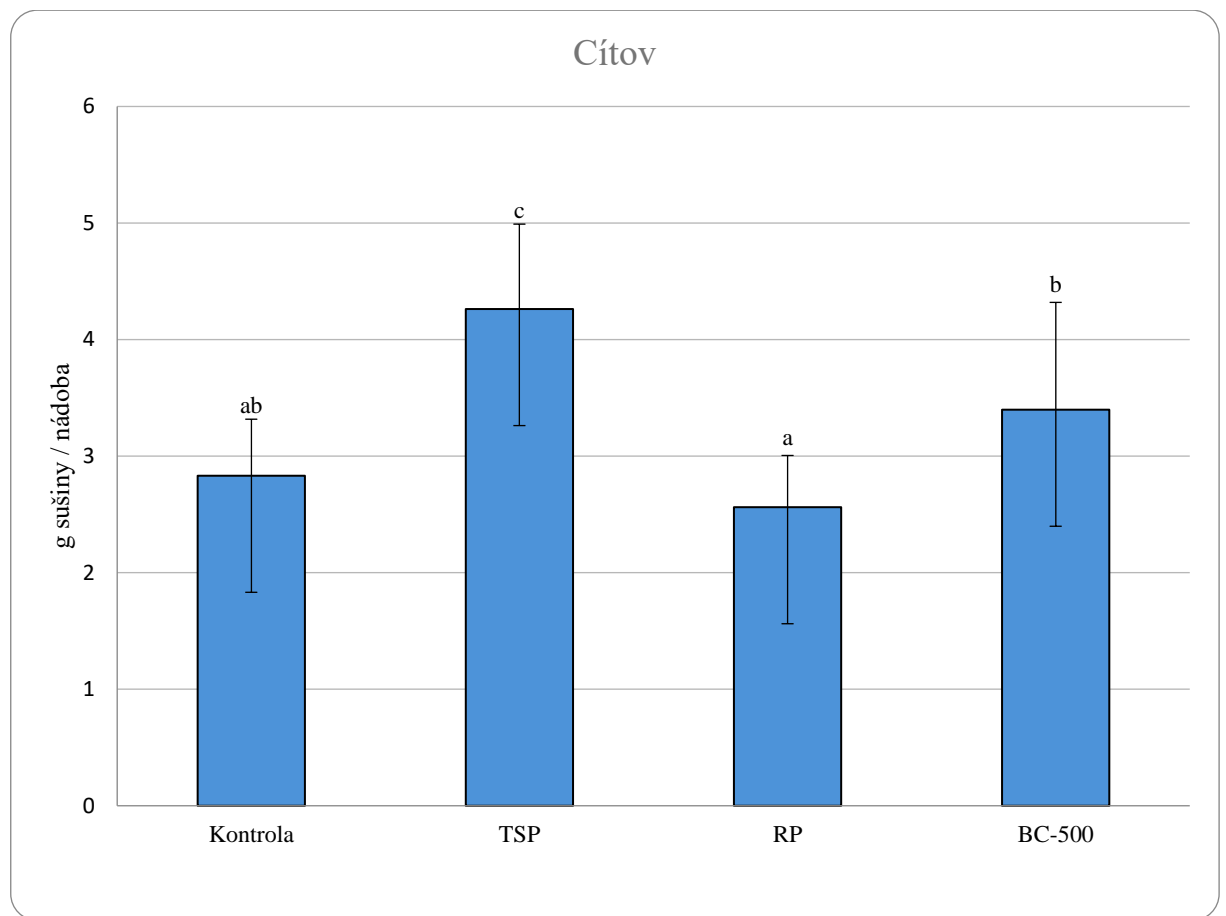


Graf 5 Výnos nadzemní biomasy (zrno) ječmene pro půdu Žamberk (g suché biomasy na nádobu). Odlišná písmena znamenají statisticky významný rozdíl mezi hodnotami.

Z grafu 5 lze vyčíst, že mezi nehnojenou variantou (varianta 1) a variantou 2 (TSP) není žádný statisticky významný rozdíl. Naopak mezi variantou 1 (Kontrola) a variantami 3 (RP) a 4 (BC-500) je statisticky významný rozdíl zřejmý. Nejvyššího výnosu zrna dosáhla varianta 3, hnojená pomocí mletého fosfátu ($1,8 \pm 0,3$) g/nádoba. Velmi podobných hodnot dosáhla také varianta s aplikací bonecharu ($1,7 \pm 0,9$) g/nádoba. Středním výnosem disponuje varianta 2 ($1,2 \pm 0,4$) g/nádoba. Minimálních hodnot výnosu zrna dosáhla nehnojená varianty (Kontrola) ($0,6 \pm 0,4$) g/nádoba.

5.2.2 Cítov

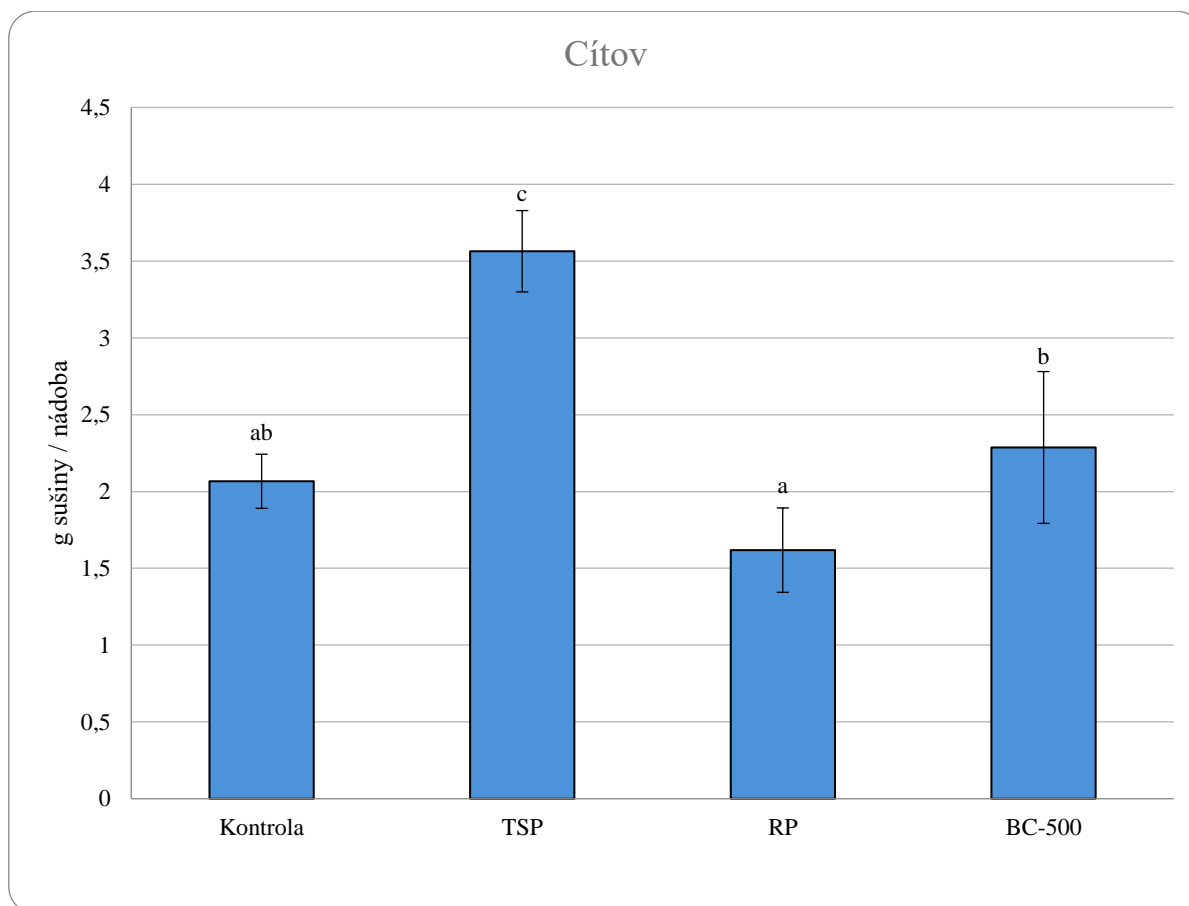
5.2.2.1 Celkový výnos nadzemní biomasy



Graf 6 Celkový výnos nadzemní biomasy ječmene pro půdu Cítov (g suché biomasy na nádoba). Odlišná písmena znamenají statisticky významný rozdíl mezi hodnotami.

Nejvyšší celkový výnos biomasy byl dle Grafu 6 zaznamenán u varianty 2, kde byl aplikován trojitý superfosfát, s hodnotou $(4,3 \pm 0,7)$ g/nádoba. Byly zjištěny statisticky významné rozdíly mezi touto variantou a variantou bez hnojení (Kontrola). Varianta 4 dosáhla druhého nejvyššího výnosu s hodnotou $(3,6 \pm 0,6)$ g/nádoba. Nebyl zjištěn žádný statisticky významný rozdíl mezi variantou hnojenou bonecharem a kontrolní variantou. Nejnižší celkový výnos nadzemní biomasy ječmene byl zaznamenán u varianty 3 $(2,6 \pm 0,4)$ g/nádoba, s výjimkou kontrolní varianty $(2,9 \pm 0,4)$ g/nádoba.

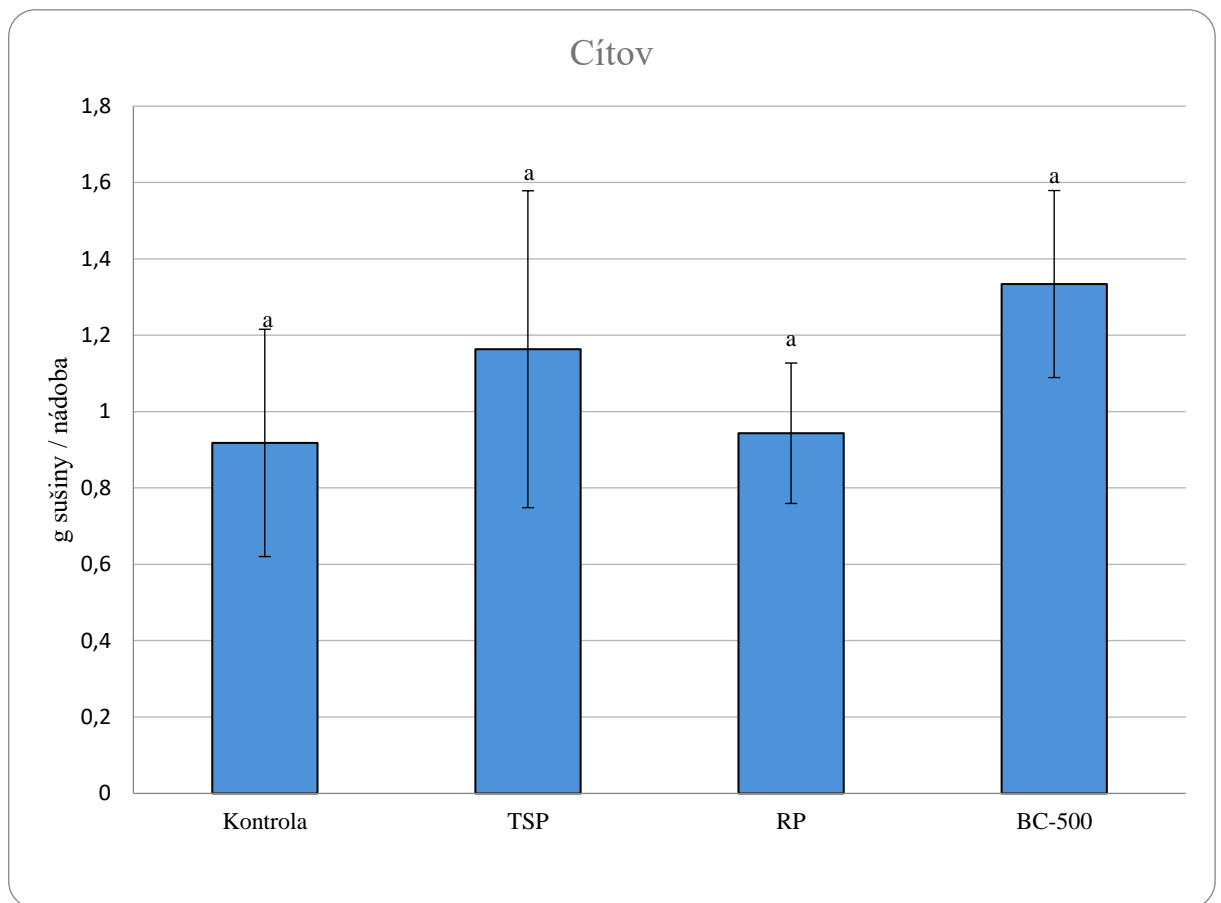
5.2.2.2 Výnos nadzemní biomasy – sláma



Graf 7 Výnos nadzemní biomasy (sláma) ječmene jarního pro půdu Cítov (g suché biomasy na nádobu). Odlišná písmena znamenají statisticky významný rozdíl mezi hodnocenými variantami.

Nejvyššího výnosu slámy dosáhla dle Grafu 7 varianta s aplikací trojitého superfosfátu ($3,6 \pm 0,3$) g/nádoba. Mezi kontrolní variantou a variantou hnojenou pomocí TSP existuje statisticky významný rozdíl. Středních hodnot dosáhly varianta 1 (Kontrola) ($2,0 \pm 0,2$) g/nádoba a varianta s aplikací bonecharu ($2,3 \pm 0,5$) g/nádoba. Statistická analýza neprokázala významný rozdíl mezi kontrolní variantou a variantou s aplikací bonecharu. Nejnižší produkce nadzemní biomasy ječmene byla zaznamenána u varianty 3, která byla hnojena pomocí mletého fosfátu (RP) ($1,6 \pm 0,3$) g/nádoba, tato varianta se od kontrolní nehnojené varianty statisticky neliší.

5.2.2.3 Výnos nadzemní biomasy – zrno

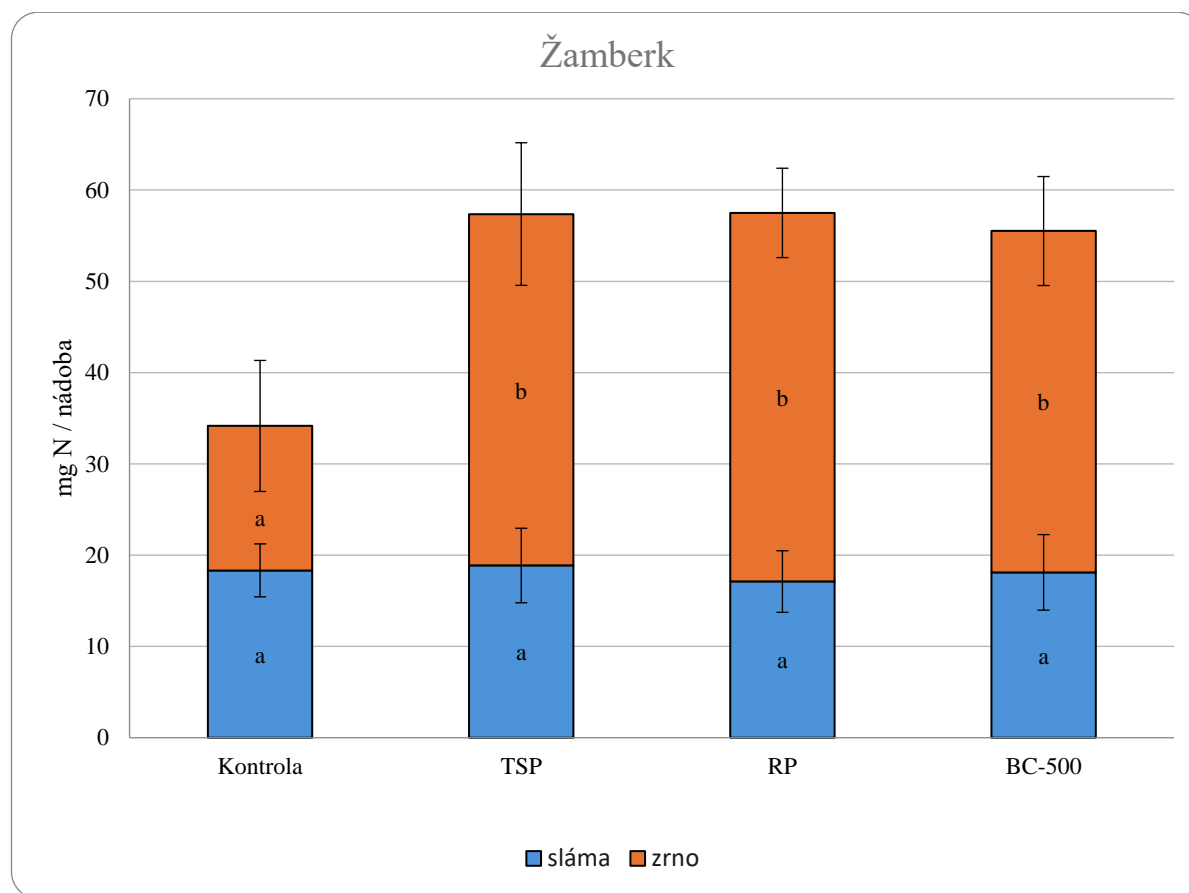


Graf 8 Výnos nadzemní biomasy (zrno) ječmene jarního pro půdu Cítov (g suché biomasy na nádobu). Odlišná písmena znamenají statisticky významný rozdíl mezi hodnotami.

Nejvyšší výnos zrna byl zaznamenán u varianty hnojené bonecharem (varianta 4) ($1,3 \pm 0,3$) g/nádoba. Nejnižší výnos zrna lze pozorovat u varianty 1 ($0,8 \pm 0,3$) g/nádoba. Rozdíly však nebyly markantní. Jednotlivé varianty mezi sebou nevykazují žádné statisticky významné rozdíly. Ať už byly rostliny hnojené nebo ne, nebyl v produkci zrna zjištěn statisticky významný rozdíl (viz Graf 8).

5.3 Vliv aplikace bonecharu na odběr N rostlinou

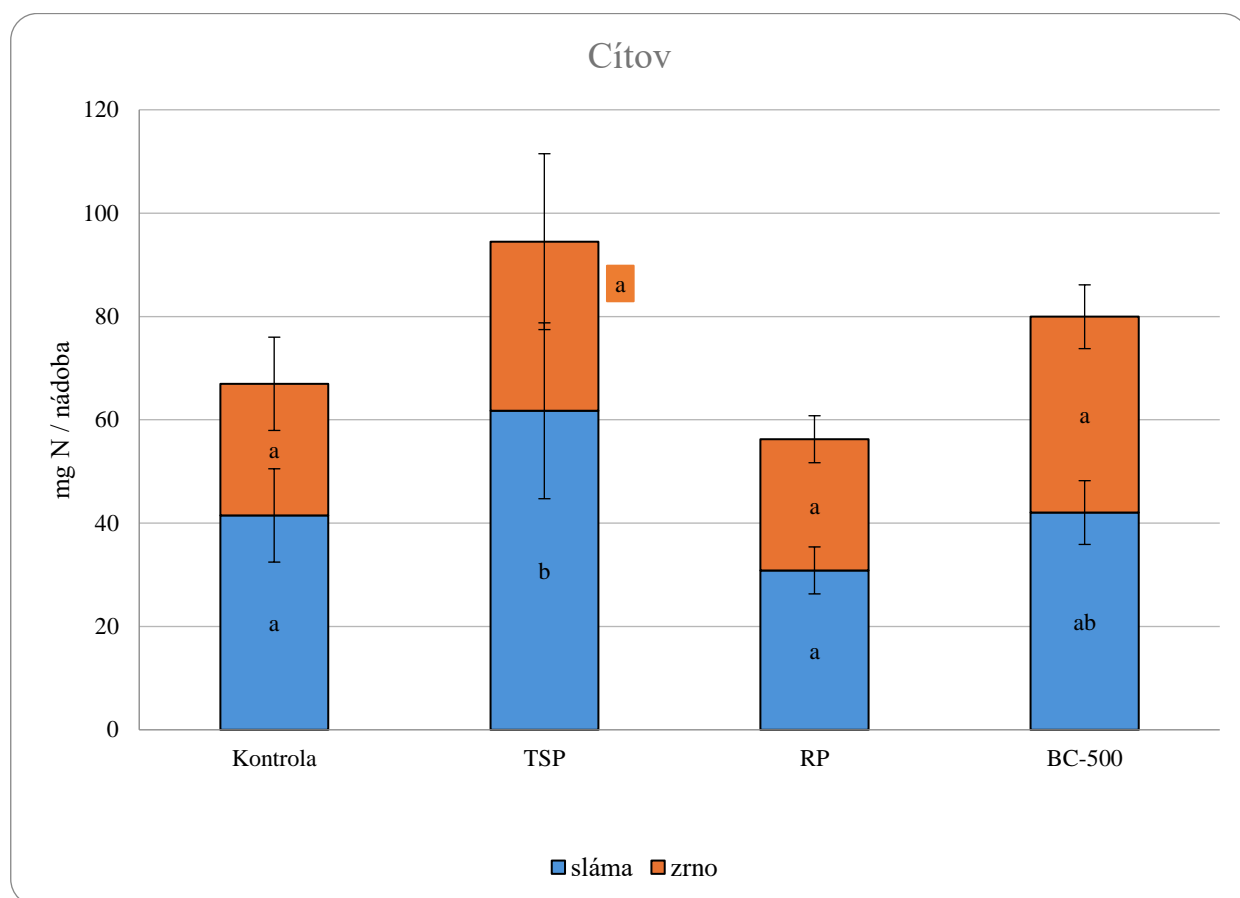
5.3.1 Žamberk



Graf 9 Odběr dusíku nadzemní biomasou ječmene jarního pro půdu Žamberk (mg N na nádobu). Odlišná písmena znamenají statisticky významný rozdíl mezi hodnotami.

Nejvyššího celkového odběru dusíku nadzemní biomasou dosáhla varianta 2 ($57,4 \pm 7,1$) mg/nádoba. Statistická analýza prokázala rozdíl mezi nehnojenou variantou a variantou s aplikací TSP (viz Graf 9). Celkový odběr dusíku byl dle Grafu 9 podobný u varianty hnojené bonecharem ($55,9 \pm 8,8$) mg/nádoba, varianty hnojené mletým fosfátem ($57,5 \pm 4,3$) mg/nádoba a varianty s aplikací TSP ($57,4 \pm 7,1$) mg/nádoba. Mezi kontrolní variantou a hnojenými variantami existuje statisticky významný rozdíl. Pokud jde o odběr N slámou, nejvyšších hodnot dosáhla varianta 2 ($18,9 \pm 4,02$) mg/nádoba, hnojená trojitým superfosfátem. Nejnižší odběr N slámou byl zaznamenán u varianty hnojené mletým fosfátem ($17,1 \pm 3,4$) mg/nádoba. Statistická analýza neprokázala významné rozdíly mezi jednotlivými variantami. Co se týče odběru N zrnem ječmene, nejnižší hodnoty byly naměřeny u kontrolní nehnojené varianty ($18,8 \pm 7,2$) mg/nádoba, tato varianta (Kontrola) se statisticky liší od hnojených variant. Mezi variantou 4 (BC-500) ($37,4 \pm 5,9$) mg/nádoba, 3 (RP) ($40,4 \pm 4,9$) mg/nádoba a 2 (TSP) ($38,5 \pm 7,8$) mg/nádoba neexistuje statisticky významný rozdíl. Celkově lze konstatovat, že dle Grafu 9 je hnojení bonecharem pro odběr dusíku nadzemní biomasou stejně efektivní jako hnojení minerálními hnojivy.

5.3.2 Cítov

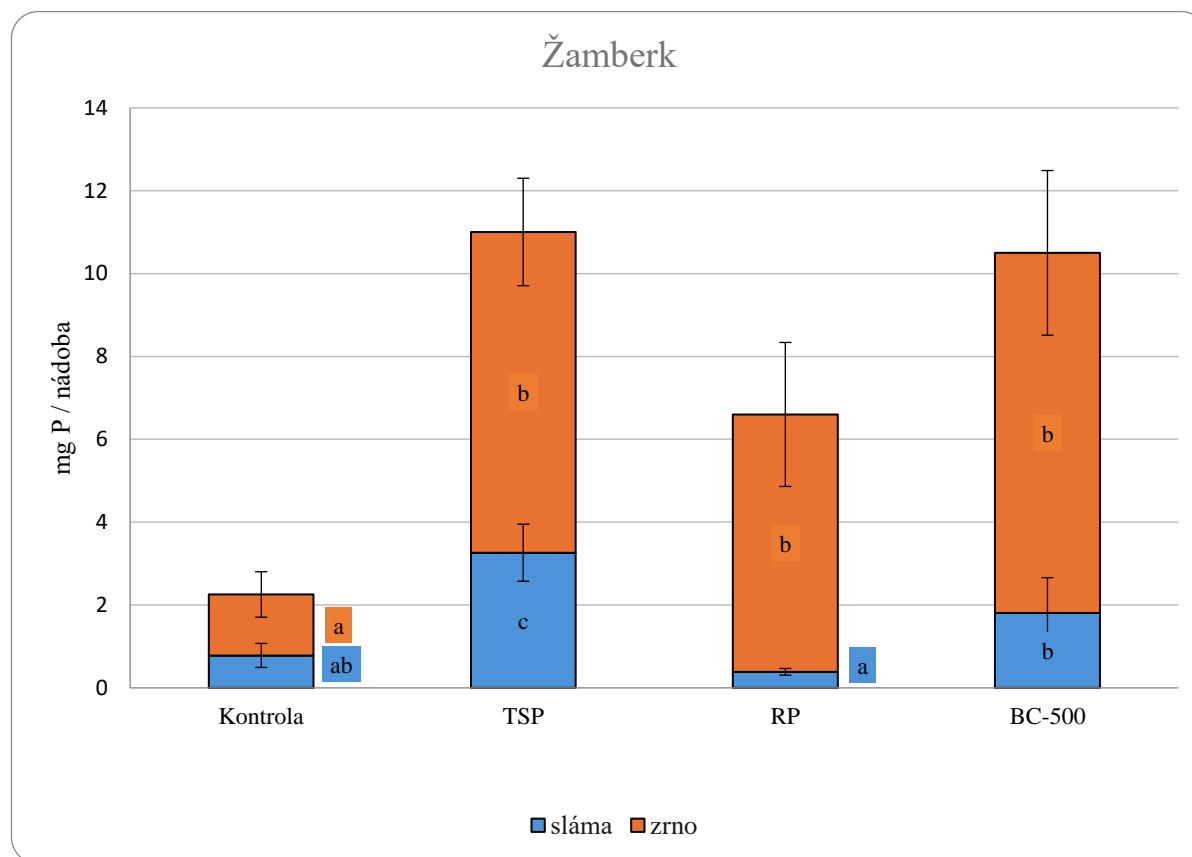


Graf 10 Odběr dusíku nadzemní biomasou ječmene jarního pro půdu Cítov (mg N na nádoba). Odlišná písmena znamenají statisticky významný rozdíl mezi hodnotami.

Nejvyššího celkového odběru dusíku nadzemní biomasou dosáhla varianta 2 ($94,5 \pm 12,3$) mg/nádoba. Statistickou analýzou byl zjištěn rozdíl mezi variantou 2 (TSP) a kontrolní variantou. Druhého nejvyššího celkového odběru N dosáhla varianta s aplikací bonecharu ($79,9 \pm 13,0$) mg/nádoba. Mezi variantou s aplikací TSP a variantou hnojenou pomocí bonecharu nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl. Nejnižší celkový odběr N nadzemní biomasou byl zaznamenán u varianty 3 (RP) ($56,2 \pm 9,5$) mg/nádoba. Dle Grafu 10 dosáhla nejvyššího odběru dusíku slámou varianta hnojená trojitým superfosfátem (TSP) ($61,7 \pm 21,3$) mg/nádoba. Statistická analýza prokázala, že odběr N slámou u varianty hnojené bonecharem ($42,0 \pm 11,3$) mg/nádoba může být podobný, jako při hnojení TSP, zároveň se odběr N slámou u varianty (BC-500) neliší od kontrolní nehnojené varianty. Naopak nejnižší odběr dusíku slámou byl u varianty hnojené mletým fosfátem ($30,8 \pm 5,0$) mg/nádoba. Pokud jde o odběr dusíku zrnem, nejvyšší hodnoty byly dosaženy u varianty 4 ($37,9 \pm 6,2$) mg/nádoba. Nejnižších hodnot dosáhla kontrolní nehnojená varianty ($25,5 \pm 9,0$) mg/nádoba. Střední odběr N zrnem byl u varianty s aplikací TSP ($32,7 \pm 17,0$) mg/nádoba a varianty s aplikací RP ($25,4 \pm 4,5$) mg/nádoba. Mezi jednotlivými variantami nebyl zjištěn žádný statisticky významný rozdíl (viz Graf 10).

5.4 Vliv aplikace bonecharu na odběr P rostlinou

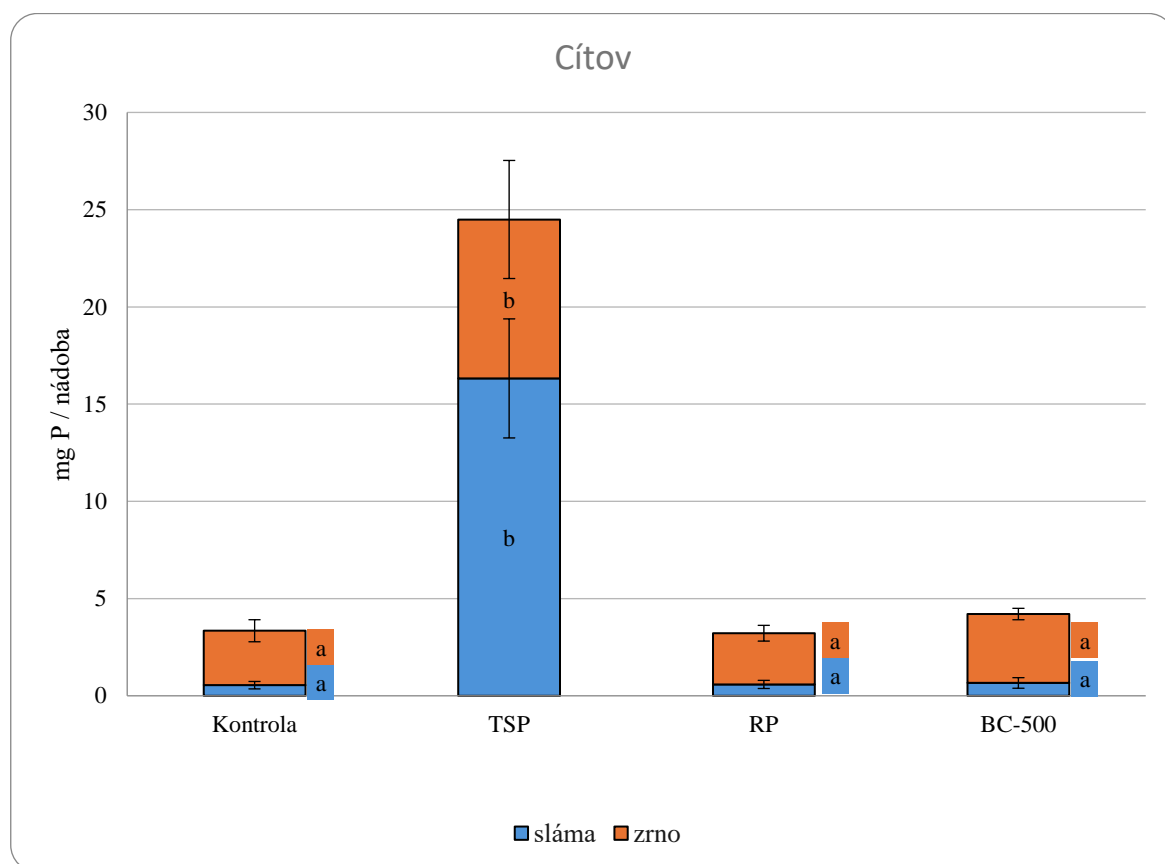
5.4.1 Žamberk



Graf 11 Odběr fosforu nadzemní biomasou ječmene jarního pro půdu Žamberk (mg P na nádoba). Odlišná písmena znamenají statisticky významný rozdíl mezi hodnotami.

Podle Grafu 11 je zřejmé, že nejnižší celkový odběr fosforu byl u varianty bez hnojení ($1,37 \pm 0,74$) mg/nádoba. Na druhé straně, nejvyšší odběr fosforu nadzemní biomasou byl zaznamenán u varianty 2 ($11,0 \pm 3,4$) mg/nádoba a varianty 4 ($10,5 \pm 1,5$). Existuje statisticky významný rozdíl mezi variantou s aplikací bonecharu a kontrolní variantou. Varianta 4 se statisticky liší také ve srovnání s variantou hnojenou pomocí TSP. Varianta 3 dosáhla středního odběru fosforu nadzemní biomasou ($6,60 \pm 1,76$) mg/nádoba. Odběr fosforu slámou byl nejvyšší u varianty 2 ($3,3 \pm 0,7$) mg/nádoba, středních hodnot dosáhla varianta 4 ($1,5 \pm 0,8$) mg/nádoba a varianta 1 (Kontrola) ($0,8 \pm 0,3$) mg/nádoba, mezi kterými neexistuje statisticky významný rozdíl. Nejnižší odběr P slámou byl u varianty s mletým fosfátem ($0,4 \pm 0,1$) mg/nádoba. Co se týče odběru fosforu zrnem nejvyšší hodnoty byly dosaženy u varianty 4 ($8,7 \pm 1,9$) mg/nádoba a 2 ($7,7 \pm 1,3$) mg/nádoba, středními hodnotami disponuje varianta 3 ($6,2 \pm 1,7$) mg/nádoba. Mezi těmito variantami neexistuje statisticky významný rozdíl (viz Graf 11).

5.4.2 Cítov

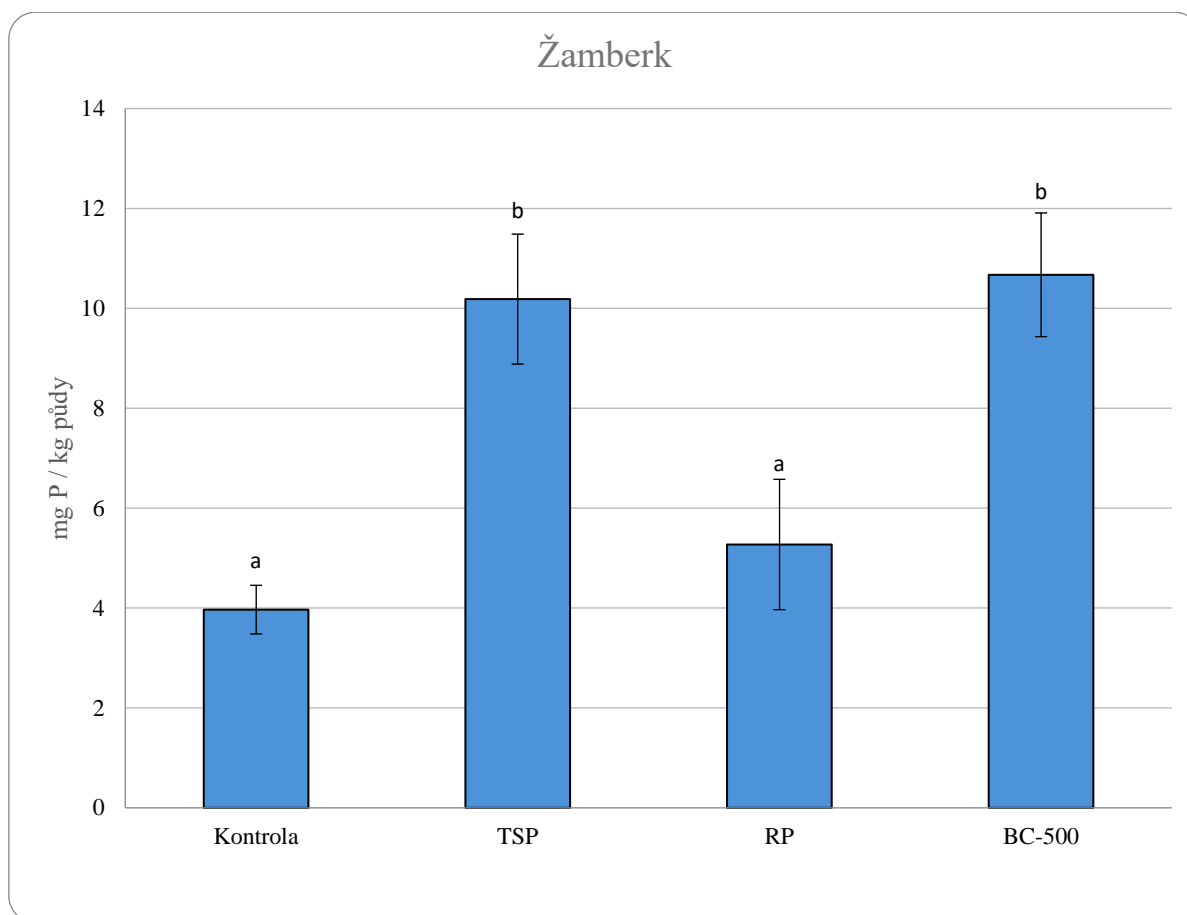


Graf 12 Odběr fosforu nadzemní biomasou ječmene jarního pro půdu Cítov (mg P na nádoba). Odlišná písmena znamenají statisticky významný rozdíl mezi hodnotami.

Nejvyšší celkový odběr fosforu rostlinou byl zaznamenán u varianty hnojené pomocí TSP ($24,5 \pm 4,8$) mg/nádoba. Statistická analýza ukázala významný rozdíl mezi kontrolní nehnojenou variantou a variantou s aplikací TSP. Statistická analýza ukazuje, že mezi variantami 1 ($3,3 \pm 0,7$) mg/nádoba, 3 ($3,3 \pm 0,6$) mg/nádoba a 4 ($4,2 \pm 0,5$) mg/nádoba neexistuje statisticky významný rozdíl. Nejvyšší odběr fosforu slámou ječmene byl zaznamenán u varianty 2 (TSP) ($16,3 \pm 3,1$) mg/nádoba. Mezi variantou hnojenou trojitým superfosfátem (TSP) je ve srovnání s ostatními variantami statisticky významný rozdíl zřejmý (viz Graf 12). Všechny ostatní varianty 1 ($0,5 \pm 0,2$) mg/nádoba, 3 ($0,6 \pm 0,2$) mg/nádoba, 4 ($0,7 \pm 0,3$) mg/nádoba mají velmi nízký odběr fosforu slámou, dle statistické analýzy se mezi nimi nevyskytuje statisticky významný rozdíl. Pokud jde o odběr fosforu zrnem, nejnižší hodnoty byly zaznamenány u varianty 3 ($2,6 \pm 0,4$) mg/nádoba, hnojené mletým fosfátem (RP), varianty 1 ($2,8 \pm 0,5$) mg/nádoba a varianty 4 ($3,4 \pm 0,3$). Mezi těmito variantami neexistuje statisticky významný rozdíl. Na druhé straně, u varianty 2, hnojené trojitým superfosfátem, byl odběr fosforu zrnem nejvyšší ($8,2 \pm 3,0$) mg/nádoba (viz Graf 12).

5.5 Vliv aplikace bonecharu na obsah přístupného P v půdě

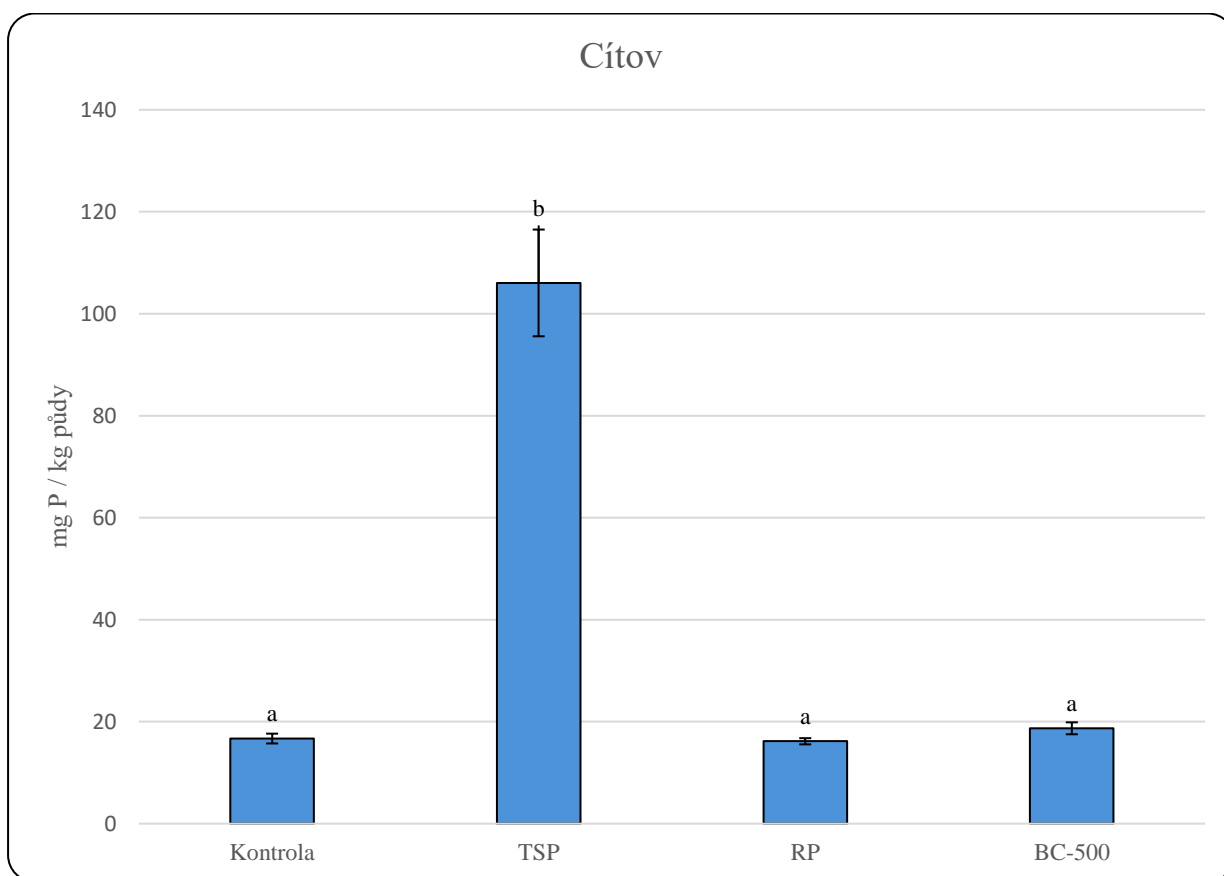
5.5.1 Žamberk obsah přístupného P v půdě



Graf 13 Obsah přístupného fosforu pro půdu Žamberk (mg P na kilogram půdy). Odlišná písmena znamenají statisticky významný rozdíl mezi hodnotami.

Dostupný fosfor (P) byl zjištěn extrakcí pomocí roztoku NaHCO_3 . Významný rozdíl byl dle statistické analýzy stanoven mezi kontrolní variantou ($3,9 \pm 0,5$) mg/kg a variantou 2 (TSP) ($10,2 \pm 1,3$) mg/kg a 4 (BC-500) ($10,7 \pm 1,2$) mg/kg. Nejnižší obsah dostupného fosforu v půdě byl dle Grafu 13 u varianty 1 ($3,9 \pm 0,5$) mg/kg. Varianta hnojená mletým fosfátem, dosáhla středních hodnot dostupného fosforu v půdě ($5,3 \pm 1,3$) mg/kg. Nejvyšší obsah přístupného P v půdě je u varianty 4, která byla hnojena bonecharem ($10,7 \pm 1,2$) mg/kg a varianty s aplikací TSP ($10,2 \pm 1,3$) mg/kg. Tyto varianty se od sebe dle statistické analýzy nijak neliší.

5.5.2 Cítov obsah přístupného P v půdě



Graf 14 Obsah přístupného fosforu pro půdu Cítov (mg P na kilogram půdy). Odlišná písmena znamenají statisticky významný rozdíl mezi hodnotami.

Dostupný fosfor (P) byl zjištěn extrakcí pomocí roztoku NaHCO_3 . Nebyl zaznamenán žádný statisticky významný rozdíl mezi nehnojenou variantou ($16,7 \pm 0,9$) mg/kg a variantami 3 ($16,2 \pm 0,6$) mg/kg a 4 ($18,7 \pm 1,2$) mg/kg. Podle Grafu 14 je nejvyšší koncentrace dostupného fosforu v půdě u varianty 2 (TSP) ($106,0 \pm 10,5$) mg/kg, která byla hnojena trojitým superfosfátem. To potvrzuje, že rozpustný fosfor v tomto hnojivu významně zvýšil koncentraci dostupného fosforu v půdě.

6 Diskuze

6.1 Vliv bonecharu na pH půdy

Z půdy byly po sklizni odebrány vzorky půd, v nichž jsme poté určili hodnoty pH, aby bylo možné porovnat vliv bonecharu. Obecně platí, že biochar má zásaditý charakter a má potenciál zvyšovat půdní pH (Masulili et al. 2010). Hodnota pH bonecharu použitého v pokusu byla ($10,4 \pm 0,04$), půdy z obce Žamberk měly hodnotu pH (5,2) nižší než půdy z obce Cítov (7,2). V našem pokusu bylo zjevné, že aplikace trojitého superfosfátu snižuje pH, v průměru o 0,6 oproti nehnojené variantě. Při porovnání půd ošetřených bonecharem a nehnojených nenalezneme velký rozdíl. U kyselých půd byla významná změna pozorována už při dávkách 2 % biocharu, přídavek 8 % měl významný efekt u všech půdních typů (Hailegnaw et al. 2019). Použití biocharu bylo diskutováno jako alternativa k vápnění (Novak et al. 2009). O této variantě se lze bavit ale pouze u kyselejších půd, jelikož na neutrálních nebo zásaditých půdách je efekt biocharu minimální. Diskutabilní je ale také i efekt takového počínání, jelikož vápnění dokáže změnit pH o celé jednotky (Ok et al. 2019). Tento trend se v našem pokusu nepotvrdil, změny, které byly zapříčiněny aplikací bonecharu, byly minimální. Po aplikaci bonecharu se pH půdy Žamberk snížilo o 0,09, u půdy Cítov pouze o 0,02. Změny pH vyvolané kořeny v důsledku uvolňování kořenových exsudátů mohou být také zodpovědné za okyselení půdy, což také vede k nekonzistentním účinkům na pH půd (Nigamet al. 2001). To by mohlo být vysvětlením, proč se původní pH hodnota půdy Žamberk (5,2) aplikací bonecharu nezvýšila.

6.2 Vliv aplikace bonecharu na výnos biomasy ječmene jarního

Pro náš pokus byly celkové výnosy nadzemní biomasy po aplikaci bonecharu vyšší oproti nehnojené variantě o 132,6 % pro půdu Žamberk, pro půdu Cítov byl výnos vyšší pouze o 23 %. Hnojení trojitým superfosfátem dopomohlo k celkovému vyššímu výnosu biomasy ječmene o 106,5 % pro půdu Žamberk, pro půdu Cítov se výnos nadzemní biomasy zvýšil téměř o 50 %. Po přidání biocharu (varianta 4) byl zaznamenán nejvyšší nárůst biomasy. Takové situace se po aplikaci biocharu dějí běžně, protože se zvyšuje intenzita růstu rostlin s následnou produktivitou (Hermans 2013).

Dle jiných experimentů obvykle přidání biocharu nebo bonecharu do půdy vede k vyššímu výnosu biomasy. Některé pokusy však ukázaly pravý opak, kdy přídavek biocharu výnosy biomasy naopak snížil (Herath et al. 2015). Tento trend se v našem pokusu nepotvrdil. Výnosy biomasy slámy byly po aplikaci bonecharu vyšší o 105 % pro půdu Žamberk, zatímco klasické minerální hnojení trojitým superfosfátem dopomohlo k výnosům vyšším o 100 % (Žamberk). Podobných výsledků dosáhli také autoři studie Zemanová et al. (2017), kde výnos biomasy špenátu pěstovaného na černozemi s aplikací biocharu dosahoval 102–353 % kontrolních vzorků

Pro zrno pomohla aplikace bonecharu k zvýšení výnosu o 146,5 %, účinnější byla aplikace mletého fosfátu, díky které se výnos zrna zvýšil až o 163 % (Žamberk). Pro půdu Cítov byl aplikací bonecharu výnos nadzemní biomasy ječmene, konkrétně slámy, vyšší oproti kontrole o 10 %, aplikací trojitého superfosfátu byl výnos zvýšen až o 72 %. Výnos zrna byl po aplikaci bonecharu vyšší o 53 %, zatímco varianta s aplikací trojitého superfosfátu vykazovala

výnos vyšší pouze o 40 % (Cítov). Martínez-Gómez et al. (2022) zjistili, že ošetření biocharem zvýšilo výnos zrna o 11,5 % ve srovnání s kontrolou. Pozitivní kombinovaný účinek biocharu a anorganického hnojiva na výnos zrna byl 17,5 %. Výsledky se však značně liší v závislosti na typu plodiny, typu půdy a dalších podmínkách. Ve studii Ye et al. (2020) autoři zjistili, že aplikace biocharu spolu s anorganickým hnojivem způsobila 15% zvýšení výnosu ve srovnání s nehnojenou kontrolou. Biochary vyrobené ze zvířecích a lidských odpadů zvýšily výnos plodin o 11 % oproti nehnojené kontrolní variantě. V další studii použili autoři metaanalýzu ke zkoumání účinků biouhlu na výnosy obilnin a luštěnin. Výsledky ukázaly, že aplikace biouhlu významně zvýšila výnos plodiny o 24 % ve srovnání s kontrolou (Farhangi-Abriz et al. 2021).

6.3 Odběry živin nadzemní biomasou ječmene jarního

Rostliny potřebují ke svému růstu a vývoji určité látky, které souhrnně nazýváme živiny, z nichž každá má specifickou strukturální nebo funkční roli a nelze je nahradit. Z koncentrace živin lze odhadnout stav rostliny. Proto je množství živin v rostlině měřítkem nutričního stavu rostliny.

6.3.1 Dusík

Dusík je ve významném množství zastoupen v biocharu z masokostní moučky, což vychází z toho, že výchozí surovina – masokostní moučka obsahuje především dusík N, P a Ca (Dhanarajan 2017). Obsah N v biouhlu z masokostní moučky je vyšší (3,5 %) než u porovnávaných biocharů z pšeničné slámy (0,62–0,93 %), vyrobených při pyrolýze s reakční teplotou 350–650 °C (Oleszczuk et al. 2013). Jiné experimenty naznačují, že aplikace biocharu do půdy může vést k vyšší biologické dostupnosti a tím i vyššímu obsahu dusíku v rostlinách (Irfan et al. 2017). Ztráty dusíku z biocharu jsou způsobeny těkáním. Pokud je biochar aplikován společně s materiálem obsahujícím dusík, jako jsou dusíkatá hnojiva nebo organické hnojivo, může dojít k rozkladu těchto sloučenin za přítomnosti vody a tepla, což může vést k uvolňování dusíku, především v podobě dusíku ve formě amoniaku (NH_3) nebo dusíku ve formě oxidu dusnatého (NO_x) (Ayoub 1999).

V souladu s výsledky našeho pokusu bylo množství dusíku v rostlinách ošetřených biocharem stejné nebo jen mírně nižší než u odrůd hnojených trojitým superfosfátem (TSP). U rostlin rostoucích na půdách hnojených trojitým superfosfátem byly celkové obsahy dusíku oproti nehnojené kontrole 1,7x vyšší pro půdu Žamberk a 1,2x vyšší pro půdu Cítov. Množství dusíku obsaženého v zrně bylo po aplikaci TSP pro půdu Žamberk 2x vyšší oproti nehnojené variantě, po aplikaci biocharu se množství N v zrně zvýšilo 2x (Žamberk). Stejný trend potvrdil i pokus od Uzoma et al. (2011) s biocharem z kravského hnoje připraveným při 500 °C, který byl přidán ke kukuřici. Výnos kukuřice i odběr N se zvyšovaly společně s dávkou tohoto biocharu. Množství dusíku ve slámě se u varianty hnojené TSP pro půdu Cítov zvýšilo oproti nehnojené variantě 1,5x. Ani přes vyšší dávku dusíku obsaženého v biocharu, ve srovnání s minerálními hnojivy, nebyl odběr N slámou ječmene jarního pro půdu Cítov zvýšen. Velmi dobrý odběr N zrnem byl zaznamenán u variant 2 (TSP), 3 (RP) a 4 (BC-500), což je pravděpodobně způsobeno přidáním hnojiva obsahující P. Dodáním limitujícího prvku P

umožníme rostlině přijmout více N. Toto objasňuje Liebigův zákon minima, který říká, že: růst je limitován prvkem, kterého je nedostatek. Studie od Zhang et al. (2021) prokázala, že aplikace biocharu do půdy významně zvýšila rychlost mineralizace dusíku a nitrifikace. Kromě toho aplikace biocharu do půdy významně zvýšila odběr N rostlinou.

6.3.2 Fosfor

Masokostní moučka má poměrně vysoký obsah P, průměrný obsah fosforu v masokostní moučce se obvykle pohybuje mezi 18–22 % (Tlustoš et al. 2021). Samotný materiál, ze kterého je biochar vyroben – masokostní moučka má dobré uplatnění jako hnojivo zvyšující výnos, což potvrzuje i studie, kde byl zkoumán její vliv v kombinaci s živcem draselným a byl vyhodnocen jako nejučinnější kombinací pro lepší výnos (Esetlílí et al. 2015). Podle Kivelä et al. (2015) vedla aplikace masokostní moučky k nižším výnosům mrkve a cukrové řepy než při aplikaci minerálních hnojiv (Kivelä et al. 2015). Studie od Saletnik et al. (2015) poukazuje na fakt, že se zvyšující teplotou pyrolýzy se zvyšuje obsah P a K v biocharu. Dle autora byl P a K nejvyšší při teplotě 500 °C a provozní době 10 min (Saletnik et al. 2015). V našem pokusu se ve srovnání s kontrolní variantou výnos nadzemní biomasy ječmene nejvíce zvýšil u varianty hnojené bonecharem a to až 2,3x (Žamberk). Pro půdu Cítov jsme nejvyšší zvýšení výnosu biomasy zaznamenali u varianty hnojené TSP a to 1,5x ve srovnání s nehnojenou kontrolní variantou. Ve studii od Siebers et al. (2014) byly testovány dva typy půd, půda 1 měla hodnotu pH 5,3, půda 2 (6,4). Při zprůměrování výnosu biomasy pro půdu s dostatkem fosforu (půda 1) bylo nejvhodnější hnojení pomocí TSP, zatímco pro s dostatečným přísunem P (půda 2) byla účinnější aplikace bonecharu. Deficit fosforu vedl k výraznějšímu účinku TSP (půda 1), zatímco dostatek P v půdě podporoval účinek bonecharu (Siebers et al. 2014).

Odběr fosforu byl nejvyšší u variant 2 (TSP) a 4 (BC-500). Z těchto výsledků je zřejmé, že nedostatek dostupného fosforu lze eliminovat přidáním bonecharu (varianta 4) nebo přidáním TSP (varianta 2). Koncentrace ve slámě byla výrazně nižší než u zrna a nejvyšší průměrné hodnoty dosáhla varianta s přidáním biocharu z masokostní moučky. Průměrný odběr fosforu po přidání bonecharu byl až 8,5x vyšší než u kontrolní varianty (Žamberk). Růst a výnos je také ovlivněn typem biocharu (Al-Wabel et al. 2018).

Pro půdu Cítov dosáhla nejvyšší hodnoty odběru fosforu biomasou varianta hnojená trojitým superfosfátem, kde se oproti kontrolní variantě zvýšil 8,3x. U varianty hnojené bonecharem (varianta 4) se odběr zvýšil 2,3x. V alkalických podmínkách je fosfor méně dostupný pro rostliny, protože v takovém prostředí dochází ke vzniku fosforečnanů (PO_4^{3-}), které jsou méně rozpustné, a tedy obtížněji dostupné pro rostliny (Hijazin et al. 2020). Tyto fosforečnany mohou tvořit nerozpustné sloučeniny s vápníkem, hořčíkem nebo železem, které nejsou rostlinami dobře absorbovatelné. Naopak, v kyselých nebo slabě kyselých půdách je fosfor obvykle více dostupný pro rostliny, například ve formě H_2PO_4^- (dihydrogenfosforečnan) a HPO_4^{2-} (hydrogenfosforečnan). Tyto formy fosforu jsou dobře rozpustné v kyselém prostředí, a tudíž lépe dostupné pro rostliny (Penn et al. 2019). To by potvrzovalo námi zjištěné výsledky, kdy byly koncentrace P v nadzemní biomase pro půdu Cítov výrazně nižší než koncentrace P v nadzemní biomase ječmene u půdy Žamberk. Celkové hodnoty koncentrací a odběru P ve slámě byly několikanásobně nižší v porovnání se zrnem. Stejně jako ve studii Zhang et al. (2021), kde se zabývali vlivem dřevního biocharu na produkci rýže a pšenice. Zaznamenali také vyšší odběr

P u zrna než u posklizňového zbytku. To může značit zvýšený vliv biocharu na kořenový růst a na zajištění rostlinné výživy.

Dle studie Salih et al. (1989) je mletý fosfát méně rozpustný než trojitý superfosfát. V mletém fosfátu je fosfor vázán na minerální strukturu a není tak snadno dostupný pro rostliny v krátkodobém horizontu. Toto se našimi výsledky potvrdilo. U variant hnojených pomocí mletého fosfátu jsme nezaznamenali žádné statisticky významné rozdíly oproti kontrolním variantám. Naopak varianty hnojené trojitým superfosfátem vykazují zvýšení odběru fosforu. V případě varianty s aplikací trojitého superfosfátu bylo do půdy dodáno velké množství fosforu ve formě, která byla pro rostliny snadno dostupná, takže rostliny byly schopny přijmout všechny živiny v plném množství, což vedlo k nejvyššímu odběru fosforu nadzemní biomasou ječmene.

6.4 Obsah přístupného P v půdě

Množství fosforu obsaženého po sklizni v půdě bylo v půdách, kde byl aplikován bonechar podstatně vyšší než u nehnojených kontrol pouze u kyselé půdy Žamberk. Množství fosforu bylo u varianty s aplikací bonecharu vyšší 2,7x oproti kontrolní nehnojené variantě. Minimální hodnoty dosáhl kontrolní vzorek. Mezi variantou s aplikací bonecharu a variantou s aplikací trojitého superfosfátu se nevyskytoval statisticky významný rozdíl. Absolutní množství fosforu, který zůstal v alkalické půdě Cítov u varianty hnojené bonecharem bylo oproti kontrole vyšší 1,1x. Bonechar tedy nedopomohl k zvýšení retence fosforu v půdě Cítov. Naopak aplikace TSP se jevila jako velmi účinná, celkové množství fosforu zvýšilo až 6x ve srovnání s kontrolní variantou. Dle Yadav et al. (2012) je špatná mobilita půdního anorganického fosforu způsobena velkou reaktivitou fosfátových iontů s četnými chemickými, mineralogickými a biologickými složkami půdy. Adsorpční-desorpční a srážecí-rozpouštěcí rovnováhy řídí koncentraci P v půdním roztoku a chemickou mobilitu P. Biologická dostupnost P závisí na pH půdy, koncentracích aniontů a kovech, u kterých může docházet ke spolusrážení s P ionty (Yadav et al. 2012).

Studie naznačují, že biochar může zlepšit retenci fosforu v půdě a zvýšit výnos biomasy (Biederman et al. 2013, Christel et al. 2016). Nicméně v souladu s výsledky našeho pokusu, nebyl v mírně alkalických půdách Cítov zaznamenán signifikantní efekt na přístupný fosfor v půdě. V pokusu bylo množství přístupného fosforu v půdě Cítov nižší ve vzorcích s bonecharem než v nádobách s minerálním hnojivem. V souladu s výsledky našeho pokusu jsou také výsledky od Mercl et al. (2020), kde se obsah P v půdě po aplikaci dřevního popela významně nezměnil. Zatímco kombinace dřevního popela s *Penicillium* sp. a *Trichoderma harzianum* významně zlepšily obsah P v půdě a následně produkci biomasy kukuřičných výhonků na kyselé půdě. Přidáním biocharu z masokostní moučky do půdy Žamberk byl odběr P zvýšen, jelikož obsahuje dostatek přístupné formy fosforu, který rostlina může přijmout a také pravděpodobně zvyšuje zásaditost původně kyselé půdy. K podobnému výsledku došli také autoři studie od Glaser et al. (2019), zatímco v kyselých (pH <6,5) a neutrálních půdách (pH 6,5–7,5) bylo zjištěno zvýšení dostupnosti fosforu pro rostliny po aplikaci biocharu, u alkalických půd (pH >7,5) se tyto účinky nepodařilo prokázat. Do kyselých půd byly přidávány převážně alkalické biochary. Tedy, přidání biocharu do alkalické půdy může mít omezený vliv

na obsah přístupného fosforu pro rostliny ve srovnání s jeho účinky v kyselých a neutrálních půdách. V důsledku toho se zdá být vhodné přidávat alkalické biochary do kyselých půd a kyselé biochary do alkalických půd pro zvýšení rostlinami dostupného P v půdách (Chintala et al. 2014). Tato problematika pH vztahující se k účinnosti hnojení fosforem byla porovnána i u pšenice, kde nejlepšího výsledku bylo dosaženo u půd neutrálních, dále kyselých a nejhůře dopadly zásadité půdy (Marschner et al. 2005). Biochar však stále může zlepšit strukturu půdy, zvýšit zadržování vody a poskytnout rostlinám zdroj živin s pomalým uvolňováním.

7 Závěr

V diplomové práci jsme se zaměřili na uvolnitelnost živin z biocharu připraveného z masokostní moučky. Pro pokus byly vybrány dva typy půd: kambizem (Žamberk) a fluvizem (Cítov). Byl zkoumán vliv bonecharu na pH půdy, výnos nadzemní biomasy ječmene jarního. Testován byl také odběr živin (N, P) nadzemní biomasou ječmene a obsah přístupného fosforu v půdách. Obecně platí, že biochar má zásaditý charakter a má potenciál zvyšovat půdní pH. Tento trend se v našem pokusu nepotvrdil, změny, které byly zapříčiněny aplikací bonecharu, byly minimální.

Výsledky naznačují, že biochar má vliv na celkový výnos nadzemní biomasy ječmene jarního. Nejvyšší hodnoty byly dosaženy u varianty s aplikací bonecharu u půdy Žamberk, kde výnosy byly 2x vyšší než u kontrolní, nehnojené varianty. Na půdách Cítov nebyl prokazatelný vliv bonecharu na výnos nadzemní biomasy zaznamenán.

Pokud jde o odběr živin nadzemní biomasou, nejvyšší celkový odběr dusíku (N) nadzemní biomasou ječmene pro půdu Žamberk jsme zaznamenali u varianty s aplikací bonecharu, kde se zvýšil 1,5x ve srovnání s kontrolní nehnojenou variantou. Hodnoty dosažené aplikací bonecharu byly srovnatelné s hnojením pomocí TSP. U půdy Cítov měla varianta hnojená bonecharem hodnoty 1,2x vyšší než kontrolní nehnojená varianta. Vyššího odběru dusíku dosáhla varianta hnojená trojitým superfosfátem, celkový odběr N byl zvýšen 1,3x oproti kontrolní nehnojené variantě. Souhrnem lze konstatovat, že hnojení biocharem z masokostní moučky je pro odběr dusíku stejně prospěšné jako hnojení trojitým superfosfátem nebo mletým fosfátem.

Nejvyšší odběr fosforu (P) jsme na půdě Cítov u varianty s aplikací trojitého superfosfátu, odběr se zvýšil 8x, zatímco hnojení bonecharem dosáhlo zvýšení odběru 2,3x. oproti kontrolní nehnojené variantě. U půdy Žamberk byl vliv aplikace bonecharu srovnatelný s hodnotami naměřenými u varianty hnojené trojitým superfosfátem, kde se odběr zvýšil 8x.

V případě hodnot přístupného fosforu v půdě Žamberk byl celkový obsah přístupného fosforu v půdě u varianty s aplikací bonecharu srovnatelný s variantou hnojenou TSP. Pro půdu Cítov aplikace bonecharu nepomohla ke zvýšení přístupnosti fosforu v půdě. Naopak aplikace TSP se jevila jako velmi účinná, celkové množství přístupného fosforu se zvýšilo až 6x ve srovnání s nehnojenou kontrolní variantou.

V rámci experimentu se potvrdilo, že aplikace bonecharu nebo minerálních hnojiv zvyšuje množství živin v půdě, což je pozitivní efekt, neboť postupné uvolňování živin slouží jako výživa pro rostliny na další vegetační období. Pozitivní účinek bonecharu byl zaznamenán převážně na kyselé půdě Žamberk, u mírně alkalické půdy Cítov se výrazný vliv na uvolňování živin nepotvrdil. Výsledky naznačují, že bonechar může být účinnou alternativou k tradičním hnojivům pro zvýšení výnosů plodin a zlepšení kvality půdy. Je však zapotřebí dalšího výzkumu k optimalizaci využití bonecharu jako hnojiva a k lepšímu pochopení jeho vlivu na úrodnost půdy a výnosy plodin.

8 Literatura

Ahmad, M., Lee, S. S., Dou, X., Mohan, D., Sung, J. K., Yang, J. E., & Ok, Y. S. (2012). Effects of pyrolysis temperature on soybean stover-and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource Technology*, 118, 536-544.

Al-Wabel, M. I., Hussain, Q., Usman, A. R., Ahmad, M., Abduljabbar, A., Sallam, A. S., & Ok, Y. S. (2018). Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: A review. *Land Degradation & Development*, 29(7), 2124-2161.

Antal, M. J., & Grønli, M. (2003). The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(8), 1619-1640.

Ayoub, A. T. (1999). Fertilizers and the environment. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 55, 117-121.

Barbut, S. (2015). The science of poultry and meat processing. University of Guelph. ISBN 9780889556263.

Becerra-Pérez, O., Georgopoulos, S., Lanara, M., Reynel-Ávila, H. E., Papadaki, M., Bonilla-Petriciolet, A., & Mendoza-Castillo, D. I. (2021). Energy-saving and sustainable separation of bioalcohols by adsorption on bone char. *Adsorption Science & Technology*, 2021, 1-16.

Bennett, M. C., & Abram, J. C. (1967). Adsorption from solution on the carbon and hydroxyapatite components of bone char. *Journal of Colloid and Interface Science*, 23(4), 513-521.

Biederman, L. A., & Harpole, W. S. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB bioenergy*, 5(2), 202-214.

Bridgwater, A. V. (1999). Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 51(1-2), 3-22.

Bridgwater, A. V., Meier, D., & Radlein, D. (1999). An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry*, 30(12), 1479-1493.

Břendová, K., Tlustoš, P., Száková, J., & Bohuněk, M. (2014). Využití biouhlí (biocharu) k úpravě půdních vlastností. In *Sborník z 20. mezinárodní konference, Racionální využití hnojiv zaměřené na zdroje živin a využití odpadních látek v zemědělství konané 27. 11. 2014 na ČZU v Praze* „ Česká zemědělská univerzita v Praze.

Cascarosa, E., Boldrin, A., & Astrup, T. (2013). Pyrolysis and gasification of meat-and-bone-meal: Energy balance and GHG accounting. *Waste Management*, 33(11), 2501-2508.

Cascarosa, E., Fonts, I., Mesa, J. M., Sánchez, J. L., & Arauzo, J. (2011). Characterization of the liquid and solid products obtained from the oxidative pyrolysis of meat and bone meal in a pilot-scale fluidised bed plant. *Fuel Processing Technology*, 92(10), 1954-1962.

Chintala, R., Schumacher, T. E., McDonald, L. M., Clay, D. E., Malo, D. D., Papiernik, S. K., ... & Julson, J. L. (2014). Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/Biochar mixtures. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 42(5), 626-634.

Choy, K. K., Ko, D. C., Cheung, C. W., Porter, J. F., & McKay, G. (2004). Film and intraparticle mass transfer during the adsorption of metal ions onto bone char. *Journal of Colloid and Interface Science*, 271(2), 284-295.

Christel, W., Bruun, S., Magid, J., Kwapinski, W., & Jensen, L. S. (2016). Pig slurry acidification, separation technology and thermal conversion affect phosphorus availability in soil amended with the derived solid fractions, chars or ashes. *Plant and Soil*, 401, 93-107.

Česko. Vyhláška č. 284/2003 Sb., vyhláška, kterou se mění vyhláška č. 451/2000 Sb., kterou se provádí zákon č. 91/1996 Sb., o krmivech, ve znění zákona č. 244/2000 Sb., ve znění pozdějších předpisů. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024 [cit. 17. 10. 2023]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2003-284>

Česko. Vyhláška č. 362/1992 Sb., ministerstva zemědělství České republiky o výrobě a složení krmných směsí. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024 [cit. 18. 10. 2023]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1992-362>

Česko. Zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, rostlinných biostimulantech a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd (zákon o hnojivech). In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024 [cit. 18. 10. 2023]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1998-156>

Dhanarajan, A. (Ed.). (2017). *Sustainable Agriculture Towards Food Security*. Springer Singapore.

Downie, A., Crosky, A., & Munroe, P. (2009). Physical properties of biochar. In 'Biochar for environmental management. (Eds J Lehmann, S Joseph) pp. 13–32. *Earthscan Publications Ltd: London*, 2, 154-160.

Esetlili, B. Ç., Çobanoğlu, Ö., Tepecik, M., Öztürk, B., & Anaç, D. (2015). Yield, essential nutrients and essential oils of peppermint (*Mentha x piperita* L.) grown under organic farming conditions.

Farhangi-Abriz, S., Torabian, S., Qin, R., Noulas, C., Lu, Y., & Gao, S. (2021). Biochar effects on yield of cereal and legume crops using meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 775, 145869.

Fryda, L., Panopoulos, K., Vourliotis, P., Pavlidou, E., & Kakaras, E. (2006). Experimental investigation of fluidised bed co-combustion of meat and bone meal with coals and olive bagasse. *Fuel*, 85(12-13), 1685-1699.

Gembalová, L., Klouda, K., Roupcová, P., Rusín, J., Pryszcz, A., & Weisheitelová, M. (2016). Biochar-ecological Product and its Application in Environmental Protection. *Civilní ochrana-Zdravotnické záchranné práce v ochraně obyvatelstva*, 24-31.

- Gilbert, Y. (2009). The disappearing nutrient. *Nature*, 461, 8.
- Glaser, B., & Lehr, V. I. (2019). Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. *Scientific Reports*, 9(1), 9338.
- Gomez-Eyles, J. L., Sizmur, T., Collins, C. D., & Hodson, M. E. (2011). Effects of biochar and the earthworm *Eisenia fetida* on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons and potentially toxic elements. *Environmental Pollution*, 159(2), 616-622.
- Gul, S., Whalen, J. K., Thomas, B. W., Sachdeva, V., & Deng, H. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 206, 46-59.
- Han, H., Buss, W., Zheng, Y., Song, P., Rafiq, M. K., Liu, P., ... & Li, X. (2022). Contaminants in biochar and suggested mitigation measures—a review. *Chemical Engineering Journal*, 429, 132287.
- Hailegnaw, N. S., Mercl, F., Pračke, K., Száková, J., & Tlustoš, P. (2019). Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment. *Journal of Soils and Sediments*, 19, 2405-2416.
- Herath, I., Kumarathilaka, P., Navaratne, A., Rajakaruna, N., & Vithanage, M. (2015). Immobilization and phytotoxicity reduction of heavy metals in serpentine soil using biochar. *Journal of Soils and Sediments*, 15, 126-138.
- Hermans, J. (2013). Biochar benefits: An introduction to making biochar. *ReNew: Technology for a Sustainable Future*, (124), 76-79.
- Hijazin, T., Radwan, A., Lewerenz, L., Abouzeid, S., & Selmar, D. (2020). The uptake of alkaloids by plants from the soil is determined by rhizosphere pH. *Rhizosphere*, 15, 100234.
- Hutla, P. (2006). Energetické využití odpadů z agrárního sektoru ve formě standardizovaných paliv, výzkumná zpráva Z-2472, VÚZT v.v.i. Praha
- Ibrahim, H. A. H. (2020). Introductory chapter: pyrolysis. *Recent Advances in Pyrolysis*, 1.
- Ingr, I. (2004). *Produkce a zpracování masa*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2004. 202 s. ISBN 80-7157-719-7.
- Irfan, M. R., Kaleri, F. N., Rizwan, M., & Mehmood, I. (2017). Potential value of biochar as a soil amendment: A review. *Pure and Applied Biology (PAB)*, 6(4), 1494-1502.
- Jayathilakan, K., Sultana, K., Radhakrishna, K., & Bawa, A. S. (2012). Utilization of byproducts and waste materials from meat, poultry and fish processing industries: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 49, 278-293.
- Jeffery, S., Abalos, D., Spokas, K. A., & Verheijen, F. G. (2015). Biochar effects on crop yield. In *Biochar for Environmental Management* (pp. 301-325). Routledge.

- Joseph, S. & Lehmann, J. (Eds.). (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Routledge.
- Jouhara, H., Ahmad, D., Van Den Boogaert, I., Katsou, E., Simons, S., & Spencer, N. (2018). Pyrolysis of domestic based feedstock at temperatures up to 300 C. *Thermal Science and Engineering Progress*, 5, 117-143.
- Kadlec, P. Technologie masa VŠCHT PRAHA 2002 ISBN 80-7080-510-2. (online) – dostupné z www.vscht.cz/pipekp/ucebnitexty.html.
- Kajan, M. (2005). Bioplyn z odpadů živočišné výroby. *Biom.cz*.
- Kantorek, M., Jesionek, K., Polesek-Karczewska, S., Ziółkowski, P., & Badur, J. (2019). Thermal utilization of meat and bone meals. Performance analysis in terms of drying process, pyrolysis and kinetics of volatiles combustion. *Fuel*, 254, 115548.
- Kaňuščák, L. (2013). Nakládání s vedlejšími živočišnými produkty.
- Karthika, K. S., Rashmi, I., & Parvathi, M. S. (2018). Biological functions, uptake and transport of essential nutrients in relation to plant growth. *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*, 1-49.
- Kendall, C., & McDonnell, J. J. (Eds.). (2012). *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Elsevier.
- Kirkby, E. A. (2001). *Principles of Plant Nutrition* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.
- Kivelä, J., Chen, L., Muurinen, S., Kivijärvi, P., Hintikainen, V., & Helenius, J. (2015). Effects of meat bone meal as fertilizer on yield and quality of sugar beet and carrot. *Agricultural and Food Science*, 24(2), 68-83.
- Krull, E. S., Baldock, J. A., Skjemstad, J. O., & Smernik, R. J. (2012). Characteristics of biochar: organo-chemical properties. In *Biochar for Environmental Management* (pp. 85-98). Routledge.
- Laird, D. A., Brown, R. C., Amonette, J. E., & Lehmann, J. (2009). Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 3(5), 547-562.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Routledge.
- Leinweber, P., Hagemann, P., Kebelmann, L., Kebelmann, K., & Morshedizad, M. (2019). Bone char as a novel phosphorus fertilizer. *Phosphorus Recovery and Recycling*, 419-432.
- Liang, L., Xi, F., Tan, W., Meng, X., Hu, B., & Wang, X. (2021). Review of organic and inorganic pollutants removal by biochar and biochar-based composites. *Biochar*, 3, 255-281.

Lieber, W. (1974). The influence of phosphates on the hydration of Portland cement. In *the VI International Congress on the Chemistry of Cement*.

Lu, Q., Yang, X. C., Dong, C. Q., Zhang, Z. F., Zhang, X. M., & Zhu, X. F. (2011). Influence of pyrolysis temperature and time on the cellulose fast pyrolysis products: Analytical Py-GC/MS study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 92(2), 430-438.

Marschner, P., Solaiman, Z., & Rengel, Z. (2005). Growth, phosphorus uptake, and rhizosphere microbial-community composition of a phosphorus-efficient wheat cultivar in soils differing in pH. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168(3), 343-351.

Mei, H., Huang, W., Wang, Y., Xu, T., Zhao, L., Zhang, D., ... & Pan, X. (2022). One stone two birds: Bone char as a cost-effective material for stabilizing multiple heavy metals in soil and promoting crop growth. *Science of the Total Environment*, 840, 156163.

Martínez-Gómez, Á., Poveda, J., & Escobar, C. (2022). Overview of the use of biochar from main cereals to stimulate plant growth. *Frontiers in Plant Science*, 13, 912264.

Masulili, A., Utomo, W. H., & Syechfani, M. S. (2010). Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia. *Journal of Agricultural Science*, 2(1), 39.

Mercl, F., García-Sánchez, M., Kulhánek, M., Košnář, Z., Száková, J., & Tlustoš, P. (2020). Improved phosphorus fertilisation efficiency of wood ash by fungal strains *Penicillium* sp. PK112 and *Trichoderma harzianum* OMG08 on acidic soil. *Applied Soil Ecology*, 147, 103360.

Mokrejs, P., Langmaier, F., Mladek, M., Janacova, D., Kolomaznik, K., & Vasek, V. (2009). Extraction of collagen and gelatine from meat industry by-products for food and non food uses. *Waste Management & Research*, 27(1), 31-37.

Mohan, D., Pittman Jr, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848-889.

MZe. 2022a. Zákony a nařízení. Ministerstvo zemědělství, Praha. Dostupné z <https://eagri.cz/public/web/mze/zemedelstvi/ekologicke-zemedelstvi/legislativa/zakony-a-narizeni/> (viděno říjen 29, 2023).

MZe. 2022b. Kontrolní organizace. Ministerstvo zemědělství, Praha. Dostupné z <https://eagri.cz/public/web/mze/zemedelstvi/ekologicke-zemedelstvi/kontrola/> (viděno říjen 29, 2023).

MZe. 2022g. Registr hnojiv. Ministerstvo zemědělství, Praha. Dostupné z <https://eagri.cz/public/web/mze/farmar/EPH/registr-hnojiv.html> (viděno listopad 2, 2023).

MZe. 2022h. Kostní moučka ke hnojení. Ministerstvo zemědělství, Praha. Dostupné z https://eagri.cz/public/app/rhpub/etikety/etiketa_47666.pdf?id=47666 (viděno listopad 15, 2023).

- Naeem, M., Ansari, A. A., & Gill, S. S. (Eds.). (2017). *Essential Plant Nutrients: Uptake, Use Efficiency, and Management* (pp. 283-300). Cham: Springer International Publishing.
- Novak, J. M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J. W., Steiner, C., Das, K. C., ... & Schomberg, H. (2009). Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*.
- Novak, J. M., Busscher, W. J., Laird, D. L., Ahmedna, M., Watts, D. W., & Niandou, M. A. (2010). Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Science*, 174(2), 105-112.
- Ok, Y. S., Tsang, D. C., Bolan, N., & Novak, J. M. (Eds.). (2018). *Biochar from Biomass and Waste: Fundamentals and Applications*. Elsevier.
- Oleszczuk, P., Joško, I., & Kuśmierz, M. (2013). Biochar properties regarding to contaminants content and ecotoxicological assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 260, 375-382.
- Penn, CJ a Camberato, JJ (2019). Kritický přehled chemických procesů v půdě, které řídí, jak pH půdy ovlivňuje dostupnost fosforu pro rostliny. *Zemědělství*, 9 (6), 120.
- Piccola, C. D., Hesterberg, D., Muraoka, T., & Novotny, E. H. (2021). Optimizing pyrolysis conditions for recycling pig bones into phosphate fertilizer. *Waste management*, 131, 249-257.
- Pipek, P. (1995). *Technologie Masa I., Praha, 1995*. ISBN 80-7080-173-3.
- Racek, J., Sevcik, J., Chorazy, T., Kucerik, J., & Hlavinek, P. (2018). Biochar–recovery material from pyrolysis of sewage sludge: a review. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 3677-3709.
- Rada, V., & Ryant, P. Use of Meat and Bone Meal in the Nutrition of Corn for Grain.
- Ramanan, S., Mkongo, G., Zhang, Q., Wen, H., Mtaló, F., & Shen, J. (2022). Assessing the environmental impact of bone char production by in-situ emission monitoring and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 367, 132974.
- Rojas-Mayorga, C. K., Bonilla-Petriciolet, A., Aguayo-Villarreal, I. A., Hernandez-Montoya, V., Moreno-Virgen, M. R., Tovar-Gómez, R., & Montes-Morán, M. A. (2013). Optimization of pyrolysis conditions and adsorption properties of bone char for fluoride removal from water. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 104, 10-18.
- Ryant, D. I. P. (2003) Význam fosforu pro pšenici. Mendelova univerzita, Brno, *Dostupné na http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/pdf/biogenni_prvky/fosfor_psenice.pdf*
- Ryant, P. (2007). Možnosti využití masokostního uhlí jako ekologického sorbetu a hnojiva. *Dostupné na http://www.mze.cz/attachments/Studie_FINAL.Pdf*.
- Saletnik, B., Bajcar, M., Zagula, G., Czernicka, M., & Puchalski, C. (2016). Impact of the biomass pyrolysis parameters on the quality of biocarbon obtained from rape straw, rye straw and willow chips. *ECONTECHMOD: An International Quarterly Journal on Economics of Technology and Modelling Processes*, 5(2), 139-143.

- Salih, H. M., Yahya, A. I., Abdul-Rahem, A. M., & Munam, B. H. (1989). Availability of phosphorus in a calcareous soil treated with rock phosphate or superphosphate as affected by phosphate-dissolving fungi. *Plant and Soil*, *120*, 181-185.
- Sawangjang, B., Induvesa, P., Wongrueng, A., Pumas, C., Wattanachira, S., Rakruam, P., ... & Khan, E. (2021). Evaluation of fluoride adsorption mechanism and capacity of different types of bone char. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(13), 6878.
- Schachtman, D. P., Reid, R. J., & Ayling, S. M. (1998). Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant Physiology*, *116*(2), 447-453.
- Shafizadeh, F. (1982). Introduction to pyrolysis of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *3*(4), 283-305.
- Shahid, M. K., Kim, J. Y., Shin, G., & Choi, Y. (2020). Effect of pyrolysis conditions on characteristics and fluoride adsorptive performance of bone char derived from bone residue. *Journal of Water Process Engineering*, *37*, 101499.
- Scheuer, A. (2003). Verwertung von Sekundärstoffen in der Zementindustrie. *Cement International*, *1*, 48-66.
- Siebers, N., Godlinski, F., & Leinweber, P. (2014). Bone char as phosphorus fertilizer involved in cadmium immobilization in lettuce, wheat, and potato cropping. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *177*(1), 75-83.
- Siebers, N., & Leinweber, P. (2013). Bone char: a clean and renewable phosphorus fertilizer with cadmium immobilization capability. *Journal of Environmental Quality*, *42*(2), 405-411.
- Singh, B., Dolk, M. M., Shen, Q., & Camps-Arbestain, M. (2017). Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. *Biochar: A guide to Analytical Methods*, 23.
- Steinhauser, L. (1995). *Hygiena a Technologie Masa*. Brno: LAST, 1995. ISBN 80-900-2604-4.
- Straka, F., Dohányos, M., Zábranská, J., Jeníček, P., Dědek, J., Malíjevký, A., Kunčarová, M. (2003). Bioplyn-příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů. *Říčany, GAS sro.*
- Straka, F., Kunčarová, M., & Musilová, M. (2005). Zpracování veterinárního asanačního odpadu anaerobní technologií. *Biom.cz*.
- Tammeorg, P., Simojoki, A., Mäkelä, P., Stoddard, F. L., Alakukku, L., & Helenius, J. (2014). Short-term effects of biochar on soil properties and wheat yield formation with meat bone meal and inorganic fertiliser on a boreal loamy sand. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *191*, 108-116.

Tlustoš, P., Mercl, F., Košnář, Z., Ertl, Z. (2021). Zpracování čistírenských kalů metodou torefakce a pyrolýzy pro jejich bezpečné použití v zemědělství. Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Praha.

Tlustoš P., Košnář Z., Mercl F., Altyn T., Marcela L., Száková J. (2022). Může biochar – biouhel nahradit organická hnojiva? in Antošovský J et al. Racionální použití hnojiv (sborník z 28. mezinárodní konference). Česká Zemědělská Univerzita v Praze, Praha.

Trávníček, P., Vitázek, I., Vítěz, T., Kotek, L., & Junga, P. (2015). Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití. *Brno, MU in Brno*.

Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., & Nishihara, E. (2011). Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use and Management*, 27(2), 205-212.

Valta, J., Svobodová, L. (2005): Odpady versus vedlejší živočišné produkty. EIA-IPPC-SEA-2005 č.4. Zpravodaj Ministerstva životního prostředí. [on-line]. [cit. 2023-10-10]. ISSN: 1211-7296.

Valta, J. (2007). Praktický průvodce nakládáním s odpady a vedlejšími živočišnými produkty v potravinářském průmyslu. *Praha: CENIA*.

Vassilev, N., Vassileva, M., Fenice, M., & Federici, F. (2001). Immobilized cell technology applied in solubilization of insoluble inorganic (rock) phosphates and P plant acquisition. *Bioresource Technology*, 79(3), 263-271.

Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A. C., Van der Velde, M., & Diafas, I. (2010). Biochar application to soils. *A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes, and Functions. EUR, 24099(162)*, 2183-2207.

Warren, G. P., Robinson, J. S., & Someus, E. (2009). Dissolution of phosphorus from animal bone char in 12 soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 84, 167-178.

Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240-261.

Wu, Y., Luo, J., Zhang, Q., Aleem, M., Fang, F., Xue, Z., & Cao, J. (2019). Potentials and challenges of phosphorus recovery as vivianite from wastewater: A review. *Chemosphere*, 226, 246-258.

Yadav, R. S., Meena, S. C., Patel, S. I., Patel, K. I., Akhtar, M. S., Yadav, B. K., & Panwar, J. (2012). Bioavailability of soil P for plant nutrition. *Farming for food and water security*, 177-200.

Ye, Y., Ding, Y., Jiang, Q., Wang, F., Sun, J., & Zhu, C. (2017). The role of receptor-like protein kinases (RLKs) in abiotic stress response in plants. *Plant Cell Reports*, 36, 235-242.

Ye, L., Camps-Arbestain, M., Shen, Q., Lehmann, J., Singh, B., & Sabir, M. (2020). Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls. *Soil Use and Management*, 36(1), 2-18.

Ylivainio, K., Uusitalo, R., & Turtola, E. (2008). Meat bone meal and fox manure as P sources for ryegrass (*Lolium multiflorum*) grown on a limed soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81, 267-278.

Zhang, L., Jing, Y., Chen, C., Xiang, Y., Rezaei Rashti, M., Li, Y., ... & Zhang, R. (2021). Effects of biochar application on soil nitrogen transformation, microbial functional genes, enzyme activity, and plant nitrogen uptake: A meta-analysis of field studies. *GCB Bioenergy*, 13(12), 1859-1873.

Zemanova, V., Břendová, K., Pavlikova, D., Kubatova, P., & Tlustoš, P. (2017). Effect of biochar application on the content of nutrients (Ca, Fe, K, Mg, Na, P) and amino acids in subsequently growing spinach and mustard.

Zwetsloot, M. J., Lehmann, J., Bauerle, T., Vanek, S., Hestrin, R., & Nigussie, A. (2016). Phosphorus availability from bone char in a P-fixing soil influenced by root-mycorrhizae-biochar interactions. *Plant and Soil*, 408, 95-105.

9 Seznam použitých zkratk a symbolů

BC – biochar

BC-500 – biochar vyrobený z masokostní moučky při 500 °C

BSE – bovinní spongiformní encefalopatie

MKM – masokostní moučka

MO – mikroorganismy

RP – mletý fosfát

TSP – trojitý superfosfát

VŽP – vedlejší živočišný produkt