

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 termicky upraveného
čistírenského kalu**

Diplomová práce

Bc. Sára Trejbalová

Technologie odpadů

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

Konzultantka práce: Ing. Altyn Taisheva, CSc.

Čestné prohlášení

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

V Praze dne 21. 04. 2024

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala prof. Ing. Pavlovi Tlustošovi, CSc., dr. h. c. za vedení diplomové práce a rady týkající se jejího zpracování. Dále také Ing. Altyn Taishevě, CSc. za vedení experimentální části diplomové práce a konzultace výsledků.

Uvolňování dusíku a fosforu z termicky upraveného čistírenského kalu

Souhrn

V současné době dochází k neustálému nárůstu produkce čistírenského kalu z důvodu zvýšené urbanizace a rozvoje městských oblastí a snahy zlepšovat kvalitu povrchových vod. Čistírenský kal je odpadní produkt, který vzniká při čištění odpadních vod v čistírnách a obsahuje širokou škálu organických i anorganických látek a může představovat riziko pro životní prostředí, pokud není řádně zpracován nebo odstraněn. Přestože čistírenský kal obsahuje mnoho škodlivých látek, jako jsou těžké kovy nebo organické sloučeniny, má také potenciál k pozitivnímu využití. Jedním z efektivních způsobů zpracování čistírenského kalu je jeho termická úprava na biouhel. Tento proces umožňuje přeměnu odpadního materiálu na užitečný produkt s mnoha pozitivními vlastnostmi. Biouhel, bohatý na uhlík a živiny, může sloužit jako alternativa k tradičním hnojivům a přispět k ekologičtějším využití čistírenského kalu.

V rámci této diplomové práce jsme v nádobovém pokusu zkoumali vliv aplikace upraveného čistírenského kalu pyrolýzou na tvorbu biomasy ječmene jarního a akumulaci dusíku a fosforu v nadzemní biomase rostlin. Chování kalu jsme porovnávali s rostlinami hnojenými minerálními hnojivy. Dále jsme se zaměřili na hodnocení vlivu této úpravy na přístupnost půdního fosforu rostlinám ve srovnání s variantami ošetřenými minerálními hnojivy. Dále jsme sledovali jak jednotlivé varianty hnojení ovlivňovaly hodnotu pH půdy. Pro realizaci experimentu jsme využili dva různé typy půd, kambizem a fluvizem, a aplikovali jsme různé varianty hnojení. Ty zahrnovaly biouhel z čistírenského kalu, trojitý superfosfát, kontrolní variantu s přídatkem dusíku a kontrolní variantu bez hnojení. Následně byly získané výsledky aplikace biouhlu z čistírenského kalu statisticky vyhodnoceny, porovnány s použitými hnojivy, nehnojenou kontrolní variantou a s dostupnou odbornou literaturou.

Na základě našich výsledků můžeme konstatovat, že termicky upravený čistírenský kal má vliv na celkový výnos biomasy a uvolňování dusíku a fosforu. Významné změny jsme zaznamenali i v hodnotách pH půdy, kde použití biouhlu z čistírenského kalu vedlo ke zvýšení pH na půdě kambizem a mírnému poklesu pH na půdě fluvizem. Co se týče celkového výnosu na půdě Žamberk (kambizem), nejvyšší hodnoty byly dosaženy u varianty s biouhlem z čistírenského kalu. Na půdě Cítov (fluvizem) byl nejvyšší výnos biomasy dosažen u varianty hnojené biouhlem z čistírenského kalu, avšak statisticky se nelišil od ostatních variant. V případě odběru dusíku (N) rostlinou biomasou jsme na půdě Žamberk (kambizem) zaznamenali významně vyšší odběr dusíku při použití trojitého superfosfátu a kontrolní varianty s přídatkem dusíku. Na půdě Cítov (fluvizem) jsme zaznamenali vyšší příjem dusíku při použití trojitého superfosfátu a biouhlu z čistírenského kalu. V hodnocení odběru fosforu (P) rostlinami jsme zjistili, že nejvyšší odběr fosforu byl dosažen při použití trojitého superfosfátu. Zaznamenali jsme také nejvyšší hodnoty přístupného obsahu fosforu v půdním roztoku při použití trojitého superfosfátu a biouhlu z čistírenského kalu.

Výsledky naznačují, že biouhel z čistírenského kalu může úspěšně nahradit fosforečná hnojiva a tím snížit jejich spotřebu. Z dlouhodobého hlediska mohou odpadní materiály, jako je termicky upravený čistírenský kal, přispívat k dodání nezbytných živin do půdy a zlepšovat půdní vlastnosti pro udržitelné pěstování plodin.

Klíčová slova: čistírenský kal, pyrolýza, biouhel, jarní ječmen, dusík, fosfor

The Release of Nitrogen and Phosphorus from Thermally Treated Sewage Sludge

Summary

Currently, there is a constant increase in the production of sewage sludge due to increased urbanization and development of urban areas and efforts to improve the quality of surface water. Sewage sludge is a waste product that results from wastewater treatment in sewage treatment plants and contains a wide range of organic and inorganic substances and can pose a risk to the environment if not properly treated or disposed of. The thermal treatment of sewage sludge into biochar has proven to be an effective way of processing it, which enables the transformation of waste material into a useful product with many advantages.

As part of this diploma thesis, we investigated the effect of treatment of sewage sludge by pyrolysis on the formation of spring barley biomass and the accumulation of nitrogen and phosphorus in the above-ground biomass of plants, compared to plants fertilized with mineral fertilizers. Furthermore, we focused on evaluating the effect of this treatment on the accessibility of soil phosphorus to plants in comparison with variants treated with mineral fertilizers. In a container experiment, we tested the effect of biochar from sewage sludge on the yield of grain and straw of spring barley, uptake of phosphorus and nitrogen by plant biomass, and the content of available phosphorus in the soil after harvesting plants. Furthermore, we analyzed how individual fertilization variants influenced the pH value of the soil. For the implementation of the experiment, we used two different types of soil, cambise and fluvise, and we applied different versions of fertilization. These included sewage sludge biochar, triple superphosphate, a control variant with added nitrogen and a control variant without fertilization. The results of applying sewage sludge biochar were then compared with fertilizers used, unfertilized control, and available professional literature.

Based on our results, we can state that thermally treated sewage sludge has an effect on the total yield of biomass and the release of nitrogen and phosphorus. We also noticed significant changes in soil pH values, where the use of biochar from sewage sludge led to an increase in soil pH with cambium and a slight decrease in soil pH with fluviz. As for the total yield on the Žamberk soil (cambiz), the highest values were achieved with the variant with biochar from sewage sludge. On the Cítov soil (fluviz), the highest biomass yield was achieved with the variant fertilized with biochar from sewage sludge. In the case of nitrogen (N) removal by plant biomass, we recorded a significantly higher nitrogen removal on the Žamberk soil (cambizum) when using triple superphosphate and the control variant with added nitrogen. On the soil of Cítov (fluviz) we recorded a higher uptake of nitrogen when using triple superphosphate and biochar from sewage sludge. In the assessment of phosphorus (P) uptake by plants, we found that the highest uptake of phosphorus was achieved when triple superphosphate was used. We also recorded the highest values of accessible phosphorus content in the soil when using triple superphosphate and sewage sludge biochar.

The results indicate that biochar from sewage sludge can successfully replace phosphorus fertilizers and thereby reduce their consumption. In the long term, waste materials such as sewage sludge can contribute to the retention of essential nutrients in the soil, improving soil properties for sustainable crop production.

Keywords: sewage sludge, pyrolysis, biochar, spring barley, nitrogen, phosphorus

Obsah

1 Úvod	1
2 Vědecká hypotéza a cíle práce	2
3 Literární rešerše	3
3.1 Živiny rostlin	3
3.1.1 Dusík.....	3
3.1.1.1 Mineralizace	4
3.1.1.2 Nitrifikace	4
3.1.1.3 Denitrifikace	5
3.1.2 Fosfor.....	5
3.1.3 Draslík.....	6
3.2 Čistírenský kal	7
3.2.1 Stabilizace čistírenského kalu.....	8
3.2.2 Produkce kalu	9
3.2.3 Nakládání s čistírenskými kaly	10
3.2.4 Legislativa.....	10
3.2.5 Vlastnosti a složení čistírenského kalu	11
3.2.5.1 Hodnota pH.....	11
3.2.5.2 Hustota čistírenského kalu.....	11
3.2.5.3 Makroprvky a mikroprvky.....	12
3.2.5.4 Přístupnost živin z čistírenského kalu.....	13
3.2.5.5 Těžké kovy.....	14
3.2.5.6 Organické polutanty.....	14
3.2.5.7 Patogenní organismy	16
3.2.6 Vliv čistírenského kalu na fyzikální a chemické vlastnosti půdy.....	16
3.3 Zpracování biomasy a výroba biouhlu	17
3.3.1 Produkty pyrolýzy	18
3.4 Biouhel	19
3.4.1 Biouhel z čistírenského kalu.....	20
3.4.2 Využití biouhlu z čistírenského kalu v zemědělství	21
3.4.3 Pozitivní vliv biouhlu	22
4 Metodika	23
4.1 Charakteristika použitých půd	23

4.2	Pyrolýza čistírenského kalu.....	23
4.3	Nádobový experiment	25
4.4	Analytické metody.....	26
4.4.1	Měření hodnoty pH.....	26
4.4.2	Digestce rostlinného materiálu	27
4.4.3	Stanovení H, C, N, S.....	27
4.4.4	Stanovení přístupného obsahu fosforu.....	27
4.4.5	Zpracování a statistické vyhodnocení výsledků	27
5	Výsledky.....	28
5.1	Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na změnu hodnoty pH půdy..	28
5.2	Výnos ječmene jarního	30
5.2.1	Výnosy zrna ječmene jarního	30
5.2.2	Výnosy slámy ječmene jarního.....	32
5.3	Celkový výnos ječmene jarního	34
5.4	Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na odběr dusíku (N) rostlinou	36
5.5	Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na odběr fosforu (P) rostlinou	38
5.6	Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na změnu přístupného obsahu fosforu (P) v půdě po sklizni ječmene jarního	40
6	Diskuze.....	42
6.1	Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na pH půdy	42
6.2	Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na výnos ječmene jarního	42
6.3	Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na odběr dusíku (N) rostlinou	43
6.4	Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na odběr fosforu (P) rostlinou	44
6.5	Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na změnu přístupného obsahu fosforu (P) v půdě po sklizni ječmene jarního	45
7	Závěr	46
8	Literatura.....	47

1 Úvod

V současném zemědělství se klade stále větší důraz na snížení dávek minerálních hnojiv při pěstování plodin. Přestože jsou tato hnojiva nezbytná pro zdravý růst rostlin, hledají se alternativní zdroje, které by je mohly nahradit. Jedním z potenciálních zdrojů jsou odpadní produkty, jako jsou kalové zbytky z čistíren odpadních vod.

S narůstající světovou populací a zvyšující se ochranou životního prostředí dochází k postupnému zvyšování produkce čistírenských kalů při čištění odpadních vod. Například v České republice dosahuje roční produkce čistírenských kalů v suché hmotnosti odhadovaných 197 991 tun, což přibližně odpovídá 19 kg na obyvatele.

Složení a vlastnosti kalů z odpadních vod se výrazně liší a jsou především závislé na charakteristikách čištění odpadních vod a znečišťujících látkách, obsažených v odpadní vodě. Tyto látky mohou pokrývat širokou škálu toxických látek, včetně těžkých kovů, organického materiálu, patogenů, anorganických sloučenin a léčiv, což omezuje jejich použití v zemědělství. I když jsou čistírenské kaly původně vnímány jako odpad, mohou mít pozitivní přínosy, pokud jsou správně zpracovány a využity. Jedním z možných způsobů zpracování je pyrolýza, která umožňuje získání užitečných látek, jako je biouhel.

Biouhel, který vzniká pyrolýzou, je materiál s vysokým obsahem uhlíku a může být využit pro různé účely, včetně zlepšení půdních vlastností pro rostliny. Má schopnost zadržovat vodu a zlepšovat strukturu půdy, což přispívá k lepšímu růstu plodin a snižuje vyplavování živin. Biouhel působí i jako hnojivo s pomalým uvolňováním, které imobilizuje dusík a fosfor v půdě. Tento mechanismus pomalého uvolňování pomáhá zlepšit dostupnost živin pro růst plodin po delší dobu, čímž se stává udržitelnou možností pro zemědělství.

Tato diplomová práce se bude zabývat problematikou uvolňování dusíku a fosforu z termicky upraveného čistírenského kalu. Cílem je zkoumat faktory ovlivňující tento proces a jeho dopady na zemědělskou produkci.

2 Vědecká hypotéza a cíle práce

Hypotézy této práce: Předpokládáme, že dusík a fosfor se z biocharu uvolňují odlišně než po aplikaci minerálních hnojiv, což může ovlivnit tvorbu biomasy a obsah živin v zrnu ječmene jarního. Dále předpokládáme, že odlišná uvolnitelnost živin z upraveného čistírenského kalu bude mít vliv i na obsah přístupného fosforu v půdě v porovnání s minerálním hnojením.

Cíle této práce: Stanovit vliv úpravy čistírenského kalu pyrolýzou na tvorbu biomasy ječmene jarního a akumulaci dusíku a fosforu v nadzemní biomase rostlin, a to v porovnání s rostlinami hnojenými minerálními hnojivy. Dále bylo cílem stanovit vliv úpravy čistírenského kalu pyrolýzou na přístupnost půdního fosforu rostlinám v porovnání s variantami ošetřenými minerálními hnojivy.

3 Literární rešerše

3.1 Živiny rostlin

Rostlinné živiny jsou základní chemické prvky a sloučeniny nezbytné pro růst a metabolismus rostlin. Pro efektivnější vývoj a růst rostlin je nutný příjem živin většinou v anorganické formě (Naeem et al., 2017).

Je známo, že 17 prvků je nezbytnými živinami pro rostliny, které rozdělujeme na makroprvky a mikroprvky. Makroprvky jsou skupina živin, které jsou potřeba ve větším množství než mikroprvky. Mezi tyto prvky patří: uhlík, kyslík, vodík, dusík, fosfor, draslík, vápník, síra, hořčík, železo, bor, chlor, mangan, zinek, měď, molybden a nikl. Rostliny získávají tyto živiny ze vzduchu, vody a půdy.

Mezi základní živiny se řadí uhlík, vodík a kyslík, z nichž rostliny a živočichové jsou převážně složeni, slouží také jako zdroj energie a jsou základem pro sacharidy, jako jsou cukry a škrob (Dhaliwal et al., 2013).

Tři hlavní živiny, které rostliny potřebují zpravidla v nejvyšším množství, jsou dusík, fosfor a draslík, které se často označují jako NPK. Nedostatek těchto živin může omezit růst rostlin a výnos plodin.

Rostliny absorbují živiny z půdy třemi hlavními procesy: difúzí, hmotovým tokem a příjmem kořenů. Difúze umožňuje živinám přesunout se z oblasti s vysokou koncentrací v půdě na povrch kořene. Hromadný transport zahrnuje pohyb živin s vodou ke kořenovému povrchu. K zachycení kořenů dochází, když kořeny prorůstají do půdy a přicházejí do kontaktu s živinami. Jakmile jsou živiny na povrchu kořene, mohou vstoupit do rostliny prostřednictvím procesu příjmu iontů (Reichardt et al., 2020).

3.1.1 Dusík

Dusík je nejrozšířenějším prvkem v přírodě, přítomný v litosféře, atmosféře a hydrosféře. Dusík hraje zásadní roli v růstu a vývoji rostlin. Podílí se na různých kritických procesech, jako je růst, rozšiřování listové plochy, produkce biomasy, růst kořenů a příjem živin. Hospodaření s dusíkem v půdě je obtížné, protože dusík prochází častými přeměnami a snadno se z půdy ztrácí (Anas et al., 2020). Rostliny mohou přijímat dusík ve formě amonné (NH_4^+) nebo nitrátové (NO_3^-) v závislosti na rostlinných druzích a vlastnostech půdy, jako je například pH půdy. Obsah dusíku v půdě je kolem 0,1–0,2 %. Hlavní podíl dusíku je v organických formách (95–99 %), který je až na výjimky nepřijatelný pro rostliny. Z celkového množství dusíku jsou pouze 1–5 % přístupné rostlinám, a to v minerálních formách (Balík et al., 2012). Dusík je mobilní prvek, který je obvykle přijímán rostlinami prostřednictvím hromadného toku, snadno se rozpouští ve vodě a transportuje se především xylémem. Koncentrace rozpuštěných látek obsahující dusík, zejména dusičnanů, se může rychle měnit v důsledku procesů, jako je aktivní příjem kořeny rostlin a mikroorganismy, vyluhování a denitrifikace.

Atmosférický dusík může být přeměněn do různých forem oxidů dusíku (oxidovaných forem) nebo amoniaku (redukovaných forem) prostřednictvím různých procesů. Mezi tyto procesy patří aplikace dusíkatých hnojiv na půdu, spalování fosilních paliv v motorech a

elektrárnách, blesky během bouřek a spalování biomasy, jako jsou lesní požáry. V důsledku těchto procesů dochází k uvolňování oxidů dusíku a amoniaku do atmosféry (Šafaříková & Pešata, 2006). Průmyslové závody, které vyrábějí hnojiva, využívají dusík z atmosféry k výrobě látek jako je síran amonný, dusičnan amonný a močovina. Při aplikaci na půdu se dusík mění na minerální formu (dusičnan), kterou mohou rostliny přijímat. Dusičnany mohou být snadno vyplaveny z půdy silným deštěm, což má za následek acidifikaci půdy. (Fowler et al., 2013).

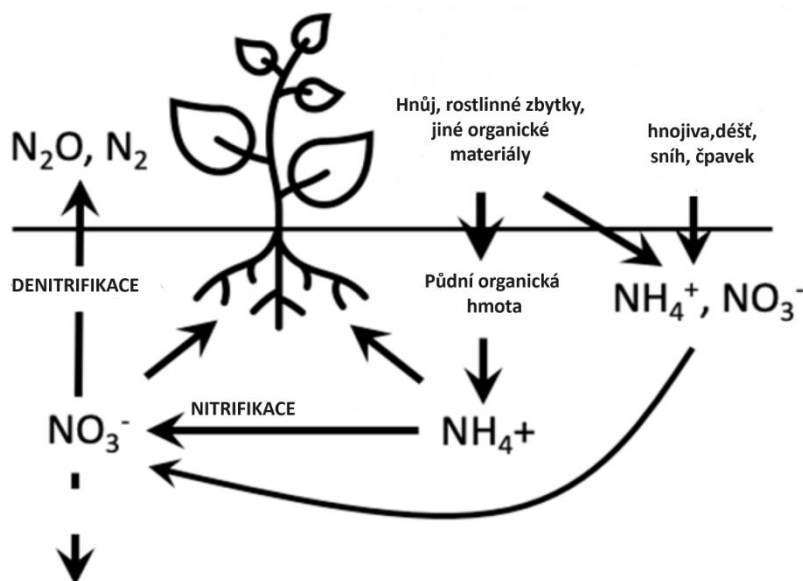
Nedostatek dusíku v rostlinách může vést k nedostatku chlorofylu, což má za následek světle žlutou barvu starších listů, inhibovaný růst výhonků a zvýšený růst kořenů. Tento nedostatek může způsobit snížené kvetení, plodnost, obsah bílkovin a škrobu, což nakonec vede k pomalému růstu a snížení výnosů (Mu & Chen, 2021).

3.1.1.1 Mineralizace

Tento proces zvyšuje biologickou dostupnost živin, jako je dusík, fosfor a síra, jejich přeměnou z organických na anorganické formy. Organický dusík obsažený v zemědělských zbytcích, rostlinném materiálu nebo živočišných odpadech může být uvolněn do půdy a přeměněn na amonný dusík (NH_4^+) nebo dusičnanové ionty (NO_3^-) pod vlivem mikroorganismů (Schimel & Bennett, 2004).

3.1.1.2 Nitrifikace

Nitrifikace je biologický proces, při kterém se amoniak přeměňuje na dusitany a poté na dusičnany (obrázek č. 1). Tento proces je nezbytný v cyklu dusíku a je primárně prováděn nitrifikačními bakteriemi, jako jsou *Nitrosomonas* a *Nitrobacter*. Tento proces probíhá v aerobním prostředí ve dvou krocích: nejprve se vytváří nitrit (NO_2^-), který je pak dále oxidován na dusičnan. Nitrifikace probíhá v půdě a je důležitá pro přeměnu dusíku do formy, kterou mohou rostliny využít. Hraje zásadní roli v globálním cyklu dusíku a je také významný při odstraňování dusíku z komunálních odpadních vod. Proces nitrifikace je ovlivněn různými faktory prostředí, jako je pH, vlhkost a teplota (Schmidt, 1982).



Obrázek 1 Cyklus dusíku v prostředí (Kirkby, E. A., 2001).

3.1.1.3 Denitrifikace

Denitrifikace je mikrobiální proces redukce dusičnanů a dusitanů na plynné formy dusíku, zejména oxid dusný (N_2O) a dusík (N_2) (obrázek č. 1). Tento proces je primárně prováděn denitrifikačními bakteriemi, což je různorodá skupina bakterií, které zahrnují mnoho různých kmenů.

Denitrifikace je anaerobní proces, který se vyskytuje v půdě, vodních systémech a anoxických zónách v jezerech a oceánech. Je nezbytnou součástí koloběhu dusíku, protože přeměňuje dusičnany na plynný dusík, čímž odstraňuje biologicky dostupný dusík a vrací jej do atmosféry. Tento proces je významný v zemědělství, čištění odpadních vod a dopadu na životní prostředí, protože může vést k produkci oxidu dusného, skleníkového plynu. Denitrifikace je důležitá, protože odstraňuje fixovaný dusík z ekosystému a vrací jej do atmosféry v biologicky inertní formě, což v konečném důsledku hraje klíčovou roli v globálním cyklu dusíku (Wasik et. al., 2001). Proces denitrifikace je ovlivněn různými faktory prostředí, jako je přítomnost organické hmoty, pH a teplota (Balík et al., 2012).

3.1.2 Fosfor

Fosfor je jedním z nejdůležitějších prvků pro život na naší planetě (Desmidt et al., 2015). Je to základní živina pro rostliny, která hraje klíčovou roli v různých fyziologických procesech, včetně fotosyntézy, přenosu energie a tvorby nukleových kyselin. V zemědělství se fosfor často aplikuje do půdy ve formě fosfátových hnojiv, aby se zlepšil výnos a kvalita plodin.

Fosfor je v půdě poměrně stabilní a nevzdaluje se od místa, kde je aplikován, protože se rychle váže s železem a hliníkem a stává se pro rostliny hůře dostupným, zejména v kyselých půdách (Luengo et al., 2006).

Celkový obsah fosforu v půdě je 0,01–0,1 %. V půdě se fosfor nachází ve třech formách, které jsou ve formě organických sloučenin, ve formě půdních částic absorbované na povrchu a ve formě těžko rozpustných minerálů. Fosfor je také přítomen v mřížce jílu a dalších silikátových minerálů.

Fosfor v anorganické formě obvykle tvoří 35 % až 70 % celkového fosforu v půdě (Šimek & Cooper, 2004). Primární minerály fosforu včetně apatitu, strengitu a variscitu jsou velmi stabilní a uvolňování dostupného fosforu z těchto minerálů zvětráváním je obecně příliš pomalé. Naproti tomu sekundární minerály včetně fosforeňnanů vápníku, železa a hliníku se liší rychlostí rozpouštění v závislosti na velikosti minerálních částic a pH půdy (Shen et al., 2011).

Kořeny rostlin získávají fosfor primárně ve formě HPO_4^{2-} a H_2PO_4^- z půdního roztoku (Vance et al., 2003). Transport fosforu v půdním roztoku probíhá třemi způsoby: hodnostní proudění vody, působení půdních organismů a difúzí. Kořeny vyšších rostlin a organismy (Aspergillus, Penicillium, Mucor, Rhizopus, Bacillus, Pseudomonas) produkují enzym fosfatáza. Fosfát je v rostlinách snadno mobilní a může se pohybovat nahoru nebo dolů, a to i opačným směrem k půdě, kde je méně pohyblivý. Translokace fosfátu kořenem je přes xylém hlavně k rychle mladým listům, kde je fosfor potřeba pro expanzi a růst listů.

Nedostatek fosforu v rostlinách může vést k různým příznakům, včetně inhibice nebo zabránění růstu výhonků, tmavých, matných, modrozelených listů, které mohou ve vážných případech zblednout, a zvýšeného poměru kořenů k výhonkům. Kromě toho mohou příznaky zahrnovat malou velikost listů, snížený růst výhonků a zvýšený růst kořenů. Nedostatek fosforu se obvykle objevuje nejprve na starších částech rostliny, přičemž nové listy se obvykle zdají zdravé, ale často malé (Hammond et al., 2004).

3.1.3 Draslík

Draslík je základní živinou pro růst rostlin a je jednou ze tří primárních makroživin nezbytných pro zdraví rostlin. Draslík je vázán v primárních minerálech a v sekundárních jílových minerálech. Hlavní zdroj draslíku pro rostliny rostoucí v přírodních podmínkách pochází ze zvětráváním silikátových nebo karbonátových hornin. Draslík uvolněný minerály do půdního roztoku pak může být přímo absorbován kořeny rostlin nebo být adsorbován půdními koloidy. Draslík je přijímán rostlinami v ve formě K^+ . Draslík je v rostlinách vysoce mobilní a pohybuje se xylémem a floémem (Fageria et al., 2010).

Draslík hraje zásadní roli v různých fyziologických procesech v rostlinách, jako je aktivace enzymů, fotosyntéza a regulace příjmu a transportu vody. Přispívá také k celkovému zdraví a síle rostlin, napomáhá odolnosti vůči chorobám a stresu. Přítomnost draslíku v půdě je zásadní pro udržení správné rovnováhy živin a podporu růstu rostlin. Kromě toho je draslík hlavním prvkem kontinentální kůry a je sedmým nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře.

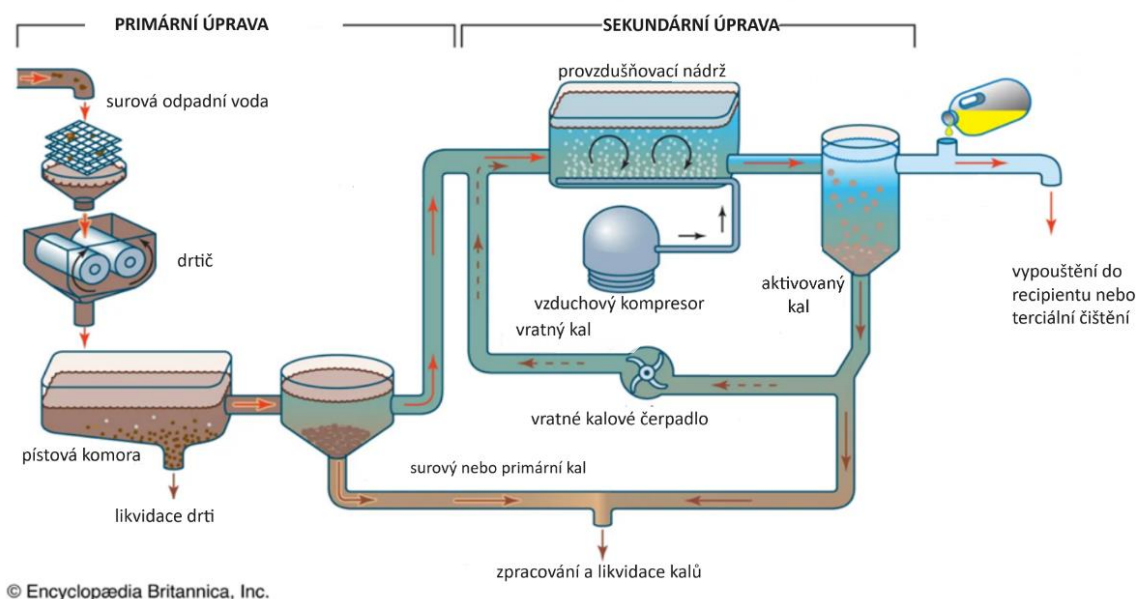
Mezi příznaky nedostatku draslíku u rostlin patří vadnutí, zpomalený růst mladších listů, malé čepele listů a tmavě až modrozelený nebo bronzový kovový lesk listů (Fageria et al., 2010).

3.2 Čistírenský kal

Čistírenský kal je z jedním z konečných odpadních produktů, vznikající v procesu čištění odpadních vod v čistírnách odpadních vod. Proces čištění odpadních vod je kombinací chemických, fyzikálních a biologických procesů odstraňování pevných látek, organických látek a často i živin a kontaminantů z odpadních vod. Pro zlepšení účinnosti čištění existují různé úrovně procesu čištění odpadních vod především primární a sekundární čištění (obrázek č. 2).

Primární (mechanické) čištění je prvním krokem procesu kde jsou odstraněny nerozpuštěné látky, jako je například písek a dřevo. Cílem primárního čištění je odstranění organických a anorganických pevných látek díky fyzikálním procesům jako je sedimentace a flotace. Při primárním čištění je odstraněno přibližně 25–50 % příchozího biochemického kyslíku, 50–70 % celkových nerozpuštěných látek a 65 % mastnoty a olejů (Lyčková, 2009).

Sekundární (biologické) čištění určené pro následné čištění odpadních vod z primárního čištění za účelem odstranění zbytkových organických látek a nerozpuštěných látek. Biologické čištění odpadních vod zahrnuje aerobní, anoxický a anaerobní procesy čištění a využívá rozdílné typy mikroorganismů. Při obou z těchto stupňů čištění vzniká čistírenský kal usazený v nádrži, z které je odebrán do kalového hospodářství (Sonune & Ghate, 2004).



Obrázek 2 Primární a sekundární čištění odpadních vod (Britannica, 2020).

Kal z čistíren odpadních vod je obvykle upravován různými procesy jako je primární zahuštění (gravitační, flotační, sítopásové, centrifugační), stabilizace kapalného kalu (aerobní digesce, anaerobní digesce, přidavek vápna), sekundární zahuštění (gravitační, flotační, sítopásové, centrifugační), úprava vlastností (chemická úprava, termická úprava), odvodnění (sítopásový lis, centrifugace, sušící lože) a finální úprava či aplikace (kompostování, sušení, přidavek vápna, spalování, mokrá oxidace, pyrolýza, dezinfekce, přímá aplikace na půdu) (Kacprzak et al., 2017; Tlustoš, 2021).

Hlavní způsoby využití čistírenských kalů zahrnují spalování, sanitární skládky nebo aplikace na půdu. Kal z čistíren odpadních vod obsahuje cenné organické látky a živiny, jako je dusík a fosfor, takže je užitečný jako hnojivo. Může však obsahovat i kontaminanty, jako jsou těžké kovy nebo jiné chemikálie, se kterými je potřeba pečlivě nakládat.

3.2.1 Stabilizace čistírenského kalu

Stabilizace čistírenského kalu je proces, který snižuje zápach, obsah vody, minimalizuje objem odpadu, zabraňuje šíření patogenů a snižuje následnou degradaci. Stabilizace kalu je důležitá, aby se zabránilo uvolňování skleníkových plynů, znečištění půdy a šíření nemocí přenášených vodou.

Nejběžnější způsoby stabilizace kalů jsou: biologická stabilizace čistírenského kalu (aerobní a anaerobní vyhnívání), chemická stabilizace (přidání chemikálií) a tepelná stabilizace čistírenského kalu (aplikace tepla) (Mei et al., 2020).

Biologická stabilizace čistírenského kalu zahrnuje použití mikroorganismů k rozkladu organické hmoty a snížení obsahu patogenních organismů. Biologická stabilizace je nezbytná pro bezpečné používání čistírenských kalů. Hlavními metodami biologické stabilizace jsou anaerobní, aerobní vyhnívání a kompostování (Kazmierczak, 2012).

Anaerobní vyhnívání kalu probíhá za nepřítomnosti kyslíku a snižuje množství organické hmoty až o 50 %. Proces může být buď termofilní, kdy kal fermentuje při teplotě 55 °C, nebo mezofilní při teplotě kolem 36°C. Anaerobní vyhnívání je biologický proces, který přeměňuje organickou hmotu na bioplyn, který obsahuje asi 50 % – 70 % CH₄, 30 % – 50 % CO₂ a stopové množství dalších plynů. Vzniklý bioplyn s vysokým podílem metanu lze dále využít jako zdroj energie. Anaerobní digesce vytváří z čistírenského kalu pevnou látku, kterou lze použít jako hnojivo pro půdu (Di Capua, et al., 2020).

Aerobní vyhnívání je méně používaná metoda, probíhá za přítomnosti kyslíku. Jedná se o degradaci organické hmoty za pomoci mikroorganismů, které přeměňují organický materiál na oxid uhličitý, vodu a další organické sloučeniny s nízkou molekulovou hmotností. Na rozdíl od anaerobní digesce probíhá aerobní digesce mnohem rychleji, obvykle při teplotě okolí. Je však energeticky náročnější kvůli spotřebě zařízení, jako jsou čerpadla a motory, které do otevřených nádrží přidávají kyslík. Přes svou energetickou náročnost aerobní digesce produkuje relativně stabilní koncový produkt kalu se sníženým obsahem patogenních látek (Shammas & Wang, 2007).

Kompostování je jedna z dalších biologických metod stabilizace čistírenského kalu, která za pomoci mikroorganismů rozkládá organickou hmotu. Kompostování je široce využívaný proces určen k hygienizaci kalů za účelem snížení toxických látek a patogenních organismů s cílem vytvořit stabilní produkt bohatý na živiny. Kompostování je preferovaný způsob stabilizace čistírenského kalu kvůli jeho nízkým nákladům a produkci hodnotného konečného produktu (Kulikowska et al., 2022).

Chemická stabilizace čistírenského kalu zahrnuje přidávání chemikálií do kalu, které snižují obsah vody a množství organického materiálu v kalu. Nejčastěji se přidává vápno, které snižuje obsah vody, neutralizuje pH, minimalizuje zápach a obsah patogenních organismů. Chemickou stabilizaci kalu lze kombinovat s jinými metodami, jako je například anaerobní stabilizace kalu (Kratina, et al., 2021).

Tepelná stabilizace čistírenského kalu probíhá za pomoci tepla a vede ke snížení obsahu vlhkosti a patogenů v kalu. Tento proces je obvykle nezbytným předpokladem pro tepelné zpracování, jako je spalování, pyrolýza a anaerobní digesce. Působením tepla se rozpadnou vložky kalu a buněčné stěny mikroorganismů, uvolní se vázaná voda a výsledkem je odvodněný a biologicky rozložitelný produkt (Myszograj & Płuciennik-Koropczuk, 2023).

3.2.2 Produkce kalu

Produkce čistírenského kalu postupně narůstá ve spojitosti s vzrůstem populace. Produkce kalu v České republice v roce 2022 činila přibližně 197 991 tun sušiny kalu (tabulka č. 1). To při průměrné sušině 25 % představuje přibližně 792 000 t čerstvého kalu. Z tohoto množství bylo přibližně 33 % přímo aplikováno na půdu, 44 % kompostováno, 8 % uloženo na skládky a 11 % bylo spáleno (ČSÚ, 2023).

Množství kalů se odvíjí podle množství a kvality odpadní vody a záleží i na technologiích, které byly použity na jejich vyčištění. Na čistírnách odpadních vod množství vyprodukovaného čistírenského kalu kolísá v závislosti na ročním období. V zimě je produkce kalu vyšší, především díky srážkám a nižší aktivitě mikroorganismů, které způsobují rozklad organické hmoty (Kotovicová & Vaverková, 2012).

Tabulka 1 Produkce čistírenských kalů a způsob jejich využití (ČSÚ, 2023).

Produkce kalů v ČOV a způsob jejich zneškodnění						
Rok	Produkce kalů celkem (v t sušiny)	Způsob zneškodnění kalů (v t sušiny)				
		přímá aplikace a rekultivace	kompostování	skládkování	spalování	jinak
2005	171 888	34 467	88 820	12 027	20	36 554
2010	170 689	60 639	45 528	6 177	3 336	55 009
2011	163 818	61 750	45 985	9 527	3 538	43 018
2012	168 190	51 912	53 222	9 340	3 528	50 188
2013	154 274	54 713	50 384	7 123	3 232	38 822
2014	159 162	47 830	60 511	5 236	3 400	42 185
2015	172 997	63 061	67 065	6 513	2 167	34 191
2016	173 709	62 551	65 163	10 183	4 814	30 998
2017	178 077	75 451	60 930	11 809	4 736	25 151
2018	202 358	88 883	64 515	17 728	19 440	11 792
2019	196 967	90 663	63 462	16 869	15 206	10 767
2020	192 393	63 064	84 747	15 225	21 330	8 027
2021	196 577	66 082	81 903	13 753	23 562	11 277
2022	197 991	63 260	79 777	19 444	25 100	10 410

3.2.3 Nakládání s čistírenskými kaly

Možnosti nakládání s čistírenskými kaly v České republice je možné rozlišit na 5 základních kategorií: kompostování, rekultivace půdy, přímá aplikace v zemědělství, spalování a jiné využití. Kategorie označována jako jiné využití běžně představuje uložení kalů na skládku, za účelem technického zabezpečení skládky. V tabulce č. 1 je uvedena produkce a způsoby nakládání s čistírenskými kaly v České republice v letech 2005–2022.

Evropská unie pracuje na odklonu kalů ze skládek se zaměřením na zvýšení množství čistírenských kalů zpracovávaných kompostováním a spalováním. Dlouhodobý přístup zahrnuje zpracování dvou třetin kalů přímou aplikací v zemědělství nebo kompostováním, přičemž méně než 10 % je stále skládkováno a množství spáleného kalu se postupně zvyšuje. Klade se důraz na využití čistírenských kalů přímo na zemědělské půdy, a to hlavně z toho důvodu že kaly mohou mít pozitivní vliv na půdu, její vlastnosti a na rostliny. Kromě toho je čistírenský kal cenný produkt, protože je bohatý na živiny a organickou hmotu (Wanner, 2019).

Upravené čistírenské kaly mohou být na zemědělské půdě používány podle § 69 odst. 2 zákona č. 541/2020 Sb. pouze při splnění daných podmínek: technických podmínek, přípustného množství kalů použitých na 1 ha a mezních hodnot koncentrací vybraných rizikových látek v kalech stanovených vyhláškou ministerstva.

Podle § 59 odst. 1 písm. f) vyhlášky č. 273/2021 Sb. smí na 1 ha být použito nejvýše 5 t sušiny kalů, popřípadě pokud použité kaly obsahují méně než polovinu limitního množství každé ze sledovaných rizikových látek a prvků, může množství kalů dosáhnout 10 t sušiny kalů na 1 ha.

Dále musí být dodrženy: mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek v zemědělské půdě, mezní hodnoty koncentrací těžkých kovů, které smí být přidány do zemědělské půdy za období 10 let, mikrobiologická kritéria pro použití kalů.

3.2.4 Legislativa

V následující kapitole je uvedena legislativa týkající se kalové problematiky.

- Nakládání s čistírenskými kaly je v České republice upraveno zákonem o odpadech č. 541/2020 Sb. Legislativa vychází ze směrnice 86/278/EHS, která stanovuje limity pro jednotlivé znečišťující látky včetně těžkých kovů v kalech.
- Vyhláška MŽP ČR č. 273/2021 Sb., kterou se stanoví limitní hodnoty koncentrací vybraných nebezpečných látek pro aplikaci upravených kalů na zemědělskou půdu.
- Zákon č. 156/1998 Sb. o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd.
- Vyhláška č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů.
- Vyhláška č. 312/2021 Sb. o skladování a způsobu používání hnojiv.
- Zákon č. 165/2012 Sb. Zákon o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů (zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů).

- Rozhodnutí Rady 2003/33/ES ze dne 19. 12. 2002, kterým se zavádějí kritéria a postupy pro přijímání odpadů na skládky podle článku 16 směrnice 1999/31/ES a její přílohy II.
- Směrnice Rady 91/271/EHS o čištění městských odpadních vod.
- Směrnice Rady 86/278/EHS ze dne 12. června 1986 o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství.

3.2.5 Vlastnosti a složení čistírenského kalu

Čistírenský kal je heterogenní materiál, obsahující směs několika složek jako jsou znečišťující látky, minerální látky, mikroorganismy, celulózu a anorganické látky. Vlastnosti i složení čistírenského kalu se značně liší v závislosti na zdroje a fázi zpracování kalu. Suchý čistírenský kal obsahuje v průměru 50–70 % organické hmoty a 30–50 % minerální složky (Kacprzak et al., 2017).

3.2.5.1 Hodnota pH

Hodnota pH čistírenského kalu se může lišit v závislosti na různých faktorech, včetně složení odpadních vod a příslušných procesů čištění. Většinou se pH hodnota čistírenského kalu pohybuje od hodnoty 7 a výše. Nicméně pH čerstvé odpadní vody se však může lišit, s průměrným rozmezím 7,5–9,5, což ji činí zásaditou. V čistírnách odpadních vod je udržování specifických rozsahů pH zásadní pro optimální účinnost čištění. Například hodnota pH většiny odpadních vod z biochemických nádrží s aerobním čištěním by měla být udržována mezi 6,5 a 8,5, zatímco pro odpadní vody z biochemických nádrží s anaerobním čištěním by měla být hodnota pH udržována mezi 6,5 a 7,5 (Míchal et al., 2019). Hodnota pH čistírenského kalu je důležitým faktorem, který je třeba vzít v úvahu, protože může ovlivnit rozpustnost těžkých kovů a celkovou účinnost procesu čištění (Wei et al., 2019).

Fijalkowski et al. (2018) uvádí, že čistírenský kal snižuje pH půdy, když je aplikován na pudu s alkalickým pH, to souvisí především s acidifikačním efektem organických kyselin v důsledku rozkladu čistírenských kalů v půdě.

3.2.5.2 Hustota čistírenského kalu

Hustota čistírenského kalu se může lišit v závislosti na jeho složení a konkrétních procesech čištění. Hustota pevných látek aktivovaného kalu v různých čistírnách se pohybuje okolo 1 090 kg/m³. Hustota odvodněného kalu je 1 180 kg/m³ a hustota částečně vysušeného čistírenského kalu činí 1 270 kg/m³. Štráfelda et al. (1984) uvádí, že hustota čistírenského kalu je závislá na množství vody v kalu, když tedy snížíme obsah vody hustota čistírenského kalu se zvýší.

3.2.5.3 Makroprvky a mikroprvky

Složení živin v čistírenském kalu je výrazně ovlivněno jak zdrojem čistírenských kalů, tak také výrobní teplotou. Čistírenský kal obsahuje řadu makroprvků, které jsou nezbytnými živinami pro růst rostlin. Mezi tyto makroprvky patří dusík (N), fosfor (P), draslík (K), vápník (Ca), hořčík (Mg) a sodík (Na). Na druhou stranu čistírenský kal obsahuje také různé mikroprvky, jako je železo (Fe), mangan (Mn), měď (Cu), zinek (Zn), nikl (Ni), kobalt (Co) a molybden (Mo). Čistírenské kaly obsahují především dusík a fosfor a v posledních letech je také příznivě hodnocen obsah síry. Zmíněné živiny z čistírenských kalů jsou dobře přístupné pro rostliny, jelikož část živin je přítomno v minerální formě. Tyto živiny mohou být prospěšné pro úrodnost půdy a výživu rostlin, když se čistírenský kal používá jako hnojivo nebo jako doplněk půdy (Dede et al., 2023).

V tabulce č. 2 jsou uvedeny obsahy živin v čistírenských kalech. Obsah živin v kalech je zpravidla vyšší než ve stájových hnojivech, s výjimkou draslíku, kterého je většinou méně než 0,5 % (Černý et al., 2009).

Tabulka 2 Obsahy živin v čistírenských kalech přepočtené na sušinu kalu (Černý et al., 2009).

Živina	1)	2)	3)	4)	5)	6)
N (%)	3,3	2,8	4,8	2,8	2,2	3,7
P (%)	2,5	1,6	2,2	0,8	1,7	2,2
K (%)	0,4	0,3	0,2	0,4	0,5	0,6
Ca (%)	4,9	3,5	3,1	5,7	-	3,0
Mg (%)	-	0,5	0,4	2,3	-	0,8
Fe (%)	1,3	-	-	1,5	-	-
Mn (mg/kg)	-	321,0	-	270,0	226,0	-
Zn (mg/kg)	1202,0	1819,0	705,0	1807,0	731,0	800,0
Cu (mg/kg)	741,0	652,0	511,0	270,0	205,0	263,0
Ni (mg/kg)	42,7	90,0	22,0	64,0	<25	39,2
Mo	9,2	12,7	8,2	-	-	-

1) Sommers (1977)

2) Wang (1997)

3) Stehouver (1999)

4) Bozkurt et Yarilgac (2003)

5) Antolín et al. (2005)

6) Černý et al. (2009)

3.2.5.4 Přístupnost živin z čistírenského kalu

Většina čistírenských kalů je v zemědělství využívána jako zdroj hnojiv, především díky vysokému obsahu fosforu a dusíku, který je snadno dostupný pro rostliny. (Singh et Agrawal, 2008). Kal z čistíren odpadních vod je bohatým zdrojem nezbytných živin pro růst rostlin. Obsahuje dusík, fosfor, draslík, vápník, železo, hořčík, mangan, sodík a zinek. Obsah živin v čistírenském kalu se liší v závislosti na procesu čištění a specifických podmínkách zařízení na čištění odpadních vod (Singh et al., 2022).

Dusík a fosfor jsou nejcennějšími živinami v čistírenských kálech, přičemž asi 10 % celkového dusíku je ve formě amonné, která je dostupná pro rostliny, zatímco zbylých 90 % je přítomna v organických vázaných formách, které musí být rozloženy, než budou dostupné pro rostliny (Černý et al., 2009). Podobně je asi 10 % celkového fosforu v čistírenském kalu přítomno v rozpuštěné vodě a snadno extrahovatelné formě. Z čistíren odpadních vod, které využívají biologické odstraňování fosforu, má kal srovnatelnou přijatelnost fosforu s minerálními hnojivy (Kirchmann et al., 2017). Pokud je ale v čistírnách odpadních vod fosfor odstraňován srážením je přijatelnost fosforu v kalu poměrně nízká. A to z toho důvodu, že fosfor je silně vázán na železo nebo hliník, takže je méně dostupný pro plodiny (Maguire et al., 2001).

Brod et. al. (2016) zjistili, že přístupnost fosforu v kalu je bezprostředně závislá na koncentraci hliníku a železa. V přístupnosti fosforu pro rostliny hraje významnou roli molární poměr Fe/P v čistírenském kalu. Čistírenské kaly získané z procesu biologického odstraňování fosforu a kaly s poměrem Fe/P nižším než 1,6 vykazují větší schopnost přístupnosti a recyklace fosforu než minerální hnojiva NPK. (Kahiluoto et al., 2016).

Ostatní ve vodě rozpuštěné živiny jako je draslík, vápník a hořčík, jsou při čištění odpadních vod odstraňovány méně účinně a koncentrace v čistírenských kálech jsou nižší než v jiných organických hnojivech, a proto lze očekávat, že dostupnost těchto živin pro rostliny bude nižší než u jiných organických hnojiv (Dhanker et al., 2021; Sichler et al., 2022).

Čistírenské kaly však mohou být stále cenným zdrojem živin pro zemědělství, zejména v městských a příměstských oblastech, kde mohou být jiné zdroje organických hnojiv omezené.

3.2.5.5 Těžké kovy

Čistírenský kal může obsahovat těžké kovy, které jsou potenciálně toxické a mohou představovat riziko pro životní prostředí. Těžké kovy jako kadmium (Cd), chrom (Cr), měď (Cu), rtuť (Hg), nikl (Ni), olovo (Pb) a zinek (Zn) se mohou běžně vyskytovat v čistírenských kalech (Černe et al., 2019). Tyto těžké kovy se mohou hromadit v tkáních živočichů, což může být škodlivé jak pro lidské zdraví, tak pro životní prostředí. Vzhledem k rostoucí mobilizaci Cd, Cu, Ni a Zn s poklesem pH je doporučeno aplikovat kal na půdy s pH vyšším než 6,5 (Singh a Agrawal, 2008).

V České republice jsou limity pro těžké kovy v čistírenských kalech stanoveny vyhláškou MŽP ČR č. 273/2021 Sb. Tato vyhláška určuje maximální povolené koncentrace vybraných nebezpečných látek pro aplikaci upravených kalů na zemědělskou půdu. Mezi tyto látky patří arsen (As), kadmium (Cd), chrom (Cr), měď (Cu), rtuť (Hg), nikl (Ni), olovo (Pb) a zinek (Zn) (tabulka č. 3).

Tabulka 3 Mezní hodnoty koncentrací těžkých kovů v kalech.

Riziková látka	Mezní (maximální) hodnoty koncentrací v kalech (mg.kg ⁻¹ sušiny)
As	30
Cd	5
Cr	200
Cu	500
Hg	4
Ni	100
Pb	200
Zn	2500

3.2.5.6 Organické polutanty

Organická znečištění se do kalů dostávají dvěma způsoby: přímým a nepřímým vstupem. Přímý vstup zahrnuje hlavně odpady z průmyslu, domácností a zemědělství. Naopak, nepřímý vstup zahrnuje znečištění, které se dostává do kalů vzduchem a srážkami. Organické látky mají obvykle nepolární a lipofilní vlastnosti, což znamená, že jsou špatně rozpustné ve vodě a spíše se vážou na pevné částice kalu. Čistírenský kal tak může obsahovat různé nebezpečné a toxické organické látky (Fečko, 1999).

Perzistentní organické polutanty (POP)

V čistírenských kalech mohou být přítomny perzistentní organické polutanty (POPs) v důsledku znečištění, které se do těchto zařízení dostává. Mezi tyto látky mohou patřit polyaromatické uhlovodíky (PAH), polychlorované bifenyly (PCB), polychlorované

dibenzodioxiny (PCDD) a polychlorované dibenzofurany (PCDF), halogenované uhlovodíky (AOX) a perfluorované látky (PFAS) (Stevens et al., 2003; Alipour et al., 2022).

V České republice jsou stanoveny limity pro perzistentní organické polutanty prostřednictvím vyhlášky MŽP ČR č. 273/2021 Sb. Tato vyhláška stanovuje maximální povolené koncentrace vybraných nebezpečných látek pro aplikaci upravených kalů na zemědělskou půdu. Mezi tyto látky patří AOX (absorbovatelné organické halogeny), PCB (polychlorované bifenyly) a PAU (polycyklické aromatické uhlovodíky) (tabulka č. 4).

Tabulka 4 Mezní hodnoty koncentrací rizikových organických látek v kalech používaných na zemědělskou půdu.

Riziková látka	Mezní (maximální) hodnoty koncentrací v kalech (mg.kg ⁻¹ sušiny)
AOX	500
PCB	0,6
PAU	10

AOX jsou absorbovatelné organické halogeny; PCB jsou polychlorované bifenyly; PAU jsou polycyklické aromatické uhlovodíky (acenaften, fenantren, fluoren, fluoranten, pyren, benzo(b)fluoranten, benzo(j)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)pyren, benzo(g,h,i)perylen a indeno (1,2,3-c,d)pyren).

Léčiva a hormonální látky

V kalech z čistíren odpadních vod mohou být přítomna léčiva a hormonální látky v důsledku toho, že lidé vylučují léčiva prostřednictvím moči a stolice. Peysson et al. (2013) zjistili přítomnost různých léčiv, jako jsou protizánětlivé látky, regulátory lipidů a antibiotika, stejně jako hormony a jejich konjugáty v odpadních kalech. Santana et al. (2021) prokázali přítomnost aspirinu, analgetik a diklofenaku v čistírenských kalech, přičemž diklofenak je konzumován ve velkém měřítku a nachází se v půdách, na které byly aplikovány čistírenské kaly.

Mikroplasty

Mikroplasty jsou označovány jako různé typy úlomků polymerů o rozdílných velikostech a hustotě (Mintinig et al., 2017). Během procesu čištění odpadních vod se mikroplasty zachycují a dostávají se tak do čistírenských kalů. Mikroplasty se stále mohou dostávat do životního prostředí z čistírenských kalů prostřednictvím dalšího nakládání s kaly. V odpadních vodách se akumulují mikroplasty ve formě tenkých vláken z procesů praní syntetických textilií v domácnostech. Tato vlákna nemusí být efektivně zadržena v kalech, což umožňuje jejich další únik do vodního prostředí. Dalším zdrojem mikroplastů v odpadních

vodách jsou částice z produktů osobní péče, jako jsou exfoliační peelingové masky (Chang, 2015).

3.2.5.7 Patogenní organismy

Kalý mohou obsahovat různé druhy patogenních organismů, jako jsou bakterie, viry, houby nebo prvoci (Kacprzak et al., 2017). Tyto mikroorganismy jsou přítomny ve značném množství v čistírenských kalech a mohou představovat potenciální zdravotní rizika, pokud není kal řádně ošetřen. Infekční dávka pro některé z těchto patogenů se může lišit a mohou přežívat v prostředí po různou dobu v závislosti na podmínkách prostředí. Přítomnost patogenních organismů v čistírenských kalech nese značná rizika z možného propuknutí onemocnění a kontaminace životního prostředí, zejména pokud se kal používá při aplikaci na půdu pro zemědělské účely (Al-Gheethi et al., 2018; Romdhana, et al., 2009).

3.2.6 Vliv čistírenského kalu na fyzikální a chemické vlastnosti půdy

Aplikace čistírenských kalů může mít různé účinky na fyzikální a chemické vlastnosti půdy. Zhu et al. (2022) tvrdí, že přidání čistírenského kalu může vést ke zlepšení produktivity půdy, fyzikálních podmínek a biologických vlastností. Může také dlouhodobě ovlivnit fyzikálně-chemické vlastnosti půdy, zejména ve vztahu ke struktuře půdy a dávkování aplikovaného čistírenského kalu. Kromě toho může přidání čistírenského kalu přispět k dodání živin a zlepšit dostupnost živin pro rostliny, a tím potenciálně zvýšit jejich produktivitu.

Díky aplikaci čistírenského kalu narůstá kationtová výměnná kapacita (KVK) především díky značnému obsahu organické hmoty v kalu (Singh et Agrawal, 2008).

Čistírenský kal zpravidla snižuje pH půdy, to souvisí především s acidifikačním efektem humusových kyselin v důsledku rozkladu čistírenských kalů v půdě (Fijalkowski et al., 2018). Obecně aplikace čistírenského kalu přináší zvýšení retence vody, snižuje její objemovou hmotnost, zvyšuje stabilitu půdních agregátů a hydraulickou vodivost. Po aplikaci kalu na půdu dochází většinou k snadné mineralizaci organického dusíku v kalu, zvýšení mikrobiální respirace a enzymatické aktivity (Albiach et al., 2001). V aplikaci čistírenského kalu na zemědělskou půdu většinou dochází k zvýšení výnosů biomasy, především díky obsahu fosforu a snadno mineralizovatelného dusíku (Singh et Agrawal, 2008).

Je však důležité zvážit potenciální dopad čistírenských kalů na půdu, včetně změn vybraných vlastností, jako je obsah organických látek a dostupnost těžkých kovů. Pokud čistírenský kal obsahuje vyšší množství rizikových prvků, může jeho aplikace vést i k celkové inhibici mikrobiální aktivity v půdě (Singh et Agrawal, 2008).

Před aplikací kalu do půdy je tedy nutné, aby kal byl zbaven co nejširšího spektra uvedených polutantů, je ale důležité, aby kal zároveň obsahoval živiny, které mají pozitivní vliv na půdu, její vlastnosti a na rostliny. Jednou z metod, jak toho dosáhnout, je úprava kalu pyrolýzou.

3.3 Zpracování biomasy a výroba biouhlu

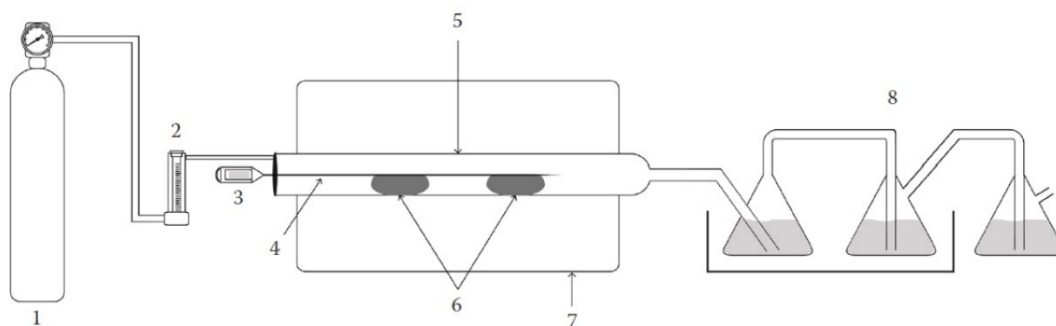
Procesů, díky kterým zpracováváme biomasu je mnoho. Ve většině případu tyto procesy provádíme za účelem získání energie. Procesy rozdělujeme podle teploty, která by vždy měla být nad 50 °C a podle délky trvání. Tepelné procesy lze rozdělit do tří základních kategorií: pyrolýza, zplyňování a spalování.

Pyrolýza je termický proces, při kterém je vstupní látka rozkládána za vysokých teplot nejčastěji v rozmezí 300–1000 °C. Pyrolýza probíhá v omezeném nebo anaerobním prostředí (bez přítomnosti dostatečného kyslíku). Proces pyrolýzy je důležitá thermochemická úprava, kterou lze aplikovat na jakýkoli organický produkt. Vstupní organická hmota je díky pyrolýze přeměněna na tři hlavní složky, a to na nekondenzovatelnou plynnou (pyrolýzní plyn), kondenzovatelnou kapalnou (pyrolýzní olej) a pevnou (biochar neboli biouhel) (Canabarro et al., 2013).

Podmínky, za kterých pyrolýza probíhá mohou podstatně ovlivnit vlastnosti konečného produktu. Teplota pyrolýzy má největší vliv na kvalitu biouhlu. Snížené teploty pyrolýzy a dlouhá doba zdržení vedou k vyššímu výtěžku biouhlu. Je dobře známo, že prodloužená reakční doba podporuje polymeraci, což vede k větší produkci biouhlu. Mírné teploty a krátká doba zdržení obvykle vedou k větší množství kapalin (Yaashikaa et al., 2019). Pohořelý et al. (2017) uvádí, že s rostoucí teplotou pyrolýzy se snižuje produkce biouhlu, obsah dusíku v biobiouhlu, obsah uhlíku v biocharu a dostupnost živin z biocharu do půdy.

Během pyrolýzy dochází ke stabilizaci kalu zároveň organické látky, které jsou obsažené v čistírenském kalu procházejí thermochemickými transformacemi, což způsobí jejich degradaci a vyšší chemickou stabilitu a odolnost vůči mikrobiální degradaci (De Rosa et al., 2018).

Existují různé typy pyrolýzy, které se liší v závislosti na podmínkách, za kterých se proces provádí, můžeme je dělit na tři základní skupiny, a to na pomalou (0,1–1 °C/min), rychlou (10–200 °C/min) a bleskovou (>1000 °C/s) pyrolýzu. Vzhledem k tomu, že každá pyrolýza vytváří různý podíl vedlejších produktů, je důležité pečlivě zvolit proces pyrolýzy, aby bylo dosaženo požadovaného výsledku (Canabarro et al., 2013).



Obrázek 3 Schéma laboratorní aparatury na pyrolýzu čistírenského kalu (Mercl et al., 2020). 1 = zdroj dusíku, 2 = průtokoměr plynu, 3 = teploměr, 4 = sonda teploměru, 5 = křemenná trubice, 6 = keramické misky na vzorky, 7 = elektrická pec, 8 = systém na jímání volatilních látek

Pomalá pyrolýza

Pomalá pyrolýza nazývána jako karbonizace je proces, při kterém je rychlost ohřevu poměrně pomalá a probíhá při nižších teplotách (přibližně 300–500 °C). Jedná se o nejstarší, ale stále používanou metodu zpracování biomasy. Pomalá pyrolýza je v porovnání s ostatními druhy pyrolýzy energeticky nejméně náročná. Břendová et al. (2012) uvádí, že během pomalé pyrolýzy podíl produktů je: 35 % uhlí, 35 % plynu a 30 % pyrolýzní kapalina.

Rychlá pyrolýza

Při rychlé pyrolýze se biomasa zahřeje v krátkém časovém úseku a probíhá při vyšších teplotách (přibližně 500-800 °C). Tento typ pyrolýzy vytváří plyny, kapaliny a uhlíkové produkty, a je často využíván k výrobě kapalných biopaliv a dalších produktů pro energetické a chemické aplikace. Jde o moderní a perspektivní proces, na jehož vývoji se stále pracuje. Během tohoto typu pyrolýzy podíl výsledných produktů je: 13 % uhlí, 12 % plynu a 75 % pyrolýzní kapalina (Kos, 2016).

Blesková pyrolýza

Blesková pyrolýza je velmi intenzivní a rychlý proces, který probíhá za velmi vysokých teplot (přibližně 1000 °C) a velmi krátký čas. Blesková pyrolýza se používá pro získání kapalných produktů (pyrolýzních olejů) jehož zastoupení je v celkovém výtěžku 70 až 80 %. Tento typ pyrolýzy se však setkává se s celou řadou nevýhod. Pyrolýzní olej jako získaný produkt může obsahovat jemné částičky popela a uhlí, a tím je kvalita pyrolýzního oleje výrazně ovlivněna (Canabarro et al., 2013; Basu, 2010).

3.3.1 Produkty pyrolýzy

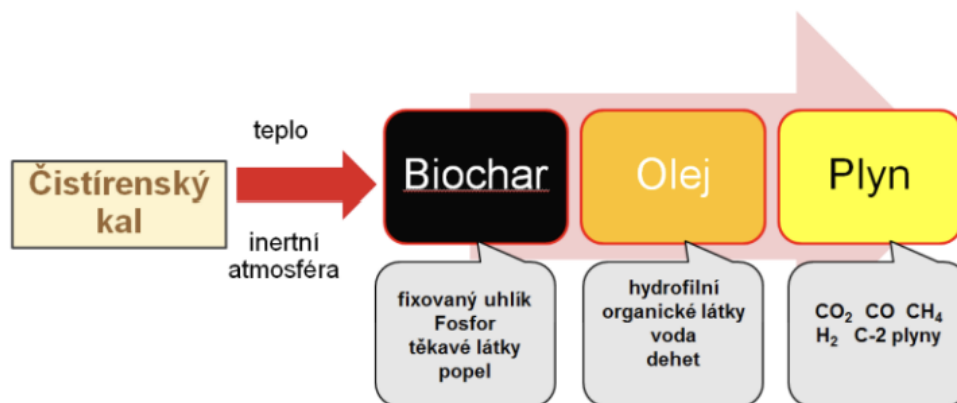
Při pyrolýze vznikají z odpadních materiálů látky nové, jako je vysoce výhřevný plyn bohatý na vodík a metan, pyrolýzní olej nebo také tuhý zbytek známý jako biouhel.

Pyrolýzní plyn je vedlejším produktem pyrolýzního procesu, který zahrnuje tepelný rozklad organických materiálů za nepřítomnosti kyslíku. Pyrolýzní plyn obsahuje základní složky syntézního plynu, jako je oxid uhelnatý, oxid uhličitý a vodík, díky čemuž je vhodný pro energetické aplikace. Složení pyrolýzního plynu se může měnit v závislosti na surovině a specifických podmínkách pyrolýzního procesu. Pyrolýzní plyn je hořlavý plyn, který lze použít k výrobě energie v různých typech zařízení, včetně parních cyklů, plynových motorů a turbín (Pico et al., 2020).

Pyrolýzní olej je obnovitelné kapalné palivo získané zahříváním biomasy bez přístupu kyslíku. Je to druh dehtu, který obsahuje zejména různé uhlovodíky, organické kyseliny, karbonylové sloučeniny s vysokou molekulární hmotností, fenoly, aromatické složky, alifatické alkoholy, kyselinu octovou a vodu. Pyrolýzní olej lze využít jako biopalivo nebo pro výrobu chemikálií (Sekar et al., 2022; Raček et al., 2018).

Biochar, známý také jako biouhel, je pevný a porézní materiál s vysokým obsahem uhlíku, který vzniká částečným spalováním organického odpadního materiálu nebo biomasy za nepřítomnosti kyslíku. Jedná se o stabilní látku, která je bohatá na pyrogenní uhlík a dokáže přežít v půdě tisíce let. Biouhel je černý, vysoce porézní, lehký a má velký povrch, přičemž přibližně 70 % jeho složení tvoří uhlík. Zbývající procenta tvoří dusík, vodík, kyslík a další

prvky, které pozitivně ovlivňují některé půdní vlastnosti. Vlastnosti biouhlu se mohou lišit v závislosti na surovině, procesu tvorby, chlazení a podmínkách skladování (Pariyar et. al., 2020). Biouhel se aktivně využívá ke zlepšení kvality půdy a její úrodnosti, díky vysokému obsahu uhlíku a jeho schopnosti zadržovat vodu. Tuto schopnost mu poskytuje jeho vysoká pórovitost, což umožňuje efektivní retenci živin a vlhkosti v půdním substrátu. (Břendová et al., 2014).



Obrázek 4 Znárodnění produktů pyrolýzy čistírenských kalů (Kos, 2016).

3.4 Biouhel

Biouhel je porézní, uhlíkatý, pevný materiál s vysokým stupněm aromatizace s vysokou odolností proti rozkladu (Rangabhashiyam & Balasubramanian, 2019). V posledních letech si získal značný zájem díky svému všestrannému využití v různých zemědělských a průmyslových činnostech. Biouhly vykazují širokou škálu fyzikálně – chemických charakteristik, což významně ovlivňuje jejich širokou škálu aplikací (Amalina et al., 2022). Nedávné údaje naznačují, že materiál a proces výroby biouhlu značně ovlivňují vlastnosti biouhlu, jako jsou koncentrace elementárních složek, hustota, pórovitost a pH, což ovlivňuje použitelnost biouhlu pro různé aplikace.

Biouhel je v průmyslovém zpracování odpadů využíván k odstranění organických i anorganických znečišťujících látek, stejně jako různých typů barviv a pigmentů z textilních materiálů. (Enaime et al., 2020; Nidheesh et al., 2021). Používá se také v zemědělství ke zlepšení kvality půdy. Snižuje rychlost degradace živin v půdě a zlepšuje její kvalitu. Biouhel lze použít jako palivo pro výrobu energie díky vysokému obsahu uhlíku (Yaashikaa et al., 2020). Biouhel můžeme tedy považovat za zdroj biomasy, která slouží jako vstupní surovina (Raud et al., 2019).

Biouhel má negativní povrchový náboj a porézní strukturu (Amalina et al., 2022). Biouhly s různými stupni hemicelulózy, celulózy a ligninu mohou mít širokou škálu fyzikálně chemických vlastností (Singh et al., 2020).

Mezi primární materiály používané k výrobě biouhlu patří biomasa, komunální odpad, zbytky plodin a hnůj zvířat. Tyto materiály jsou vyrobeny z lignocelulózové i nelignocelulózové biomasy. Lignocelulózová biomasa je vynikajícím zdrojem rostlinných a živočišných složek, včetně zemědělských odpadů, energetických plodin a tuhého komunálního odpadu (Krishnan et al., 2021). Nelignocelulózové biomasy, jako jsou čistírenské kaly,

živočišný odpad a řasy. Tyto materiály představují významné překážky pro kritické řízení a používání kvůli své složitosti a rozmanitým složkám (Amalina et al., 2020).

Senthil & Lee (2020) zjistili, že nelignocelulózová biomasa představuje pro biologický systém větší riziko než lignocelulózová biomasa, kvůli vyšším koncentracím těžkých kovů a heteroatomů, jako je dusík, fosfor a síra. Toxické kovy v nelignocelulózové biomase se mohou rozpouštět ve vodě, což vede ke kontaminaci a akumulaci v potravních řetězcích (Zhou et al., 2020).

3.4.1 Biouhel z čistírenského kalu

Biouhel z čistírenských kalů je stabilní materiál bohatý na uhlík, který lze použít jako doplněk půdy ke zlepšení zdraví půdy, úrodnosti a zadržování vody díky vysokému obsahu uhlíku, ploše povrchu a kapacitě výměny kationtů (Rangabhashiyam et al., 2022)

Biouhel z čistírenských kalů může snížit kyselost půdy, snížit potřebu vápnění a pomoci udržet půdní živiny, což z něj činí cenný doplněk půdy. Obsah živin v biouhlu z čistírenských kalů se liší v závislosti na vstupní surovině a specifických podmínkách procesu pyrolýzy (Junior, 2023).

Biouhel z čistírenských kalů lze také použít pro sekvestraci uhlíku a čištění odpadních vod. Přídavek biouhlu z čistírenských kalů může zlepšit stav mikroorganismů pro dosažení degradace a fixace znečišťujících látek v půdě (Gopinath et al., 2021). Pokud by bylo možné používat je v zemědělství, odpadly by stávající problémy s likvidací čistírenského kalu, a navíc by se stala jeho produkce na čistírnách odpadních vod opět přitažlivá pro sektor zemědělství, jak tomu bylo v minulosti před zprůsněním předpisů o ochraně zemědělské půdy (Šťastný, 2019).

Rangabhashiyam et al. (2022) uvádí, že aplikace biouhlu z čistírenských kalů může zlepšit fyzikální a chemické vlastnosti půdy, snížit emise skleníkových plynů a podpořit růst rostlin. Bylo zjištěno, že biochar z čistírenského kalu je prospěšný zemědělský postup, který zvyšuje úrodnost půdy, snižuje kyselost půdy a zvyšuje dostupnost živin. Aplikace biocharu může také snížit spotřebu chemických hnojiv, což vede k udržitelnějším zemědělským postupům. Obvykle dochází ke zlepšení zadržování a propustnosti vody, a také vzduchu, aplikací biocharu do půdy. Tímto procesem se zároveň přispívá k zachycování uhlíku, který je obsažen v biocharu (Lehmann & Joseph, 2009).

Hailegnaw et al. (2019a) tvrdí že aplikace biouhlu z čistírenského kalu do půdy může významně zvýšit pH půdy a kationtovou výměnnou kapacitu. Taktéž bylo zjištěno, že tato aplikace může snížit vyplavování nitrátů a organického uhlíku z půdního profilu (Hailegnaw et al., 2019b).

Využití biocharu z čistírenského kalu může představovat značná rizika pro životní prostředí a lidské zdraví. Mezi možné nevýhody jeho použití v zemědělství patří kontaminace půdy. Biochar může obsahovat organické kontaminanty a těžké kovy, které mohou znečistit půdu (Ghorbani et al., 2022). Negativní dopady biouhlu, jako je kontaminace půdy, často souvisejí s procesem jeho výroby a podmínkami aplikace. Tyto nevýhody zdůrazňují potřebu dalšího výzkumu a pečlivého zvážení environmentálních a zdravotních důsledků před rozšířením používáním biouhlu z čistírenských kalů v zemědělství (Khan et al., 2013; Rangabhashiyam et al., 2022; Singh et al., 2020).

3.4.2 Využití biouhlu z čistírenského kalu v zemědělství

Biouhel získaný z čistírenských kalů je vhodný jako doplněk půdy pro udržitelné zemědělství. Fyzikální a chemické vlastnosti biouhlu pocházejícího z čistírenských kalů z něj činí atraktivní možnost pro zlepšení půdy, včetně jeho vysoké pórovitosti, plochy povrchu a obsahu živin. Biochar je hnojivo s pomalým uvolňováním, které může snížit migraci iontů rozpustných ve vodě, což z něj činí atraktivní možnost pro sanaci půdy a růst plodin. Po aplikaci biocharu do zemědělské půdy zůstává tento materiál v půdě po několik desítek let a plní uvedené funkce. Hlavním důvodem jeho použití v zemědělství je zlepšení úrodnosti půdy (Pohořelý et al., 2017).

Biouhel je obvykle připravován ve formě pelet, což usnadňuje jeho aplikaci pomocí běžné zemědělské techniky, jako jsou rozmetadla nebo secí stroje. Na jednom hektaru půdy může být použito maximálně 5 tun sušiny kalů. V případě, že obsahují méně než polovinu povoleného množství každé z rizikových látek a prvků, lze použít až 10 tun sušiny kalů na hektar. Stanovení konkrétní dávky by mělo respektovat vlastnosti specifického biouhlu a požadavky zemědělské půdy. Existuje pouze omezený počet vědeckých prací a studií, které se skutečně zabývají dopady aplikace tohoto typu biouhlu na zemědělskou půdu. Informace o případných dopadech této aplikace nejsou dostatečně prozkoumány a chybí legislativní rámec, který by se touto problematikou zabýval.

Na farmě s cherry rajčátky byl aplikován biouhel získaný z čistírenských kalů v množství 10 tun na hektar. Tento biouhel byl získán pyrolýzou při teplotě 550 °C a obsahoval 16 různých kovů a stopových prvků. Půda, do které byl biouhel aplikován, měla špatné vlastnosti kvůli nedostatečné dostupnosti živin. Analýza cherry rajčátek prokázala, že prvky obsažené v biouhlu byly v rajčatech jen v malých množstvích. Některé prvky, jako Se, Pb, Sn, Cr a As, dokonce byly nalezeny pod hranicí detekce. Studie ukázala, že aplikace biouhlu zlepšuje dostupnost fosforu, celkového dusíku a dalších důležitých kationtů. Dále pozitivně ovlivňuje pH půdy a zvýšila produkci plodin o 64 %. Biouhel také pozitivně ovlivnil kvalitu půdy, zvýšil její schopnost zadržovat vodu a vylepšil podmínky pro růst a rozvoj kořenového systému rostlin (Hossain et al., 2010). Hossain et al. (2010) dospěli k závěru, že biouhel z čistírenských kalů má potenciál snížit potřebu používaných hnojiv.

Studie Qian et al. (2015) zkoumala, jak se těžké kovy akumulují v rostlinách po aplikaci biouhlu z čistírenských kalů, a to v závislosti na teplotě pyrolýzy a poměru biouhlu a půdy. Různé varianty biouhlu, získané při různých teplotách, byly použity jako přídatek do půdy pro pěstování česneku. Výsledky ukázaly, že biouhel obsahuje hodně živin a zvyšuje výnosy rostlin. V česneku se těžké kovy akumulovaly hlavně v kořenech a cibulkách, zejména Zn a Cu. Tato akumulace rostla s délkou pěstování. Biouhel získaný při teplotě 450 °C a aplikovaný v poměru 1:4 (20 % pozn.) měl pozitivní vliv na růst česneku a dosáhl vyšších výnosů než referenční půda. Obsah těžkých kovů byl nejnižší ve srovnání s biouhly získanými při jiných teplotách. Tyto výsledky naznačují, že volba správné teploty pyrolýzy může ovlivnit akumulaci těžkých kovů v rostlinách.

Je však důležité zvážit potenciální dopad biocharu z čistírenských kalů na půdu a životní prostředí, včetně potenciálního uvolňování těžkých kovů a dalších kontaminantů. Proto je nezbytné pečlivé monitorování a řízení, aby bylo zajištěno, že aplikace biocharu z čistírenského

kalu nepovede k nepříznivým účinkům na životní prostředí nebo lidské zdraví. (Ghorbani et al., 2022).

3.4.3 Pozitivní vliv biouhlu

Biouhel hraje důležitou roli v zajištění dostupnosti živin v půdě, i když jsou některé z těchto živin omezeny. Při jeho aplikaci dochází k několika procesům, které přispívají k pozitivním účinkům na půdní živiny (Pandit et al., 2018).

Biouhel obsahuje živiny, jako jsou dusík (N), fosfor (P), draslík (K), vápník (Ca), hořčík (Mg), síra (S) a různé mikroživiny. Tyto živiny mohou být uvolňovány do půdy, což má klíčový vliv na její obohacení. Každá z těchto živin má různou rychlost uvolňování, která je ovlivněna jejich dostupností. Některé studie naznačují, že biouhel ovlivňuje dostupnost dusíku (N), fosforu (P) a draslíku (K) v půdě (Esposito, 2013). Celkové množství těchto živin není zcela spojeno s jejich dostupnými formami pro rostliny, jako jsou amonné kationty (NH_4^+), dusičnany (NO_3^-), fosforečnany (PO_4^{3-}) a draslík (K), ale tyto formy mají vzájemný vztah. Byl pozorován nárůst dostupných forem dusíku, zejména amoniaku (NH_3) (Lehmann et al., 2003; Novak et al., 2009a).

Biouhel je známý svou schopností zadržovat živiny, což z něj činí užitečný materiál pro zlepšení půdních vlastností. Tato vlastnost je zvláště výhodná v oblastech s nedostatkem srážek, kde biouhel pomáhá zvýšit schopnost půdy udržet vodu. Navíc biouhel snižuje koncentraci toxického hliníku v půdě, což má pozitivní dopad na růst rostlin. Studie naznačují, že biouhel může být také účinný při zadržování fosforu z aplikovaných hnojiv, čímž pomáhá minimalizovat jeho ztráty do životního prostředí (Major et al., 2010; Martinsen et al., 2014).

Biouhel má také schopnost regulovat výměnu kationtů v půdě, což zvyšuje její kapacitu zadržovat živiny a podporuje retenci a adsorpci živin z aplikovaných hnojiv. Dále ovlivňuje pH půdy, snižuje její kyselost a tím zlepšuje dostupnost živin. Zlepšení vztahu mezi fosforem a hliníkem je pozorovatelné při zlepšení pH. Aplikace biouhlu má také vliv na mikroorganismy v půdě; dochází ke změnám v jejich metabolismu, což vede k úpravám koncentrace dostupných živin (Pandit et al., 2018).

4 Metodika

4.1 Charakteristika použitých půd

Pro ověření možnosti uvolňování živin z biouhlu z čistírenského kalu do rostlinné biomasy byly využity dvě půdy s odlišnými charakteristikami. Oba vzorky byly odebrány z orné půdy z hloubky 0–20 cm. Po odběru byla půda nejprve vysušena na vzduchu, následně manuálně homogenizována a proseta přes síto s velikostí otvorů 10 mm.

První vzorek pocházel z obce Žamberk (50° 8' 38.102" N, 16°30' 51.351" E) a druhý z obce Cítov (50° 23' 00.6" N, 14° 25' 09.9" E) v České republice. Půda Žamberk byla klasifikována jako kambizem, což je nejběžnější typ půdy v této oblasti. Měla kyselé pH s hodnotou 5,2. Naopak půda Cítov byla fluvizem, typická pro údolní nivy řek, s pH hodnotou 7,2.

Tyto půdní typy se liší jak svou chemickou povahou, tak i geografickým kontextem. Kambisoly jsou obecně úrodné a vhodné pro zemědělské využití, avšak mohou vyžadovat úpravy v případě kyselého prostředí, jako je aplikace vápníku. Naopak fluvisoly jsou formovány sedimentací říčních toků a mohou vykazovat různé vlastnosti v závislosti na konkrétní lokalitě, ale jsou náchylnější k erozi a degradaci, zejména v případě povodní a intenzivních srážek.

4.2 Pyrolýza čistírenského kalu

Byl odebrán vzorek čistírenského kalu z komunální čistírny odpadních vod v České republice s ekvivalentem obyvatel (EO) 170 000. Hodnota pH čistírenského kalu dosáhla 6,6, obsah sušiny kalu byl 37,8 % a obsah popela činil 37,4 %. Čistírenský kal byl stabilizován anaerobním procesem, který probíhá za nepřítomnosti kyslíku. Poté byly vzorky sušeny na vzduchu při 105 °C, dokud nebylo dosaženo konstantní hmotnosti. Následně byl veškerý vysušený čistírenský kal rozemlet a protlačen 1 mm nerezové síto před použitím výroby.

Následně byly připraveny vzorky biouhlu ze sušiny pomocí pyrolýzy při teplotě 500°C. Tyto vzorky biouhlu byly označeny jako SSBC-500. Pyrolýza vzorků probíhala v inertní atmosféře pomocí laboratorní trubkové pece (GHA 12/600, Carbolite Gero Ltd., Hope, UK). Vzorky SS byly vloženy do válcové trubice vyrobené z křemene, která byla připojena k proudu dusíku a umístěny do předehřáté pece. Vzorek byl ponechán v peci (obrázek č. 3) po dobu 30 minut poté, co dosáhla cílové teploty v křemenné trubici. Po každém pyrolýzním experimentu byla křemenná trubice vysunuta z ohřívací zóny a následně ochlazená na pokojovou teplotu. Dusík s čistotou 99,99 % byl dodáván do systému s průtokem 100 l/h, což poskytovalo vypočtenou lineární průtokovou rychlost za studena pro prázdnou trubku reaktoru 1,9 cm/s (Mercl et al., 2020).



Obrázek 5 Elektrická pec na laboratorní pyrolýzu čistírenského kalu (Mercl et al., 2020).

Tabulka 5 Celkový obsah prvků v odpadních materiálech se směrodatnou odchylkou.

Odpadní materiál		Hmotnost [mg]	N [%]	C [%]	H [%]	S [%]	C/N	C/H
SS	Průměr	19,30	2,78	34,60	3,46	1,93	12,45	10,01
	±	0,91484	0,01	0,21197	0,07998	0,19394	0,09553	0,17566
SSBC-500	Průměr	22,12	1,85	20,15	0,56	3,01	10,88	36,02
	±	4,03635	0,06807	0,23352	0,01858	0,03137	0,2607	0,86421

Tabulka č. 6 obsahuje celkové obsahy nejdůležitějších prvků v biouhlu z čistírenského kalu (SSBC) a jejich obsah v samotném čistírenském kalu (SS). Všechny makroživiny jsou vyjádřeny v %. Tyto údaje jsou důležité pro srovnání obsahu prvků v biouhlu s původním materiálem a pro analýzu vlivu biouhlu na půdní vlastnosti a růst rostlin.

4.3 Nádobový experiment

V rámci mé diplomové práce proběhl nádobový experiment, který byl prováděn od 28. dubna do 17. července pro půdu v Žamberku a od 28. dubna do 31. července pro půdu v Cítově. Experiment se konal v litrových nádobách umístěných ve skleníku katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin FAPPZ, ČZU v Praze. Cílem bylo zkoumat schopnost biouhlu uvolňovat živiny, především fosfor a dusík, z čistírenského kalu aplikovaného na půdu pro rostliny.

Pro tento modelový experiment bylo použito 48 jedno litrových nádob, které byly očíslovány. Do každé nádoby byla přidána vzduchem usušená zemina prosátá přes 10 mm ocelové síto. Polovina, tedy 24 nádob obsahovala půdu odebranou z orničního horizontu v okolí obce Žamberk. Druhá polovina nádob obsahovala zeminu odebranou z orničního horizontu půdy pocházející z blízkosti obce Cítov.

SSBC-500 byl důkladně promíchán s půdou před aplikací do květináčů. Aplikovaná dávka biouhlu činila 0,25 % hm. Všechny květináče s výjimkou kontrolních byly před setím hnojeny dusíkem v dávce 50 mg N na kg půdy ve formě vodného roztoku NH_4NO_3 . Vodný roztok KCl byl aplikován do květináčů s trojitým superfosfátem označeny jako TSP ve vyváženém množství K, které bylo vypočteno na základě dostupného obsahu K v SSBC-500 vidíme v tabulce č. 7.

Tabulka 6 Použité varianty a množství dodaných živin na nádobu.

Varianta	Kontrola	Kontrola + N	TSP	SSBC-500
Zemina (g)	976,3	976,3	974,8	968,1
Materiál (g)	-	-	1,42	6,91
N v podobě NH_4NO_3 (mg)	-	48,81	48,74	48,40
K v podobě KCl (mg)	-	-	17,27	63,4
P (mg)	-	-	293,2	293,2

Do každého květináče bylo zaseto deset neošetřených semen ječmene jarního a rostliny byly redukovány na pět, jakmile se na každé rostlině objevil třetí list. Pozice květináčů byly každý týden randomizovány.

Nadzemní biomasa rostlin ječmene jarního byla sklizena v plné zralosti 94. den po setí pro půdu Žamberk a 108. den pro půdu Cítov, následně byla sušena po dobu dvou týdnů při 60 °C a zvážena. Rostliny ječmene jarního byly rozděleny na zrno a stéblo s listy (obrázek č. 7). Po oddělení byly vzorky zváženy na váze s přesností na desetinu gramu a namlety laboratorním mlýnkem (obrázek č. 6) pro účely analýzy. Po usušení nadzemní biomasy ječmene byl zjišťován jeho výnos. Výtěžek suché biomasy byl vypočítán v gramech na nádobu a použit pro statistickou analýzu.



Obrázek 6 Laboratorní mlýnek, zdroj: autorka práce



Obrázek 7 Oddělené zrno a plevy, zdroj: autorka práce

4.4 Analytické metody

4.4.1 Měření hodnoty pH

Vzorky byly nejprve smíchány s roztokem CaCl_2 o koncentraci $0,01 \text{ mol/l}$ v poměru $1/5$ w/v. Pro dosažení homogenity byla směs vzorků míchána v horizontální třepačce po dobu dvou hodin při rychlosti 180 úderů za minutu. Po této fázi byly vzorky ponechány na usazení po dobu jedné hodiny. Následně bylo pH každého vzorku měřeno pomocí pH metru řady Sentron SI.

4.4.2 Digesce rostlinného materiálu

Pro určení obsahu živin byly vzorky nejprve převedeny do roztoku pomocí mikrovlnného procesu. Sušená a namletá biomasa (cca 0,5 g) byla vážena do teflonových kyvet o objemu 90 ml. K této biomase byla přidána koncentrovaná kyselina dusičná (HNO_3) (65 % obj./obj.) a peroxid vodíku (H_2O_2) (30 % obj./obj.). Následně byly vzorky zpracovány štěpením v mikrovlnném digesčním systému ETHOS 1 (MLS, Leutkirch, Německo). Po vychladnutí rozloženého vzorku byl vzniklý mineralizát naředěn demineralizovanou vodou do objemu zkumavky 25 ml a následně byl promíchán. Obsahy prvků byly stanoveny emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES, Agilent 720, Agilent Technologies Inc., Santa Clara, CA).

4.4.3 Stanovení H, C, N, S

Ke stanovení množství neminerálních prvků, jako jsou C, N a H, byl použit analyzátor Vario Macro (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Německo).

4.4.4 Stanovení přístupného obsahu fosforu

Pro stanovení přístupného obsahu fosforu byla použita metoda extrakce pomocí roztoku s koncentrací 0,5 mol/l NaHCO_3 (1:20 w/v) po dobu 16 hodin, následovaná centrifugací. Tato metoda extrakce umožňuje určit množství fosforu, které je v půdě vázáno v dostupné formě, tedy fosfor, který je snadno dostupný pro rostliny. Princip této metody spočívá v tom, že NaHCO_3 působí jako extrakční činidlo, které dokáže extrahovat vázaný fosfor z půdní matrici. Konkrétně bylo do 125 ml baňky přeneseno 2,5 g vzorku, který byl předtím vysušený vzduchem a rozemletý tak, aby prošel sítím o velikosti 2 mm. K tomuto vzorku bylo přidáno 50 ml roztoku extrakčního činidla NaHCO_3 s koncentrací 0,5 mol/l a tento proces byl proveden při pokojové teplotě. Následovalo třepání (centrifugace) po dobu 30 minut na třepačce s pohyblivým ramenem při rychlosti 120 otáček za minutu. Poté byl extrakt filtrován do čistých vzorkovnic prostřednictvím středně retenčního filtračního papíru. Po provedení extrakce byl obsah fosforu stanoven pomocí metody ICP-OES.

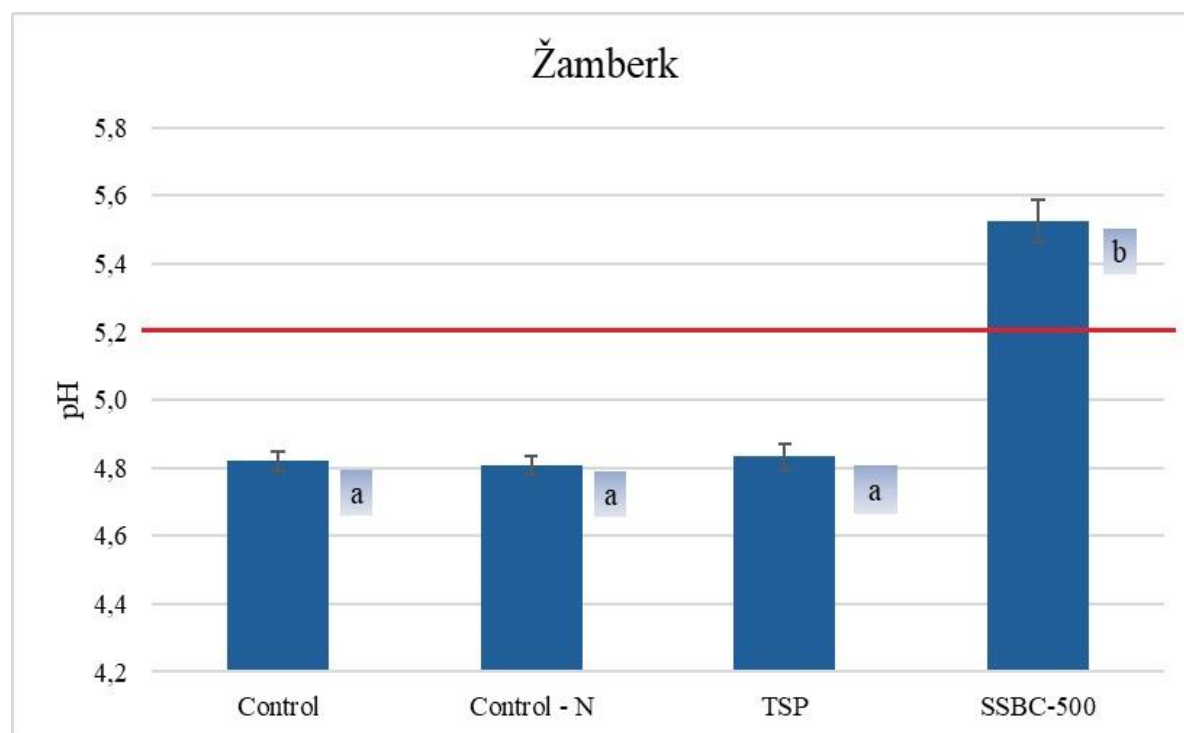
4.4.5 Zpracování a statistické vyhodnocení výsledků

K vyhodnocení výsledků byla využita kombinace softwaru Microsoft Excel 2021 (Microsoft, USA) a statistického nástroje Statistica 12 (StatSoft, USA). V těchto programech byly získané údaje zpracovány a analyzovány. Pro každou sadu dat byly vypočteny průměry a směrodatné odchylky. Následně byly provedeny jednofaktorové analýzy rozptylu, doplněné post hoc testem (Tukeyův HSD test) na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Zjištěné statisticky významné rozdíly byly graficky zaznamenány a prezentovány pomocí příslušných písmen vytvořených v grafech.

5 Výsledky

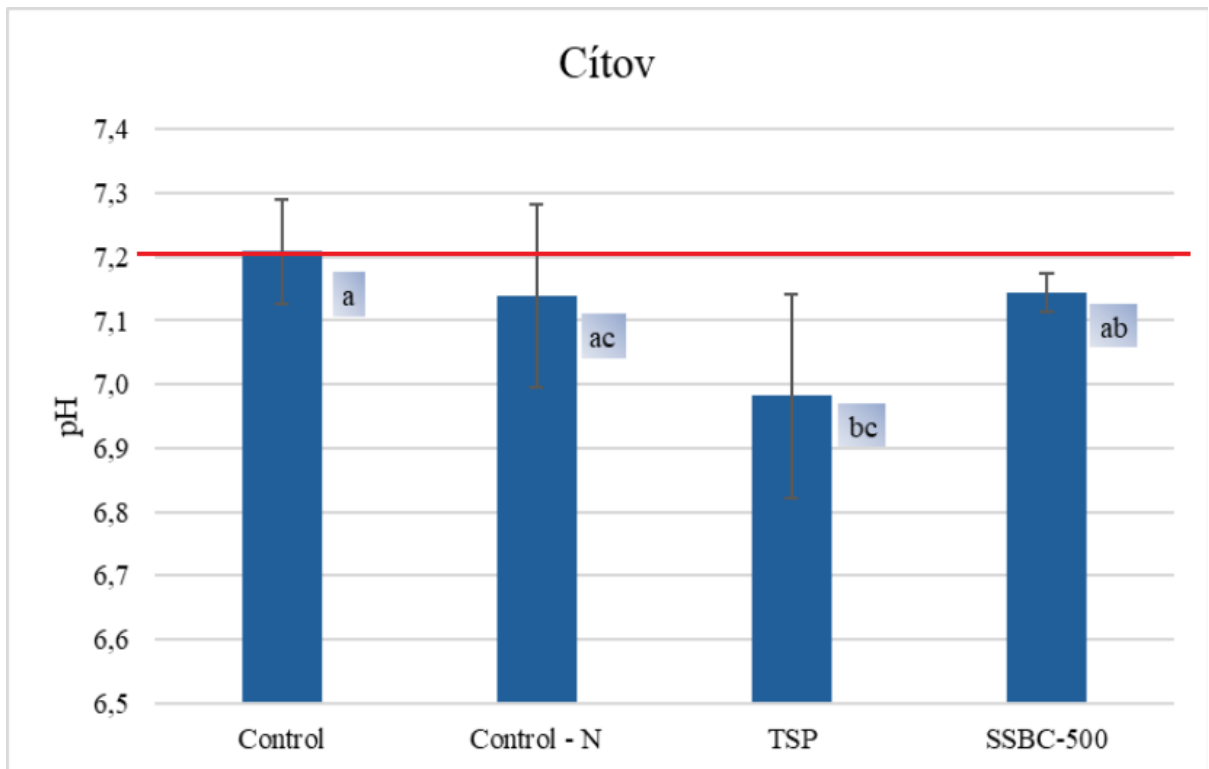
5.1 Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na změnu hodnoty pH půdy

Počáteční hodnota pH na půdě Žamberk byla 5,2. Graf č. 1 zobrazuje výsledné hodnoty naměřeného pH na půdě Žamberk. Nejvyšší hodnota pH byla zaznamenána při použití SSBC-500 ($5,5 \pm 0,1$), což představuje zvýšení pH ve srovnání s počáteční hodnotou. U kontrolní varianty, varianty s přidáním dusíku a TSP byla hodnota pH nižší než počáteční hodnota pH na půdě Žamberk, přičemž mezi těmito variantami nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl.



Graf 1 Hodnota pH na půdě Žamberk - Rozdílná písmena udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami ($P < 0,05$). Červená čára zobrazuje počáteční hodnotu pH půdy.

Na půdě Cítov byla počáteční hodnota pH 7,2. Na grafu č. 2 jsou zobrazeny výsledné hodnoty pH na této půdě. Kontrolní varianta dosáhla stejných výsledků pH jako byla naměřena počáteční hodnota pH na půdě Cítov ($7,2 \pm 0,1$). Hodnota pH se u kontrolní varianty s přidáním dusíku nepatrně snížila ($7,1 \pm 0,1$), stejně jako při použití SSBC-500 ($7,1 \pm 0,1$), avšak mezi těmito variantami nebyl statisticky významný rozdíl. Při použití TSP se hodnota pH snížila více v porovnání s počáteční hodnotou ($6,9 \pm 0,2$), mezi TSP a SSBC-500 nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl.

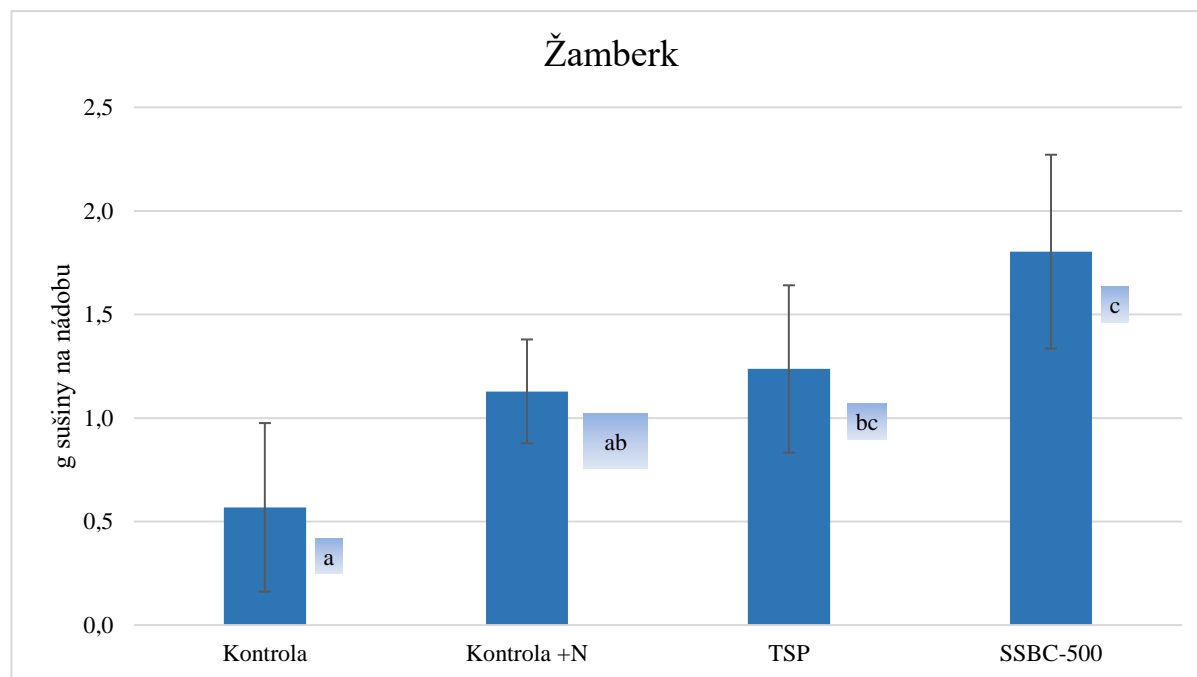


Graf 2 Hodnota pH na půdě Cítov - Rozdílná písmena udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami ($P < 0,05$). Červená čára zobrazuje počáteční hodnotu pH půdy.

5.2 Výnos ječmene jarního

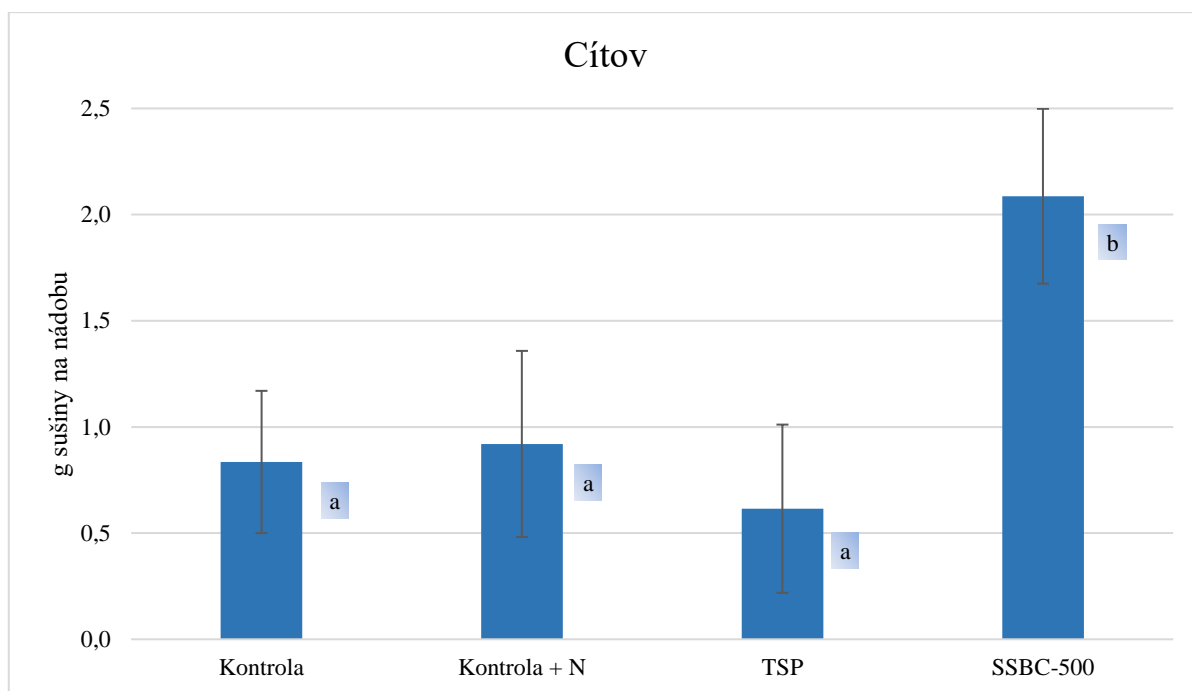
5.2.1 Výnosy zrna ječmene jarního

Graf č. 3 zobrazuje výnos zrna ječmene jarního na půdě Žamberk. Nejvyšší výnos zrna byl dosažen při použití biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500) ($1,8 \pm 0,4$) g/nádoba a trojitého superfosfátu (TSP) ($1,2 \pm 0,4$) g/nádoba. Mezi těmito dvěma typy hnojiv nebyl statisticky významný rozdíl. Nejnížší hodnoty výnosu zrna byly zaznamenány u kontrolní varianty ($0,6 \pm 0,4$) g/ nádoba a kontrolní varianty s přidavkem dusíku ($1,1 \pm 0,2$) g /nádoba.



Graf 3 Výnos zrna ječmene pěstovaného na půdě Žamberk - Rozdílná písmena udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami ($P < 0,05$).

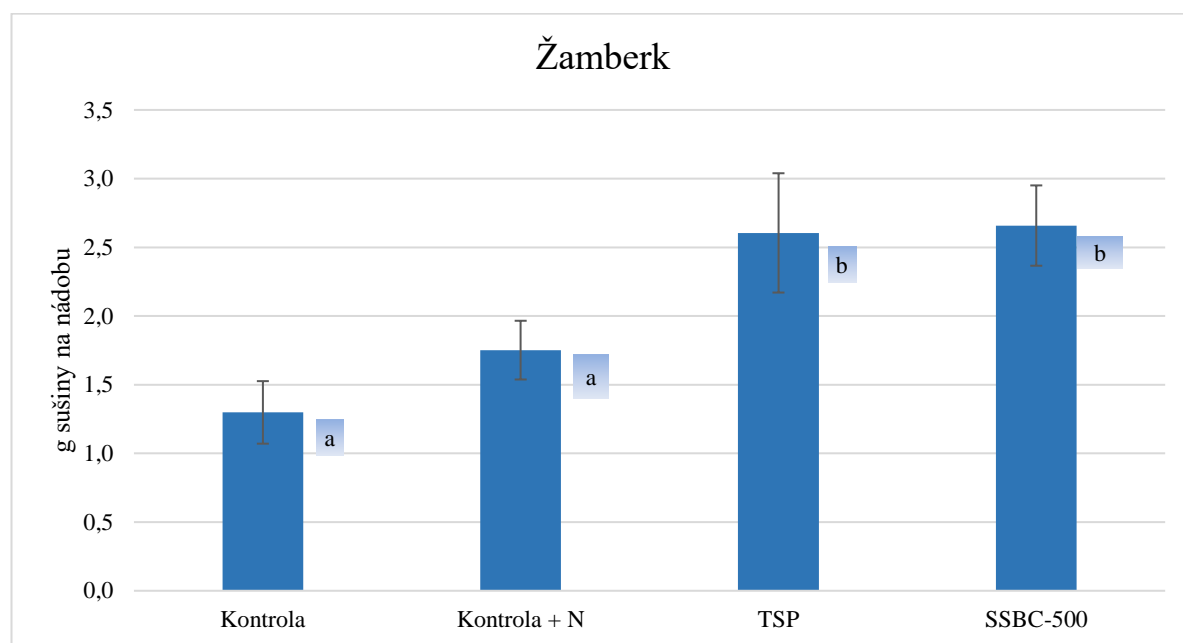
V grafu č. 4 je znázorněn výnos zrna ječmene jarního na půdě Cítov. Nejvyšší výnos zrna byl zaznamenán u varianty s biouhlem z čistírenského kalu (SSBC-500) ($2,1 \pm 0,4$) g/nádoba. Mezi použitím biouhlu SSBC-500 a zbývajícími variantami byl zjištěn statisticky významný rozdíl. Nejnižší hodnoty výnosu zrna byly zaznamenány u kontrolní varianty ($0,8 \pm 0,3$) g/nádoba, u kontrolní varianty s přidavkem dusíku ($0,9 \pm 0,4$) g/nádoba a u varianty s použitím trojitého superfosfátu (TSP) ($0,6 \pm 0,3$) g/nádoba. Mezi těmito variantami nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl.



Graf 4 Výnos zrna ječmene pěstovaného na půdě Cítov - Rozdílná písmena udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami ($P < 0,05$).

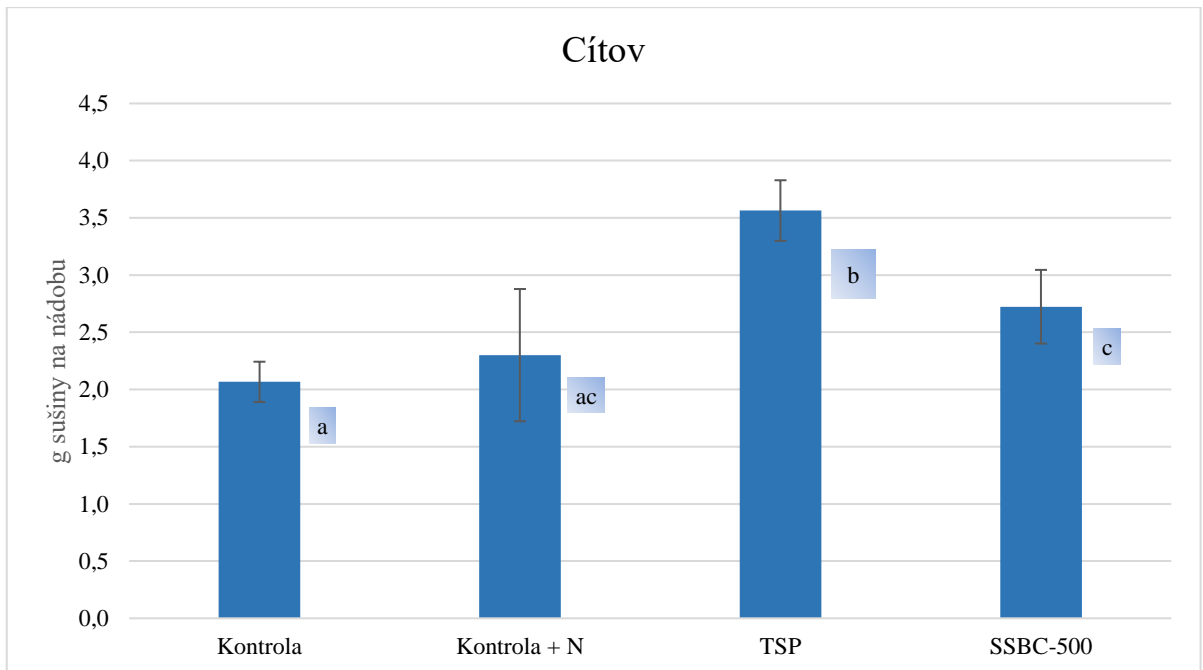
5.2.2 Výnosy slámy ječmene jarního

V grafu č. 5 jsou znázorněny výnosy slámy ječmene jarního na půdě Žamberk. Nejvyšší hodnoty výnosů slámy byly dosaženy při použití biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500) ($2,7 \pm 0,2$) g/nádoba a při použití trojitého superfosfátu (TSP) ($2,6 \pm 0,4$) g/nádoba. Mezi těmito variantami nebyl zjištěn žádný statisticky významný rozdíl. Nejnižší výnos slámy byl zaznamenán u kontrolní varianty ($1,3 \pm 0,2$) g/nádoba a u kontrolní varianty s přidáním dusíku ($1,8 \pm 0,2$) g/nádoba a mezi těmito dvěma variantami nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl.



Graf 5 Výnos slámy u půdy Žamberk - Rozdílná písmena udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami ($P < 0,05$).

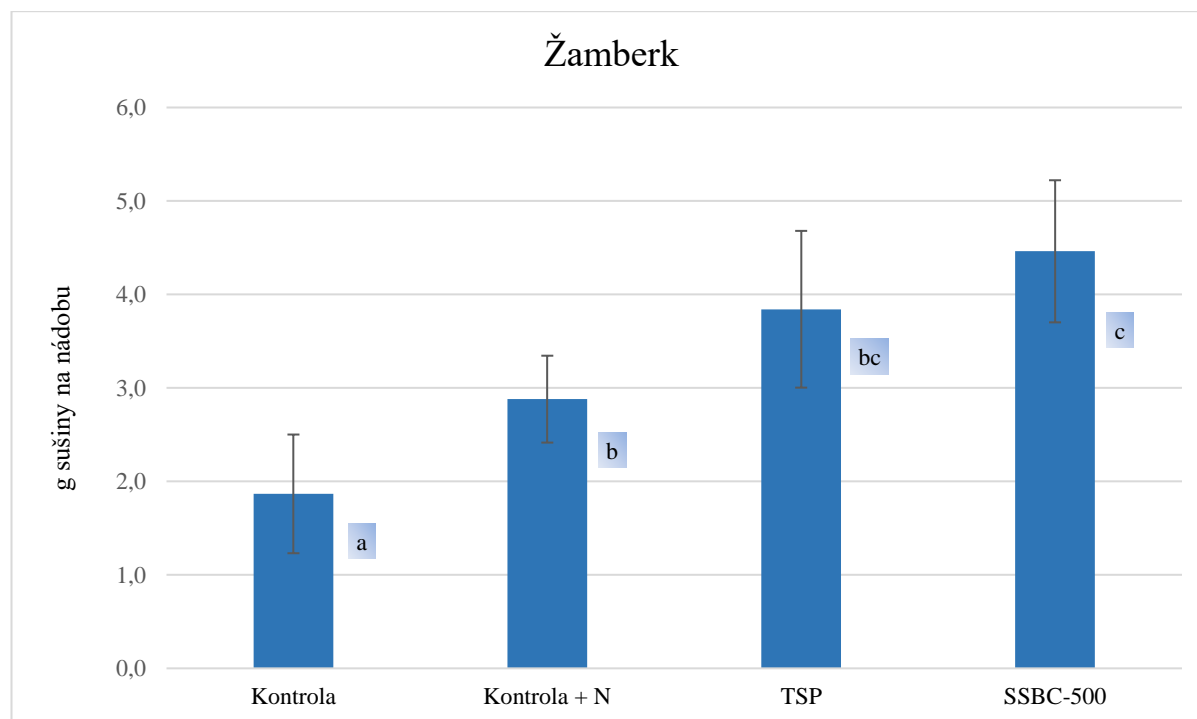
V grafu č. 6 jsou znázorněny výnosy slámy na půdě Cítov. Nejvyšší hodnoty byly pozorovány u varianty s trojitým superfosfátem (TSP) ($3,6 \pm 0,3$) g/nádoba, a tato hodnota je statisticky odlišná v porovnání s ostatními variantami. Střední hodnotu dosáhla při použití biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500) ($2,7 \pm 0,3$) g/nádoba. Nejnižšího výnosu dosáhla kontrolní varianta ($2,0 \pm 0,2$) g/nádoba a varianta s přidáním dusíku ($2,3 \pm 0,5$) g/nádoba, přičemž mezi těmito variantami nebyl zjištěn žádný statisticky významný rozdíl. V porovnání s výnosem zrna byl průměrný výnos slámy vyšší.



Graf 6 Výnos slámy u půdě Cítov - Rozdílná písmena udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami ($P < 0,05$).

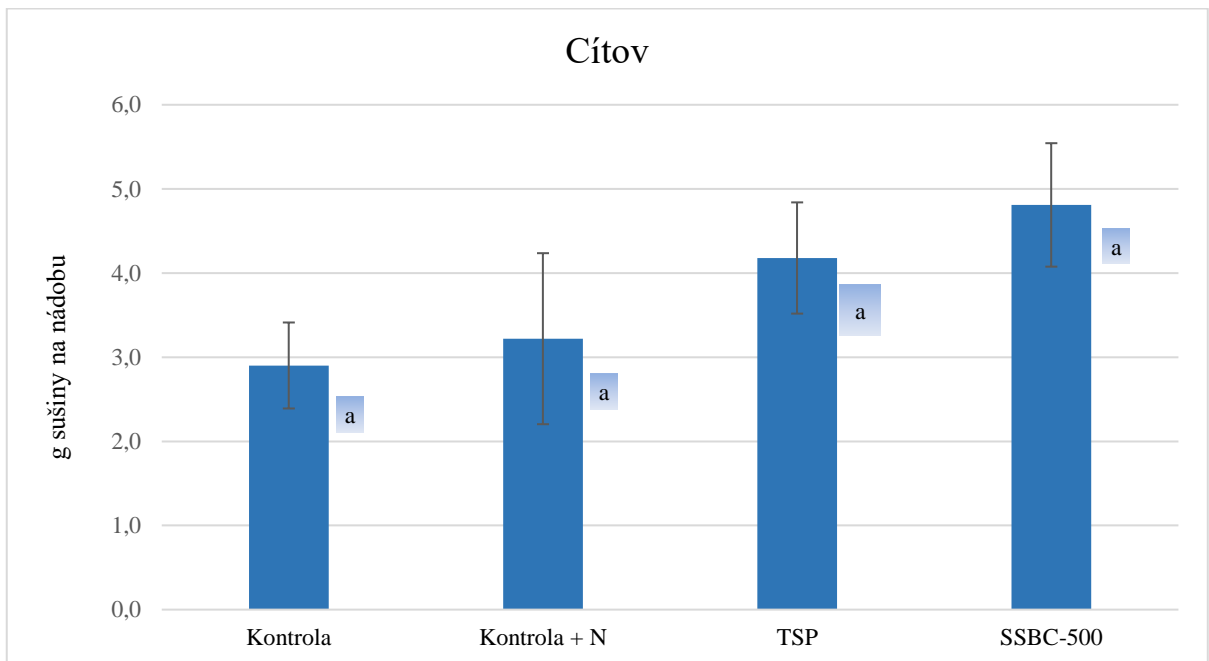
5.3 Celkový výnos ječmene jarního

Celkový výnos nadzemní biomasy ječmene jarního na půdě Žamberk můžeme vidět v grafu č. 8. Nejvyšších výnosů biomasy ($4,5 \pm 0,7$) g/nádoba jsme dosáhli při použití biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500) a při použití trojitého superfosfátu (TSP) ($3,8 \pm 0,8$) g/nádoba, mezi SSBC-500 a TSP není statisticky významný rozdíl. Středních hodnot dosáhla kontrolní varianta s přidáním dusíku ($2,8 \pm 0,4$) g/nádoba. Nejnižších výnosů biomasy ječmene jarního bylo dosaženo u kontrolní varianty ($1,9 \pm 0,6$) g/nádoba, která byla nehnojená.



Graf 7 Celkový výnos ječmene jarního na půdě Žamberk - Rozdílná písmena udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami ($P < 0,05$).

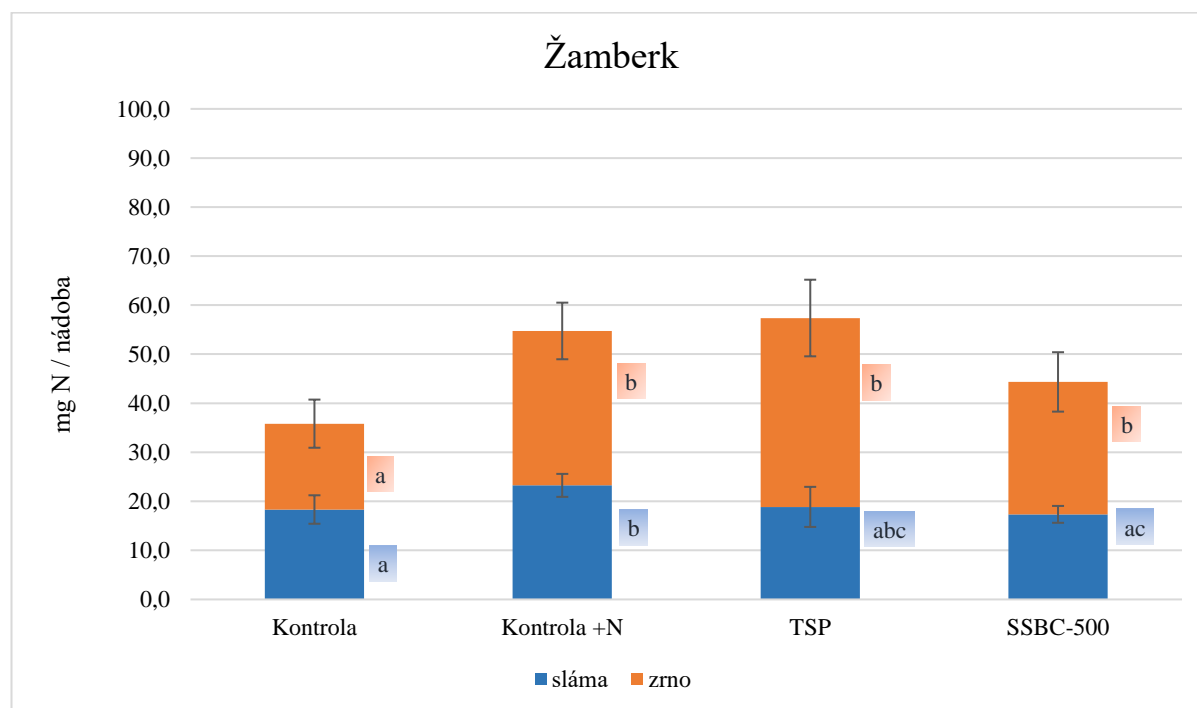
Celkový výnos nadzemní biomasy ječmene jarního na půdě Cítov můžeme vidět v grafu č. 8. Nejvyšší výnos biomasy byl dosažen u varianty hnojené biouhlem z čistírenského kalu (SSBC-500) ($4,8 \pm 0,7$) g/nádoba. Jednotlivé varianty mezi sebou nevykazují žádné statisticky významné rozdíly. Ať už byl ječmen hnojený nebo ne, nebyl v produkci biomasy zjištěn průkazný rozdíl.



Graf 8 Celkový výnos ječmene jarního na půdě Cítov - Rozdílná písmena udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami ($P < 0,05$).

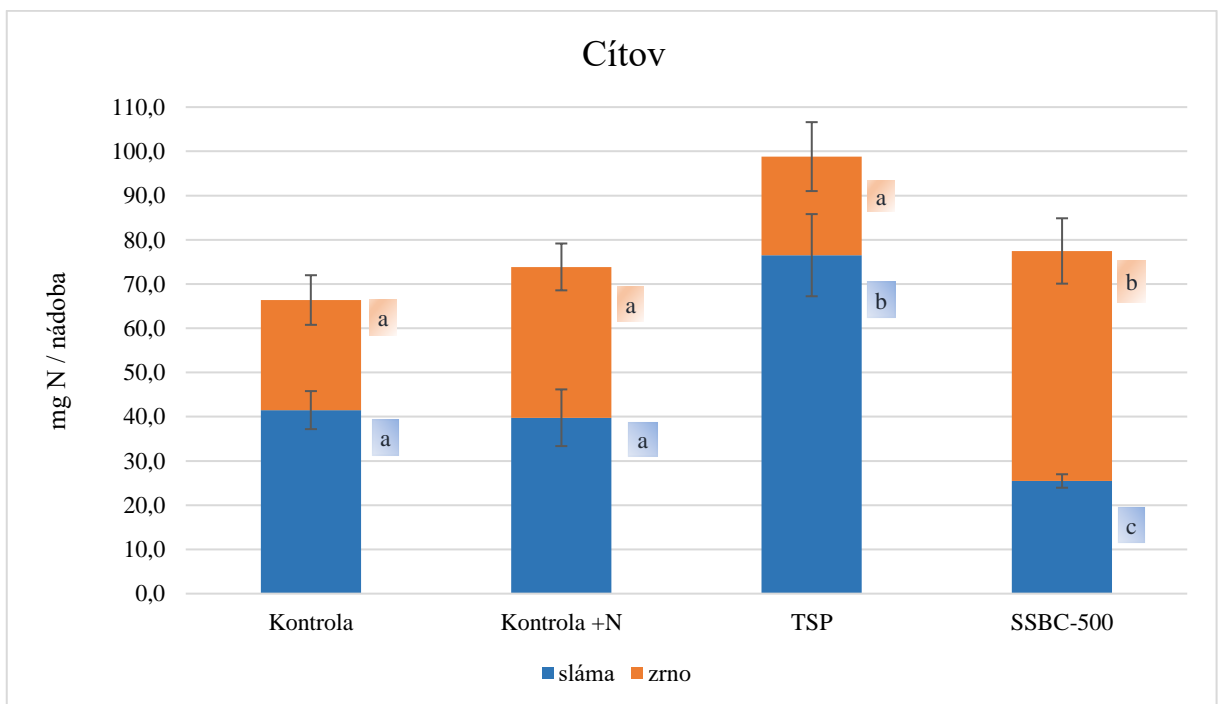
5.4 Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na odběr dusíku (N) rostlinou

Výsledky prezentované v grafu č. 9 ukazují odběr dusíku slámou a zrnem ječmene jarního v půdě Žamberk. Z grafu lze vyčíst, že nejnižší celkový odběr dusíku byl zaznamenán u kontrolní varianty ($37,0 \pm 7,8$) mg/nádoba a u biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500) ($44,3 \pm 7,7$) mg/nádoba. Statistická analýza ukázala, že odběr dusíku ve variantě hnojené trojitým superfosfátem (TSP) ($57,4 \pm 11,9$) mg/nádoba se přibližuje odběru dusíku v kontrolní variantě s přidavkem dusíku ($54,7 \pm 8,1$) mg/nádoba. Souhrnem lze konstatovat, že podle grafu 9 je hnojení biouhlem z čistírenského kalu (SSBC-500) pro odběr dusíku na této kyselé půdě méně prospěšné než hnojení trojitým superfosfátem (TSP). Zrna vykazují nejvyšší odběr dusíku ve variantě s trojitým superfosfátem (TSP) ($38,5 \pm 7,8$) mg/nádoba a v kontrolní variantě s přidavkem dusíku ($31,5 \pm 5,7$) mg/nádoba. Střední úroveň odběru byla zaznamenána při hnojení biouhlem z čistírenského kalu (SSBC-500) ($27,0 \pm 6,0$) mg/nádoba. Nejnížší hodnoty byly zaznamenány u kontrolní varianty ($17,5 \pm 4,9$) mg/nádoba. Pokud jde o odběr dusíku slámou, nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u kontrolní varianty s přidavkem dusíku ($23,3 \pm 2,3$) mg/nádoba. Zjištění statistické analýzy naznačuje, že odběr dusíku slámou může být ve variantě hnojené biouhlem z čistírenského kalu (SSBC-500) podobný ($17,3 \pm 1,7$) mg/nádoba jako u nehnojené varianty ($18,3 \pm 2,9$) mg/nádoba a u varianty s trojitým superfosfátem (TSP) ($18,8 \pm 4,1$) mg/nádoba.



Graf 9 Odběr dusíku slámou a zrnem v půdě Žamberk. - Rozdílná písmena udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami ($P < 0,05$).

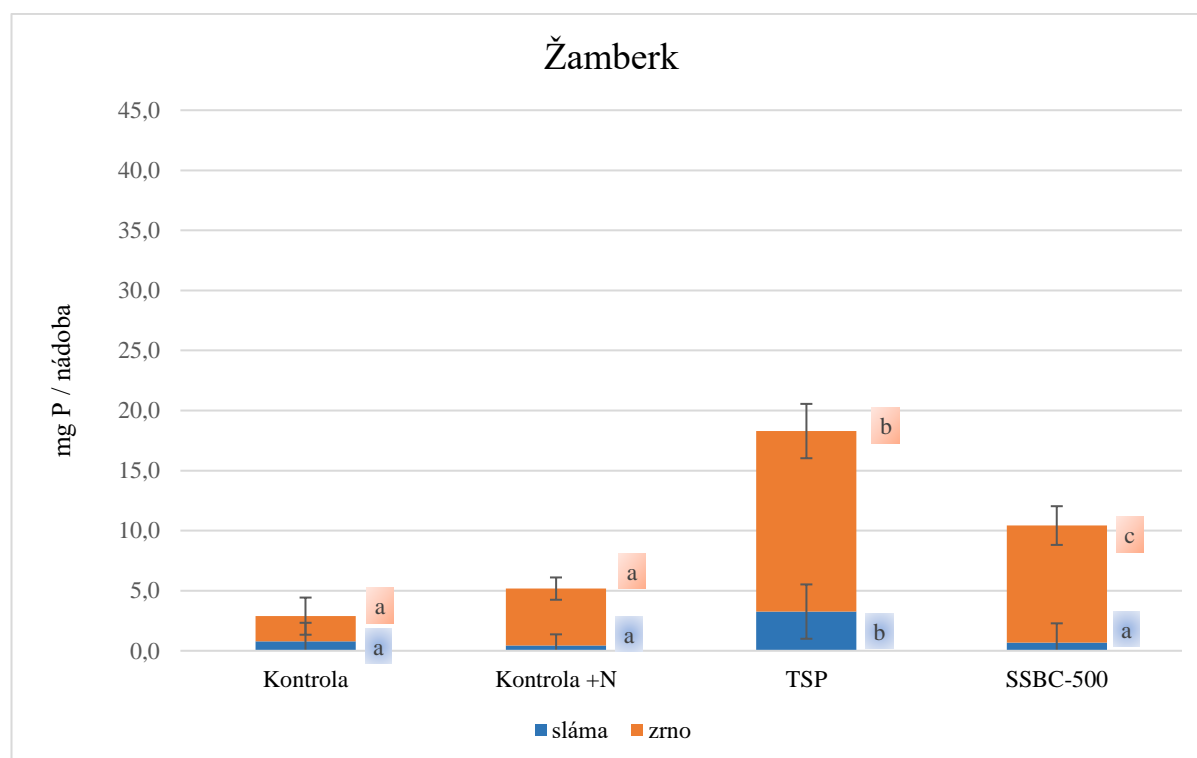
V grafu č. 10 jsme sledovali odběr dusíku slámou a zrnem ječmene jarního v půdě Cítov. Nejvyšší celkový odběr dusíku rostlinou byl zaznamenán při hnojení trojitým superfosfátem (TSP) ($98,7 \pm 17,0$) mg/nádoba. Podle statistické analýzy je vidět, že odběr dusíku rostlinami je ve variantách hnojených biouhlem z čistírenského kalu (SSBC-500) ($77,4 \pm 8,9$) mg/květináč srovnatelný s odběrem kontrolní variantou s přidavkem dusíku ($73,9 \pm 11,7$) mg/květináč a odběrem na nehnojené variantě ($66,9 \pm 9,9$) mg/květináč. Pokud jde o zrna, nejvyšší odběr dusíku byl zaznamenán při použití biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500) ($52,0 \pm 7,3$) mg/nádoba. Střední odběr dusíku byl zjištěn u nehnojené varianty ($24,8 \pm 5,6$) mg/nádoba a u kontrolní varianty s přidavkem dusíku ($34,0 \pm 5,2$) mg/nádoba. Nejnižší odběr byl dosažen při použití trojitého superfosfátu (TSP) ($22,2 \pm 7,7$) mg/nádoba. Hnojení biouhlem z čistírenského kalu (SSBC-500) vedlo k téměř dvojnásobnému odběru dusíku zrnem ječmene ve srovnání s kontrolní variantou a použitím trojitého superfosfátu (TSP). Sláma vykazuje nejvyšší odběr dusíku při použití trojitého superfosfátu (TSP) ($76,5 \pm 9,2$) mg/nádoba. Střední hodnoty jsou zjištěny u nehnojené varianty ($41,4 \pm 4,2$) mg/nádoba a u kontrolní varianty s přidavkem dusíku ($39,7 \pm 6,4$) mg/nádoba. Nejnižší odběr byl dosažen při použití biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500) ($25,4 \pm 1,5$) mg/nádoba. Z těchto výsledků je patrné, že hnojení biouhlem z čistírenského kalu (SSBC-500) je efektivnější u odběru dusíku zrnem ječmene než slámou, což naznačuje graf č. 10.



Graf 10 Odběr dusíku slámou a zrnem v půdě Cítov. - Rozdílná písmena udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami ($P < 0,05$).

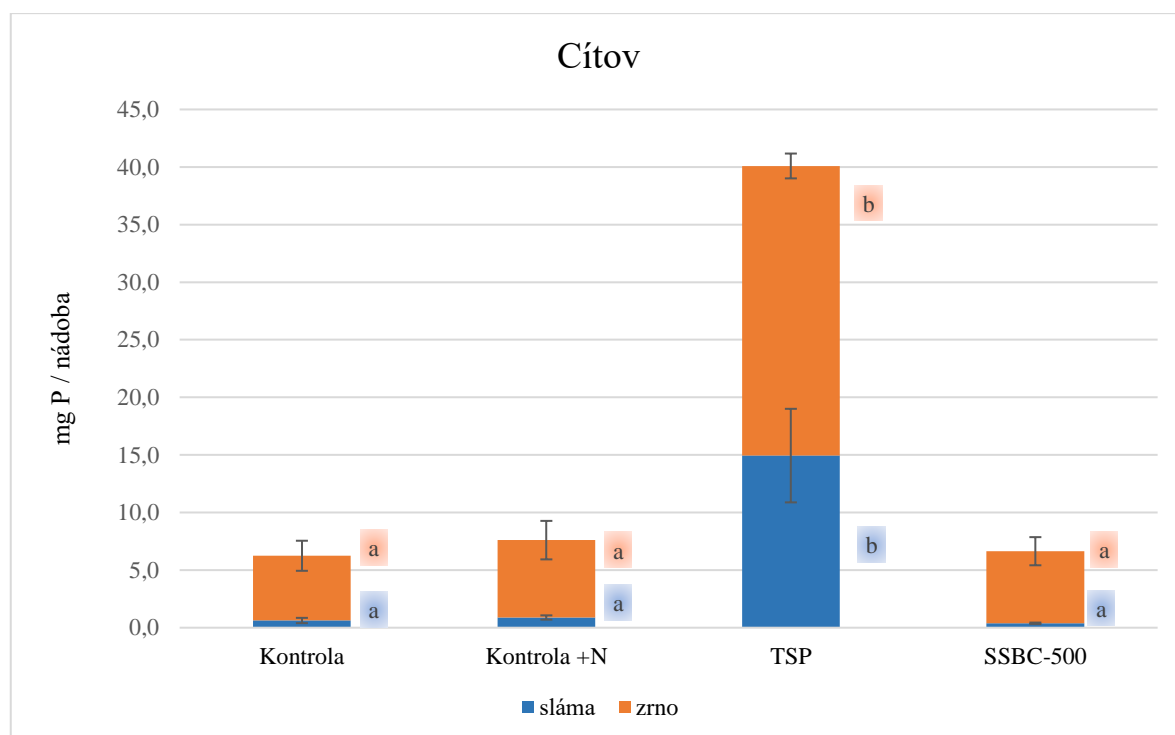
5.5 Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na odběr fosforu (P) rostlinou

Z grafu 11 lze usoudit, že nejnižší celkový odběr fosforu rostlinou byl zaznamenán u nehnojené varianty ($2,6 \pm 1,8$) mg/nádoba. Odběr fosforu v rostlině se zdál být v kontrolní variantě s přidavkem dusíku ($5,2 \pm 1,0$) mg/nádoba podobný jako v kontrolní variantě. Střední odběr fosforu rostlinou je při použití biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500) ($10,4 \pm 1,7$) mg/nádoba. Na této kyselé půdě byl zjištěn nejvyšší odběr fosforu rostlinou při hnojení trojitým superfosfátem (TSP) ($18,3 \pm 3,0$) mg/nádoba, což statisticky odlišovalo tuto variantu od ostatních. U zrna ječmene byl nejnižší odběr fosforu u kontrolní varianty ($2,1 \pm 1,4$) mg/nádoba a u kontrolní varianty s přidavkem dusíku ($4,7 \pm 0,9$) mg/nádoba, zatímco nejvyšší odběr fosforu byl zjištěn při hnojení trojitým superfosfátem (TSP) ($15,0 \pm 2,2$) mg/nádoba. Střední hodnoty byly zjištěny u varianty s biouhlem z čistírenského kalu (SSBC-500) ($9,8 \pm 1,6$) mg/nádoba. Mezi touto variantou a ostatními variantami je statisticky významný rozdíl. Pokud jde o odběr fosforu slámou, nejvyšší hodnoty jsou zaznamenány při použití trojitého superfosfátu (TSP) ($3,3 \pm 0,6$) mg/nádoba. Podle statistické analýzy se zdá, že odběr fosforu slámou může být ve variantách hnojených biouhlem z čistírenského kalu (SSBC-500) ($0,7 \pm 0,07$) mg/nádoba srovnatelný s odběrem kontrolní variantou s přidavkem dusíku ($0,4 \pm 0,07$) mg/nádoba a nehnojené variantě ($0,8 \pm 0,2$) mg/nádoba.



Graf 11 Odběr fosforu slámou a zrnem v půdě Žamberk. - Rozdílná písmena udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami ($P < 0,05$).

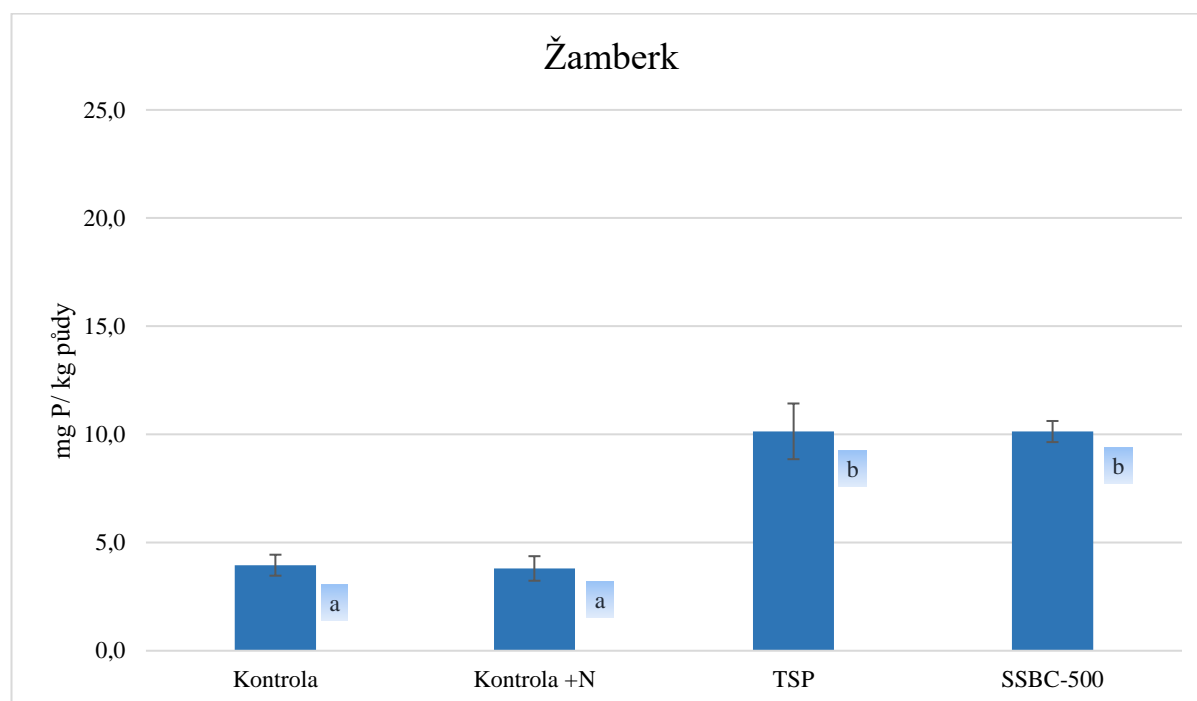
V grafu č. 12 jsme sledovali odběr fosforu slámou a zrnem ječmene jarního v půdě Cítov. Nejvyšší celkový odběr fosforu rostlinou byl zaznamenán při hnojení trojitým superfosfátem (TSP) ($40,1 \pm 5,1$) mg/nádoba, což statisticky odlišovalo tuto variantu od ostatních. Celkový odběr fosforu rostlinou může být podle statistické analýzy ve variantách hnojené biouhlem z čistírenského kalu (SSBC-500) stejný ($6,6 \pm 1,2$) mg/nádoba, jako při použití kontrolní varianty s přidavkem dusíku ($7,6 \pm 1,8$) mg/nádoba a nehnojené varianty ($6,2 \pm 1,5$) mg/nádoba. Zrna mají nejvyšší odběr fosforu po použití trojitého superfosfátu (TSP) ($25,1 \pm 1,0$) mg/nádoba. Mezi nehnojenou variantou ($5,6 \pm 1,3$) mg/nádoba, kontrolní variantou s přidavkem dusíku ($6,7 \pm 1,6$) mg/nádoba a biouhlem z čistírenského kalu (SSBC-500) ($6,3 \pm 1,2$) mg/nádoba nebyl statisticky významný rozdíl, a tyto hodnoty byly výrazně nižší ve srovnání s variantou TSP. Odběr fosforu slámou byl nejvyšší po použití trojitého superfosfátu (TSP) ($14,9 \pm 4,0$) mg/nádoba. Nejnižší odběr fosforu slámou byl zaznamenán při použití biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500) ($0,4 \pm 0,06$) mg/nádoba, nehnojené variantě ($0,6 \pm 0,2$) mg/nádoba a kontrolní variantě s přidavkem dusíku ($0,9 \pm 0,1$) mg/nádoba. Mezi těmito hodnotami nebyl statisticky významný rozdíl. Souhrnem lze usoudit, že hnojení trojitým superfosfátem (TSP) je efektivnější pro odběr fosforu zrnem ječmene než pro odběr slámou, což naznačuje graf č. 13.



Graf 12 Odběr fosforu slámou a zrnem v půdě Cítov. - Rozdílná písmena udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami ($P < 0,05$).

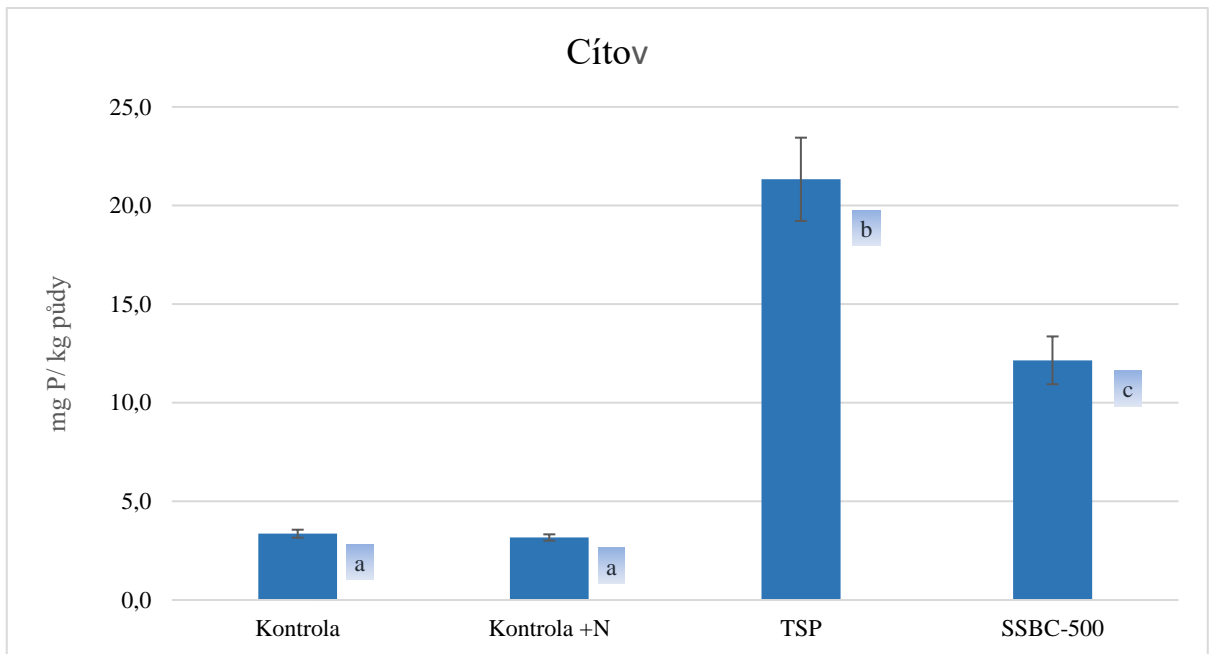
5.6 Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na změnu přístupného obsahu fosforu (P) v půdě po sklizni ječmene jarního

V grafu č. 13 můžeme vidět výsledky obsahu přístupného fosforu (P) stanoveného pomocí extrakce roztokem NaHCO_3 v půdě Žamberk. Nejvyšší obsah přístupného fosforu je zjištěn při použití trojitého superfosfátu (TSP) ($10,1 \pm 1,2$) mg P/kg půdy a biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500) ($10,1 \pm 0,4$) mg P/kg půdy, přičemž mezi nimi nejsou zjištěny statisticky významné rozdíly. Nejnižší obsah fosforu je podle očekávání u nehojené varianty ($3,95 \pm 0,4$) mg P/kg půdy a kontrolní varianty s přidavkem dusíku ($3,8 \pm 0,6$) mg P/kg půdy.



Graf 13 Obsah fosforu (P) v půdě Žamberk - Rozdílná písmena udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami ($P < 0,05$).

V grafu č. 14 můžeme vidět výsledky obsahu přístupného fosforu (P) stanoveného extrakcí pomocí roztoku NaHCO_3 v půdě Cítov. Obsah přístupného fosforu na kontrolní variantě ($3,4 \pm 0,2$) mg P/kg se statisticky neliší od kontrolní varianty s přidavkem dusíku ($3,2 \pm 0,1$) mg P/kg. Dokonce na obou těchto variantách došlo k mírnému poklesu obsahu přístupného fosforu. Na této půdě byl statisticky významný obsah přístupného fosforu na variantě s trojitým superfosfátem (TSP) ($21,3 \pm 2,1$) mg P/kg půdy, což potvrzuje, že rozpustný fosfor v tomto hnojivu významně zvýšil obsah přístupného fosforu (P) v půdě. Střední hodnota obsahu přístupného fosforu (P) byla při použití biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500) ($12,1 \pm 1,2$) mg P/kg půdy.



Graf 14 Obsah přístupného fosforu (P) v půdě Cítov- Rozdílná písmena udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami ($P < 0,05$).

6 Diskuze

6.1 Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na pH půdy

V experimentální části jsme v nádobovém experimentu sledovali vliv aplikace živin, prezentovaných jednotlivými variantami, na hodnotu pH půdy po sklizni ječmene jarního na půdách Žamberk a Cítov.

Hodnota pH pro půdu Žamberk, kde byla půda charakterizovaná hodnotou pH 5,2, jsme zaznamenali, že nejvyšší hodnoty pH byly dosaženy při použití biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500) (graf č. 1). Z těchto výsledků lze říci, že aplikace biouhlu z čistírenského kalu vedla ke zvýšení pH kyselé půdy a přispívá k její neutralizaci. Zvýšená hodnota pH biouhlu je způsobena vyšší teplotou pyrolýzy a na kyselých půdách vede k zvýšení pH. Tento jev napomáhá zpřístupnění fosforu (P) a draslíku (K) pro rostliny a zároveň snižuje biologickou dostupnost toxických kovů (Liao & Thomas 2019). Podobně tomu bylo ve studii Méndez et al. (2013), kde bylo zjištěno, že aplikace biouhlu z čistírenských kalů (600 °C) na kyselé půdě s hodnotou pH 5,9 zvýšila pH půdy na hodnotu 6,8. Studie Pohořelý et al. (2017) ukázala, že biochar vytvořený při nižších teplotách má obvykle nižší hodnotu pH než ten vyrobený při vyšších teplotách.

U kontrolní varianty, varianty s přidavkem dusíku a TSP byla hodnota pH nižší než počáteční hodnota pH na půdě Žamberk (graf č. 1). To lze přičíst účinkům hnojení dusíkem, které může vést k okyselení půdy. Přídavek dusíku, zejména ve formě amonných hnojiv, může vést k uvolňování vodíkových iontů (H^+) v důsledku procesu nitrifikace. Tento proces přeměňuje amonné ionty (NH_4^+) na dusičnany (NO_3^-). Během této reakce se uvolňují H^+ ionty, které mohou snížit pH půdy. Tento jev by mohl vysvětlit pozorované nižší hodnoty pH v půdě v případech, kdy byla aplikována dusíkatá hnojiva (Goldan et al., 2022).

Hodnota pH pro půdu Cítov byla stanovena na 7,2. Při použití kontrolní varianty s přidavkem dusíku a biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500) byl zaznamenán mírný pokles pH (graf č. 2). Tato zjištění naznačují, že aplikace biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500) a kontrolní varianty s přidavkem dusíku neměly významný vliv na zvýšení pH neutrální půdy. Nicméně, použití trojitého superfosfátu (TSP) vedlo k výraznému snížení pH ve srovnání s původní hodnotou, což může být způsobeno uvolňováním kyseliny fosforečné, která následně okyseluje půdu.

6.2 Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na výnos ječmene jarního

V experimentální části jsme zkoumali vliv různých variant na výnos zrna a slámy ječmene jarního na půdě Žamberk a Cítov. Výsledky naznačují, že aplikace biouhlu z čistírenského kalu má pozitivní dopad na výnos zrna ve srovnání s kontrolními variantami. Tento pozitivní efekt je srovnatelný s výnosem dosaženým při použití trojitého superfosfátu (TSP). Tato pozorovaná zvýšení výnosu zrna mohou být spojená se zvýšenou dostupností fosforu a dusíku a zlepšením struktury půdy díky aplikaci biouhlu.

Výsledky z výzkumu Fachini et al. (2021) ukazují, že aplikace biouhlu z čistírenského kalu může zlepšit příjem živin, jako je fosfor (P) a dusík (N), a v důsledku toho také zvýšit výnos rostlin. Zvýšený výnos způsobený použitím biouhlu z čistírenského kalu může být také

důsledkem příjmu dalších živin. Mercl et al. (2020) uvádějí, že biouhel z čistírenského kalu obsahuje značné množství živin, jako jsou vápník (Ca), draslík (K), hořčík (Mg) a síra (S), které přispívají ke zvýšenému výnosu rostlin. Proto lze očekávat uvolňování těchto živin z pyrolyzovaného čistírenského kalu, což vede k potenciálnímu zvýšení výnosu ječmenné biomasy ve srovnání s jednorázovou aplikací hnojiv. Schopnost biouhlu z čistírenského kalu nahradit organická hnojiva a zvýšit biomasu rostlin byla potvrzená ve dvouleté terénní studii (Faria et al., 2018). Jejich studie naznačuje, že hlavním faktorem přispívajícím ke zlepšení výnosu biomasy po aplikaci biouhlu z čistírenského kalu bylo zvýšení obsahu fosforu a hořčíku v půdě. Na základě studie Hossain et al. (2010) aplikace biouhlu z čistírenského kalu v množství 10 tun na hektar vedla k 64 % nárůstu výnosu cherry rajčátek. Výsledky z výzkumu Mulumba & Lal (2008) poukázaly, že významný přírůstek výnosu zrna byl zaznamenán v rostlině rýže po přidání biouhlu z čistírenského kalu. Na základě jejich studie byl přírůstek výnosu zrna rýže vyšší až o 92 %. Zvýšená absorpce dusíku o 7,5 % a fosforu až o 166 % rostlinami rýže po použití biouhlu z čistírenského kalu byla identifikována jako hlavní faktor vedoucí ke zlepšení výnosu biomasy.

Dále jsme zaznamenali, že nejvyšší hodnoty výnosu slámy ječmene jarního byly dosaženy při použití biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500) a trojitého superfosfátu (TSP) (graf č. 5). Tento nárůst výnosu je především způsoben aplikací dusíku (N) a draslíku (K) v těchto variantách, na rozdíl od kontrolního ošetření. Studie Gregory et al. (2014) zkoumala, vliv aplikace biouhlu na produkci biomasy rostlin. Ze studie vychází, že aplikace biouhlu v dávce 1-2 % může výrazně zvýšit výnos nadzemní biomasy rostlin. Konkrétně bylo zjištěno, že výnos nadzemní biomasy se zvýšil dvakrát v porovnání s kontrolní skupinou, která biouhel neobsahovala. Zvýšený výnos rostlinné biomasy při použití kalového biouhlu ve srovnání s kontrolní skupinou je očekávaný a je v souladu se zmíněnými studiemi. Jedním z hlavních důvodů zlepšení výnosu biomasy ječmene jarního při použití biouhlu z čistírenského kalu je zlepšený příjem fosforu. Například u obou půd byl výnos biomasy významně korelovan s odběrem fosforu rostlinou ječmene jarního.

6.3 Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na odběr dusíku (N) rostlinou

Dále jsme také zkoumali vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na odběr dusíku slámou a zrnem rostlinami ječmene jarního v půdách Žamberk a Cítov. V půdě Žamberk jsme zaznamenali významně vyšší odběr dusíku slámou a zrnem při použití trojitého superfosfátu (TSP) a kontrolní varianty s přidavkem dusíku, zatímco biouhel z čistírenského kalu (SSBC-500) měl srovnatelné hodnoty s kontrolní variantou (graf č. 9). Tento výsledek naznačuje, že biouhel z čistírenského kalu neměl významný dopad na odběr dusíku slámou ve srovnání s ostatními testovanými variantami.

V půdě Cítov jsme zaznamenali nejvyšší odběr dusíku zrnem při použití biouhlu z čistírenského kalu (graf č. 10). Tyto hodnoty byly dokonce dvakrát vyšší než u kontrolní skupiny, což naznačuje, že aplikace biouhlu z čistírenského kalu může vést k zlepšení odběru dusíku zrnem ječmene jarního na neutrální půdě. Nicméně, u odběru dusíku slámou jsme pozorovali, že při použití biouhle z čistírenského kalu byly hodnoty odběru dusíku nejnižší. Tento kontrastní výsledek mezi příjmem dusíku slámou a zrnem může být způsoben různými

faktory, jako jsou půdní podmínky a dostupnost dusíku. Zhang et al. (2021), zjistili že aplikace biouhlu do půdy urychluje procesy koloběhu dusíku a zvyšuje dostupnost dusíku pro rostliny. Výsledky Uzoma et al. (2011) ukázaly, že přidání biouhlu z kravského hnoje, připraveného při teplotě 500 °C, ke kukuřici vedlo k postupnému zvyšování výnosu kukuřice a příjmu dusíku rostlinami s rostoucí dávkou biouhlu. Tato zjištění podporuje náš výzkum, který naznačuje, že aplikace biouhlu z čistírenského kalu může vést ke zlepšení odběru dusíku rostlinami ječmene jarního.

6.4 Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na odběr fosforu (P) rostlinou

Potenciální výnos rostliny je definován potřebou živin spojenou s vhodným hnojením a fosfor je často limitující živinou. Na kyselé půdě Žamberk jsme zjistili, že nejvyšší odběr fosforu zrnem ječmene jarního byl zaznamenán při použití trojitého superfosfátu (TSP), což je očekávaný výsledek, protože TSP je známý jako zdroj rozpustného fosforu, který je snadno dostupný rostlinám (graf č. 11). Na druhém místě byl biouhel z čistírenského kalu, což naznačuje, že biouhel může také poskytovat rostlinám dostupný fosfor, i když možná v mírně menší míře než TSP. Efektivní odběr fosforu rostlinou byl potvrzen i v práci Savini et al. (2016). Ve studii bylo zjištěno, že aplikace trojitého superfosfátu (TSP) vedla k nejvyššímu příjmu fosforu ze zrna a celkové biomasy kukuřice. Dále bylo zjištěno, že aplikace trojitého superfosfátu (TSP) vedla k výrazně vyššímu výnosu kukuřice ve srovnání s kontrolní skupinou. Samotný odběr fosforu je omezen nedostatkem dostupného fosforu v půdě, což znamená, že lepší příjem fosforu je zásadně závislý na jeho dostupnosti v půdě (Salih et al., 1989). Nejvyšší odběr fosforu slámou v půdě je při použití trojitého superfosfátu (TSP). Na druhou stranu biouhel z čistírenských kalu vykazoval nižší hodnoty příjmu fosforu, které jsou srovnatelné s kontrolní skupinou (graf č. 11). Tyto výsledky naznačují, že biouhel z čistírenského kalu nemusí být pro rostliny tak efektivním zdrojem fosforu jako TSP. Podle Zhao et al. (2013) biochar vyrobené pyrolýzou při teplotě 500 °C z hnoje a čistírenského kalu se vyznačují značně pomalým uvolňováním fosforu, což je zjištění, které potvrzuje i naše práce.

V půdě Cítov jsme zaznamenali podobné trendy jako v půdě Žamberk, kde nejvyšší příjem fosforu slámou byl dosažen při použití trojitého superfosfátu (TSP). Opět jsme zde pozorovali nižší hodnoty příjmu fosforu při použití biouhlu z čistírenského kalu, které byly srovnatelné s kontrolními variantami (graf č. 12). V obou půdách je vyšší odběr fosforu zrnem než slámou. Tento výsledek potvrzují i autoři Zhang et al. (2020), kteří se zabývali vlivem dřevního biocharu na produkci rýže a pšenice. Autoři zaznamenali vyšší příjem fosforu (P) u zrna než u slámy. Tento zjištěný výsledek naznačuje možný zvýšený vliv biocharu na kořenový růst a na zajištění rostlinné výživy.

Celkově naše výsledky potvrzují význam trojitého superfosfátu (TSP) jako účinného zdroje fosforu pro rostliny, zejména pokud jde o odběr fosforu zrnem. Zároveň můžeme říci, že biouhel z čistírenského kalu je jednoznačně z hlediska odběru fosforu horší než hnojení TSP na obou půdách a neliší se od kontrolních variant.

6.5 Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu na změnu přístupného obsahu fosforu (P) v půdě po sklizni ječmene jarního

Na půdě Žamberk jsme zaznamenali nejvyšší hodnoty celkového obsahu fosforu v půdě při použití trojitého superfosfátu a biouhlu z čistírenského kalu (graf č. 13). Tento výsledek naznačuje, že oba tyto materiály mohou přispět k zvýšení obsahu fosforu v půdě, což je důležité pro zlepšení živinového stavu půdy a podporu zdravého růstu rostlin. Studie Fachini et al. (2021) se zaměřila na zkoumání účinků biouhlů z čistírenských kalů na vlastnosti půdy a výnos kukuřice. Jedním z pozorovaných účinků bylo zvýšení dostupnosti fosforu v půdě, což může být důležité pro lepší živinovou dostupnost pro rostliny a podporu jejich růstu. Kromě toho byla také pozorována zvýšená kationtová výměnná kapacita, což naznačuje, že biouhly z čistírenských kalů mohou zlepšit schopnost půdy zadržovat a uvolňovat živiny pro rostliny.

Na půdě Cítov jsme také pozorovali nejvyšší hodnoty celkového obsahu fosforu v půdě při použití trojitého superfosfátu, s druhou nejvyšší hodnotou dosaženou při aplikaci biouhlu z čistírenského kalu (graf č. 14). Tento výsledek opět potvrzuje, že oba materiály mohou být účinnými zdroji fosforu pro půdu, ale že akumulace fosforu rostlinami se významně liší, a proto zejména dostupnost fosforu z půdního roztoku byla ve variantě SSBC-500 omezena.

Celkově lze tedy konstatovat, že aplikace biouhlu z čistírenského kalu má potenciál zvýšit obsah přístupného fosforu v půdě, a to jak na půdě Žamberk, tak Cítov. Tento jev je důležitý pro udržení živinové rovnováhy v půdě a podporu optimálního růstu a vývoje rostlin. Schachtman et al. (1998) tvrdí, že fosfor v půdním roztoku se mění s pH, a nejvyšší rychlost absorpce je pozorována, když dominuje forma H_2PO_4^- , typicky při pH mezi 5,0 a 6,0. Tato skutečnost byla potvrzena i v naší práci, kde jsme zaznamenali podobné vztahy mezi pH a obsahem fosforu v půdním roztoku. Rostliny využívají specializované kořenové struktury, jako jsou proteoidní kořeny, které se mohou vyvinout v reakci na nedostatek fosforu. Tyto kořenové struktury vylučují organické kyseliny, aby mobilizovaly fosfor a další mikroživiny v půdě.

7 Závěr

V této diplomové práci jsme se zaměřili na uvolňování dusíku a fosforu z termicky upraveného čistírenského kalu. V nádobovém experimentu jsme testovali vliv biouhlu z čistírenského kalu na výnos jarního ječmene, odběr fosforu a dusíku biomasou rostlin, a obsah přístupného fosforu v půdním roztoku. Testovali jsme také vliv jednotlivých variant hnojení na hodnotu pH půdy. Použili jsme dva různé typy půd, kambizem a fluvizem, a aplikovali různé varianty, včetně biouhlu z čistírenského kalu, trojitého superfosfátu (TSP), kontrolní varianty s přídatkem dusíku a kontrolní varianty bez hnojení.

Výsledky této diplomové práce potvrzují, že termicky upravený čistírenský kal má vliv na celkový výnos biomasy a uvolňování dusíku a fosforu.

Pokud jde o pH půdy, na půdě kambizem byly nejvyšší hodnoty dosaženy při použití biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500), což vedlo k zvýšení pH kyselé půdy a přispělo k její neutralizaci. Na neutrální půdě fluvizem jsme zaznamenali mírný pokles pH při použití biouhlu z čistírenského kalu, ale tento pokles neměl významný vliv na zvýšení hodnoty pH půdy.

Co se týče celkového výnosu na půdě Žamberk (kambizem), nejvyšší hodnoty byly dosaženy u varianty s biouhlem z čistírenského kalu. Tento výsledek naznačuje potenciál biouhlu jako alternativního hnojiva. Na půdě Cítov (fluvizem) byl nejvyšší výnos biomasy dosažen u varianty hnojené biouhlem z čistírenského kalu (SSBC-500), avšak statisticky se nelišil od ostatních variant.

V případě odběru dusíku (N) rostlinou jsme na půdě Žamberk (kambizem) zaznamenali významně vyšší odběr dusíku při použití trojitého superfosfátu (TSP) a kontrolní varianty s přídatkem dusíku, zatímco biouhel z čistírenského kalu ukázal srovnatelné hodnoty s kontrolní variantou. Na půdě Cítov (fluvizem) jsme zaznamenali vyšší příjem dusíku při použití trojitého superfosfátu (TSP) a biouhlu z čistírenského kalu, což naznačuje, že aplikace biouhlu z čistírenského kalu může vést k zlepšení odběru dusíku rostlinami ječmene jarního na neutrální půdě.

V hodnocení odběru fosforu (P) rostlinami jsme zjistili, že nejvyšší odběr fosforu byl dosažen při použití trojitého superfosfátu (TSP), což byl s ohledem na jeho rozpustnost očekávaný výsledek.

Zaznamenali jsme také nejvyšší hodnoty přístupného obsahu fosforu v půdě při použití trojitého superfosfátu (TSP) a biouhlu z čistírenského kalu (SSBC-500). To naznačuje, že oba tyto materiály mohou přispět k zvýšení obsahu přístupného fosforu v půdě, což je důležité pro zlepšení živinového stavu půdy a podpoře zdravého růstu rostlin.

Práce tak poukázala na potenciál odpadních materiálů částečně nahradit fosforečnou hnojiva, čímž by došlo k recyklaci významných živin ze sekundárních surovin průmyslu. Nicméně, před konečným rozhodnutím o vhodnosti aplikace pyrolyzovaného čistírenského kalu do půdy jako hnojiva je třeba provést další studie a pečlivě zkoumat jeho vliv na půdu a složení rostlin z hlediska kontaminace rizikovými prvky a sloučeninami. Vliv aplikace biouhlu z čistírenského kalu je dlouhodobou záležitostí a nejde ho charakterizovat jediným měřením. Další výzkum by měl být zaměřen na dlouhodobé sledování vlivu a podrobnější analýzu, včetně kontaminace rostlin rizikovými prvky a sloučeninami.

8 Literatura

- Albiach, R., Canet, R., Pomares, F., Ingelmo, F., 2001. Organic matter components, aggregate stability and biological activity in a horticultural soil fertilized with different rates of two sewage sludges during ten years. *Bioresource Technology* 77:109-114.
- Al-Gheethi, A. A., Efaq, A. N., Bala, J. D., Norli, I., Abdel-Monem, M. O., & Ab. Kadir, M. O. 2018. Removal of pathogenic bacteria from sewage-treated effluent and biosolids for agricultural purposes. *Applied Water Science*, 8, 1-25.
- Alipour, M., Asadi, H., Chen, C., & Besalatpour, A. A. 2022. Fate of organic pollutants in sewage sludge during thermal treatments: Elimination of PCBs, PAHs, and PPCPs. *Fuel*, 319, 123864.
- Amalina, Farah, et al. 2022. Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for organic contaminants removal in water—A review. *Journal of Hazardous Materials Advances* 7 :100092.
- Amalina, I. F., Haziq, J. M., Syukor, A. A., Rashid, A. M., & Izzati, K. N. 2020. Formulation of *Capra hircus* feed to utilize *Artocarpus heterophyllus* leaves and palm acid oil (PAO). In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 736, No. 2, p. 022016). IOP Publishing.
- Anas, M., Liao, F., Verma, K. K., Sarwar, M. A., Mahmood, A., Chen, Z. L., ... & Li, Y. R. 2020. Fate of nitrogen in agriculture and environment: agronomic, eco-physiological and molecular approaches to improve nitrogen use efficiency. *Biological Research*, 53(1), 1-20.
- Antolín, M. C., Pascual, I., García, C., Polo, A., & Sánchez-Díaz, M. 2005. Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions. *Field crops research*, 94(2-3), 224-237.
- Balík, J., Černý, J., & Kulhánek, M. 2012. Bilance dusíku v zemědělství. *Certifikovaná metodika. Česká zemědělská univerzita v Praze*, 43.
- Basu, Prabir. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis – Practical Design and Theory*. B.m.: Elsevier, s. 65-96. ISBN 978-0-12-374988-8.
- Bozkurt, M. A., & Yarılgaç, T. 2003. The effects of sewage sludge applications on the yield, growth, nutrition and heavy metal accumulation in apple trees growing in dry conditions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27(5), 285-292.
- 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.
- Břendová, K., Tlustoš, P., Száková, J., & Habart, J. 2012. Biochar properties from different materials of plant origin. *European Chemical Bulletin*, 1(12), 535-539.
- Canabarro, Nicholas, Juliana F. Soares, Chayene G. Anchieta, Camila S. Keelinga Marcio A. Mazutti, 2013. *Thermochemical processes for biofuels production from biomass*.

Sustainable Chemical Processes. 22(1). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1186/2043-7129-1-22>.

- Černe, M., Palčić, I., Pasković, I., Major, N., Romić, M., Filipović, V., Igrc, M.D., Perčin, A., Goreta Ban, S., Zorko, B., Vodenik, B., Glavič Cindro, D., Milačić, R., Heath, D.J., Ban, 47 D., 2019. The effect of stabilization on the utilization of municipal sewage sludge as a soil amendment. *Waste Manag.* 94, 27–38.
- Černý, J. – Balík, J. – Švehla, P. – Kulhánek, M. 2009. Využití odpadů z ČOV jako zdroje organických látek a živin. 2009, Racionální použití hnojiv, Praha. ČZU v Praze. s. 36-41. ISBN: 978-80-213-2006-2.
- Česko. Vyhláška č. 474/2000 Sb., Ministerstva zemědělství o stanovení požadavků na hnojiva - znění od 1. 11. 2021. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024 [cit. 17. 4. 2024]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-474#p1>
- Česko. Vyhláška č. 312/2021 Sb., vyhláška, kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů - znění od 1. 10. 2021. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024 [cit. 17. 4. 2024]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-312#c11>
- Česko. Zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, rostlinných biostimulantech a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd (zákon o hnojivech) - znění od 1. 11. 2023. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024 [cit. 17. 4. 2024]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1998-156#p1>
- Česko. Zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů - znění od 1. 1. 2024. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024 [cit. 17. 4. 2024]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-165#p1>
- Česko. Zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech - znění od 1. 1. 2024. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024 [cit. 17. 4. 2024]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541#cast1>
- Česko. § 59 vyhlášky č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady - znění od 1. 1. 2023. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024 [cit. 17. 4. 2024]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-273#p59>
- Český statistický úřad, 2023. Životní prostředí – Produkce kalů v ČOV a způsob jejich zneškodnění [online], In: *Statistická ročenka České republiky 2022*. ISBN 978-80-250-3167-4. Dostupné z: www.czso.cz/csu/czso/3-zivotni-prostredi-4z1x5kvfyw
- De Rosa J. M., Rosando M., Paneque M., Miller A. Z., Knicker H. 2018. Effects of aging under field conditions on biochar structure and composition: implications for biochar stability in soils. *Science of The Total Environment*. 613–614. 969–976.
- Dede, G., Sasmaz, Z. B., Ozdemir, S., Caner, C., & Dede, C. 2023. Investigation of heavy metal and micro-macro element speciation in biomass ash enriched sewage sludge compost. *Journal of Environmental Management*, 344, 118330.

- Desmidt, E., Ghyselbrecht, K., Zhang, Y., Pinoy, L., Van der Bruggen, B., Verstraete, W., & Meesschaert, B. 2015. Global phosphorus scarcity and full-scale P-recovery techniques: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(4), 336-384.
- Dhaliwal, S. S., Walia, S. S., Walia, M. K., & Manchanda, J. S. 2013. Build up of macro, micro and secondary plant nutrients in site specific nutrient management experiment under rice-wheat system. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 2(2), 236-244.
- Dhanker, R., Chaudhary, S., Goyal, S., & Garg, V. K. 2021. Influence of urban sewage sludge amendment on agricultural soil parameters. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101642.
- Di Capua, F., Spasiano, D., Giordano, A., Adani, F., Fratino, U., Pirozzi, F., & Esposito, G. 2020. High-solid anaerobic digestion of sewage sludge: Challenges and opportunities. *Applied Energy*, 278, 115608.
- Enaime, Ghizlane, et al. 2020 "Biochar for wastewater treatment—conversion technologies and applications." *Applied Sciences* 10.10: 3492.
- Encyclopædia Britannica. 2020 "Activated sludge process" [obrázek]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/wastewater-treatment/Primary-treatment>.
- Esposito, N. C. 2013. Soil Nutrient Availability Properties of Biochar. *Biochar: An improver of nutrient and soil water availability-what is the evidence?*
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., Jones, C.A., 2010. *Growth and mineral nutrition of field crops 3rd Edition*, CRC Press. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Fachini, J., Coser, T.R., Araujo, A.S. de, Vale, A.T. do, Jindo, K., Figueiredo, C.C. de, 2021. One Year Residual Effect of Sewage Sludge Biochar as a Soil Amendment for Maize in a Brazilian Oxisol. *Sustainability* 13, 2226. <https://doi.org/10.3390/su13042226>.
- Fečko, P. *Problematika zpracování a využití kalů z čistíren odpadních vod*. Ostrava: Ediční středisko VŠB-TU Ostrava, 12. 4. 2009. s. 132. ISBN 80-7078-652-3.
- Fijalkowski, K., Rosikon, K., Grobelak, A., Hutchison, D., & Kacprzak, M. J. (2018). Modification of properties of energy crops under Polish condition as an effect of sewage sludge application onto degraded soil. *Journal of environmental management*, 217, 509-519.
- Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M. A., Cape, J. N., Reis, S., & Voss, M. 2013. The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1621), 20130164.
- Ghorbani, M., Konvalina, P., Walkiewicz, A., Neugschwandtner, R. W., Kopecký, M., Zamanian, K., ... & Bucur, D. 2022. Feasibility of biochar derived from sewage sludge to promote sustainable agriculture and mitigate GHG emissions—A review. *International journal of environmental research and public health*, 19(19), 12983.

- Goldan, E., Nedeff, V., Barsan, N., Culea, M., Tomozei, C., Panainte-Lehadus, M., & Mosnegutu, E. 2022. Evaluation of the use of sewage sludge biochar as a soil amendment—A review. *Sustainability*, 14(9), 5309.
- Gopinath, A., Divyapriya, G., Srivastava, V., Laiju, A. R., Nidheesh, P. V., & Kumar, M. S. 2021. Conversion of sewage sludge into biochar: A potential resource in water and wastewater treatment. *Environmental Research*, 194, 110656.
- Gregory, J., Anderson, C.W.N., Camps Aberstain, M., McManus, M.T. 2014. Response of plant and soil microbes to biochar amendment of an arsenic-contaminated soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 191, 133-141.
- Hailegnaw N. S., Mercl F., Pračke K., Száková J., Tlustoš P. 2019a. 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.
- Hailegnaw N. S., Mercl F., Pračke K., Száková J., Tlustoš P. 2019b. High temperature-produced biochar can be efficient in nitrate loss prevention and carbon sequestration. *Geoderma*. 338. 48–55.
- Hammond, J. P., Broadley, M. R., & White, P. J. 2004. Genetic responses to phosphorus deficiency. *Annals of Botany*, 94(3), 323-332.
- Hanserud, O. S., Brod, E., Øgaard, A. F., Müller, D. B., & Brattebø, H. (2016). A multi-regional soil phosphorus balance for exploring secondary fertilizer potential: the case of Norway. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 104, 307-320.
- Hossain, M. K., Strezov, V., Chan, K. Y., & Nelson, P. F. 2010. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Chemosphere*, 78(9), 1167-1171.
- Chang, M. 2015. Reducing microplastics from facial exfoliating cleansers in wastewater through treatment versus consumer product decisions. *Marine Pollution Bulletin*, 101(1), 330- 333330–333. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.10.074>
- Junior, A., & Guo, M. 2023. Efficacy of sewage sludge derived biochar on enhancing soil health and crop productivity in strongly acidic soil. *Frontiers in Soil Science*, 3, 1066547.
- Kacprzak, M., Neczaj, E., Fijalkowski, K., Grobelak, A., Grosser, A., Worwag, M., Rorat, A., Brattebo, H., Almås, Å., Singh, B. R., 2017. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research* 156:39-46
- Kahiluoto, H., Kuisma, M., Ketoja, E., Salo, T., Heikkinen, J., 2015. Phosphorus in manure and sewage sludge more recyclable than in soluble inorganic fertilizer. *Environmental Science and Technology*. 49. 2115–2122.
- Kazmierczak, M. 2012. Sewage sludge stabilization indicators in aerobic digestion-a review. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Land Reclamation*, 44(2).
- Khan, S., Chao, C., Waqas, M., Arp, H.P.H., Zhu, Y.-G., 2013. Sewage Sludge Biochar Influence upon Rice (*Oryza sativa* L) Yield, Metal Bioaccumulation and Greenhouse Gas

- 50 Emissions from Acidic Paddy Soil. *Environ. Sci. Technol.* 47, 8624–8632. <https://doi.org/10.1021/es400554x>.
- Kirchmann, H., Börjesson, G., Kätterer, T., & Cohen, Y. 2017. From agricultural use of sewage sludge to nutrient extraction: A soil science outlook. *Ambio*, 46, 143-154.
- Kirkby, E. A. 2001. *Principles of plant nutrition* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.
- Kos, M. 2016. Čistírenský kal obnovitelný zdroj pro výrobu paliva a hnojiva. *SOVAK*, 1, s. 16–20.
- Kotovicová, J., & Vaverková, M. 2012. Výzkum možností využití kalů z čistíren odpadních vod na plantážích rychle rostoucích dřevin. *Acta Environmentalica Universitatis Comenianae* (Bratislava), 20(1), 29-37.
- Kratina, J., Rozkošný, M., Hudcová, H., Šereš, M., & Holubík, O. 2021. Studie přínosu extenzivní stabilizace čistírenských kalů z malých komunálních zdrojů pro jejich využití jako hnojiva. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 63(6), 23-33.
- Krishnan, S., Zulkapli, N. S., Kamyab, H., Taib, S. M., Din, M. F. B. M., Abd Majid, Z., & Othman, N. 2021. Current technologies for recovery of metals from industrial wastes: An overview. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101525.
- Kulikowska, D., Bernat, K., Zaborowska, M., & Zielińska, M. 2022. Municipal sewage sludge composting in the two-stage system: The role of different bulking agents and amendments. *Energies*, 15(14), 5014.
- Lehmann J., Joseph S. 2009. *Biochar for environmental management: science and technology*. Earthscan. Sterling, London. ISBN 978-1-84407-658-1.
- Lehmann, J., Pereira da Silva Jr., J., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., and Glaser, B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 249, 343- 357.
- Liao W, Thomas SC. 2019. Biochar particle size and post-pyrolysis mechanical processing affect soil pH, water retention capacity, and plant performance. *Soil Systems* 3:1–16.
- Luengo, C., Brigante, M., Antelo, J., & Avena, M. 2006. Kinetics of phosphate adsorption on goethite: comparing batch adsorption and ATR-IR measurements. *Journal of Colloid and Interface Science*, 300(2), 511-518.
- Lyčková, H. 2009. *The problem of identity in writing Paul Auster* (Doctoral dissertation, MA Thesis).
- Maguire, R. O., Sims, J. T., Dentel, S. K., Coale, F. J., Mah, J. T. 2001. Relationships between Biosolids Treatment Process and Soil Phosphorus Availability. *Journal of Environmental Quality*. 30. 1023–1033.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J. and Lehmann, J. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, 333, 117-128.

- Martinsen, V., Mulder, J., Shitumbanuma, V., Sparrevik, M., Børresen, T., Cornelissen, G. 2014. Farmer-led maize biochar trials: effect on crop yield and soil nutrients under conservation farming. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177, 681-695.
- Mei, X., Tang, J., & Zhang, Y. 2020. Sludge stabilization: Characteristics of the end-products and an alternative evaluative methodology. *Waste Management*, 105, 355-363
- Mercl F, Košnář Z, Pierdonà L, Ulloa-Murillo L, Száková J, Tlustoš P. 2020. Changes in availability of Ca, K, Mg, P and S in sewage sludge as affected by pyrolysis temperature. *Plant, Soil and Environment* 66, 143–418.
- Míchal, P., Hanč, A., & Švehla, P. 2019. Inhibiční vliv amoniakálního dusíku při vermikompostování čistírenského kalu a možnosti jeho potlačení. In *Waste Forum* (No. 2).
- Mintenig, S. M., Int-Veen, I., Löder, M. G., Primpke, S., & Gerdts, G. 2017. Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. *Water research*, 108, 365-372.
- Mu, X., & Chen, Y. 2021. The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158, 76-82.
- Myszograj, S., & Płuciennik-Koropczuk, E. 2023. Thermal Disintegration of Sewage Sludge as a Method of Improving the Biogas Potential. *Energies*, 16(1), 559.
- Naeem, M., Ansari, A.A., Gill, S.S., 2017. *Essential Plant Nutrients: Uptake, Use Efficiency, and Management*. Springer.
- Nidheesh, P. V., et al. 2021 "Potential role of biochar in advanced oxidation processes: a sustainable approach." *Chemical Engineering Journal* 405: 126582.
- Novak, J. M., Busscher, W. J., Laird, D. L., Ahmedna., M., Watts, D. W., and Niandou, M. A. S. 2009a. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern Coastal Plain soil. *Soil Science*, 174, 105–112.
- Pandit, N. R., Mulder, J., Hale, S. E., Martinsen, V., Schmidt, H. P., Cornelissen, G. 2018. Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in a moderately acidic low-input Nepalese soil. *Science of the Total Environment*, 625, 1380-1389.
- Pariyar, P., Kumari, K., Jain, M. K., & Jadhao, P. S. 2020. Evaluation of change in biochar properties derived from different feedstock and pyrolysis temperature for environmental and agricultural application. *Science of the Total Environment*, 713, 136433.
- Peysson, W., & Vulliet, E. 2013. Determination of 136 pharmaceuticals and hormones in sewage sludge using quick, easy, cheap, effective, rugged and safe extraction followed by analysis with liquid chromatography–time-of-flight-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1290, 46-61.
- Pico, Y., & Barcelo, D. 2020. Pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry in environmental analysis: Focus on organic matter and microplastics. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 130, 115964.

- Pohořelý, M., Moško, J., Zach, B., Šyc, M., Václavková, Š., Jeremiáš, M., & Innemanová, P. 2017. Materiálové a energetické využití suchého stabilizovaného čistírenského kalu–výroba biocharu středně-teplotní pomalou pyrolýzou. In Waste Forum (No. 2, pp. 83-89). Czech Environment Management Center.
- Qian, K., Kumar, A., Zhang, H., Bellmer, D., & Huhnke, R. 2015. Recent advances in utilization of biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1055-1064.
- Raček, J., Ševčík, J., Chorazy, T., Hlavínek, P., & Kučerík, J. 2018. Zpracování čistírenských kalů prostřednictvím mikrovlnné pyrolýzy. *Vodní hospodářství*, 68(1), 16-20.
- Rada Evropské unie. Rozhodnutí Rady ze dne 19. prosince 2002, kterým se stanoví kritéria a postupy pro přijímání odpadů na skládky podle článku 16 a přílohy II směrnice 1999/31/ES (2003/33/ES). [online]. 2003 [citováno 2024-04-12]. Dostupné z: <https://esipa.cz/sbirka/sbsrv.dll/sb?DR=SB&CP=32003D0033>
- Rada Evropských společenství. Směrnice Rady 86/278/EHS ze dne 12. června 1986 o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství. [online]. 1986 [citováno 2024-04-12]. Dostupné z: <https://esipa.cz/sbirka/sbsrv.dll/sb?DR=AZ&CP=01986L0278-20220101>
- Rada Evropských společenství. Směrnice Rady 91/271/EHS ze dne 21. května 1991 o čištění městských odpadních vod. [online]. 1991 [citováno 2024-04-12]. Dostupné z: <https://esipa.cz/sbirka/sbsrv.dll/sb?DR=SB&CP=31991L0271>
- Rangabhashiyam, S., and P. Balasubramanian. 2019. "The potential of lignocellulosic biomass precursors for biochar production: performance, mechanism and wastewater application-a review." *Industrial Crops and Products* 128 : 405-423.
- Rangabhashiyam, S., dos Santos Lins, P. V., de Magalhães Oliveira, L. M., Sepulveda, P., Ighalo, J. O., Rajapaksha, A. U., & Meili, L. 2022. Sewage sludge-derived biochar for the adsorptive removal of wastewater pollutants: A critical review. *Environmental Pollution*, 293, 118581.
- Raud, M., Kikas, T., Sippula, O., & Shurpali, N. J. 2019. Potentials and challenges in lignocellulosic biofuel production technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 44-56.
- Reichardt, K., Timm, L. C., Reichardt, K., & Timm, L. C. 2020. How plants absorb nutrients from the soil. *Soil, Plant and Atmosphere: Concepts, Processes and Applications*, 313-330.
- Romdhana, M. H., Lecomte, D., Ladevie, B., & Sablayrolles, C. 2009. Monitoring of pathogenic microorganisms contamination during heat drying process of sewage sludge. *Process Safety and Environmental Protection*, 87(6), 377-386.
- Santana, J. M., Fraga, S. V. B., Zanatta, M. C. K., Martins, M. R., & Pires, M. S. G. 2021. Characterization of organic compounds and drugs in sewage sludge aiming for agricultural recycling. *Heliyon*, 7(4).

- Savini, I., Kihara, J., Koala, S., Mukalama, J., Waswa, B., & Bationo, A. 2016. Long-term effects of TSP and Minjingu phosphate rock applications on yield response of maize and soybean in a humid tropical maize–legume cropping system. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 104, 79-91.
- Sekar, M., Ponnusamy, V. K., Pugazhendhi, A., Nižetić, S., & Praveenkumar, T. R. 2022. Production and utilization of pyrolysis oil from solidplastic wastes: A review on pyrolysis process and influence of reactors design. *Journal of environmental management*, 302, 114046.
- Senthil, C., & Lee, C. W. 2021. Biomass-derived biochar materials as sustainable energy sources for electrochemical energy storage devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110464.
- Shammas, N. K., & Wang, L. K. 2007. Aerobic digestion. *Biosolids treatment processes*, 177-205.
- Shen, J., Yuan, L., Zhang, J., Li, H., Bai, Z., Chen, X., ... & Zhang, F. 2011. Phosphorus dynamics: from soil to plant. *Plant physiology*, 156(3), 997-1005.
- Schachtman, D. P., Reid, R. J., & Ayling, S. M. 1998. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant physiology*, 116(2), 447-453.
- Schimel, J. P., & Bennett, J. 2004. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm. *Ecology*, 85(3), 591-602.
- Schmidt, E. L. 1982. Nitrification in soil. *Nitrogen in agricultural soils*, 22, 253-288.
- Sichler, T. C., Adam, C., Montag, D., & Barjenbruch, M. 2022. Future nutrient recovery from sewage sludge regarding three different scenarios-German case study. *Journal of Cleaner Production*, 333, 130130.
- Singh R, Agrawal M. 2010. Effect of different sewage sludge applications on growth and yield of *Vigna radiata* L. field crop : Metal uptake by plant. *Ecological Engineering* 36, 969–972.
- Singh, J. K., Chaurasia, B., Dubey, A., Faneite Noguera, A. M., Gupta, A., Kothari, R., ... & Abd Allah, E. F. 2020. Biological characterization and instrumental analytical comparison of two biorefining pretreatments for water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) biomass hydrolysis. *Sustainability*, 13(1), 245.
- Singh, R. P., Agrawal, M. 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*. 28. 347–358.
- Singh, S., Kumar, V., Dhanjal, D. S., Datta, S., Bhatia, D., Dhiman, J., & Singh, J. 2020. A sustainable paradigm of sewage sludge biochar: valorization, opportunities, challenges and future prospects. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122259.
- Singh, V., Phuleria, H. C., & Chandel, M. K. 2022. Unlocking the nutrient value of sewage sludge. *Water and Environment Journal*, 36(2), 321-331.

- Sommers, L. E. 1977. Chemical composition of sewage sludges and analysis of their potential use as fertilizers (Vol. 6, No. 2, pp. 225-232). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Sonune, A., Ghate, R., 2004. Developments in wastewater treatment methods. *Desalination, Desalination Strategies in South Mediterranean Countries* 167, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.113>.
- Stevens, J. L., Northcott, G. L., Stern, G. A., Tomy, G. T., Jones, K. C. 2003. PAHs, PCBs, PCNs, organochlorine pesticides, synthetic musks, and polychlorinated n-alkanes in U.K. sewage sludge: Survey results and implications. *Environmental Science & Technology* 37. 462–467.
- Šafaříková, S., Pešata, M. 2006: Zvýšená hladina živin. Živiny v krajině. In: Hrázský, Z., Šafaříková, S. (ed.): Živiny v krajině: dusík, fosfor, eutrofizace půdy a vody, indikace dusíku. DAPHNE ČR - Institut aplikované ekologie, s. 6-11.
- Šimek, M., Cooper, J. E., 2004: Biogeochemical cycles of elements: An introduction behavior of main mineral nutrients of plants and microorganisms. University of South Bohemia, České Budějovice, 29 – 35.
- Šťastný, V. 2019. Biochar—a new perspective in wastewater treatment technology, or a dead end?. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 61(3), 40-43.
- Štráfelda, J., Pardus, I., & Velich, J. 1984. Hnojení travních porostů kaly z čistíren odpadních vod. *Min. les. a vodního hosp.* ČSR.
- Tlustoš, P. 2021. Zpracování čistírenských kalů metodou torefakce a pyrolýzy pro jejich bezpečné použití v zemědělství: Certifikovaná metodika. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-3159-4.
- Uzoma KC, 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* 27:205–212.
- Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New phytologist*, 157(3), 423-447.2
- Wang, P., Qu, E., Li, Z., & Shuman, L. M. 1997. Fractions and availability of nickel in loessial soil amended with sewage or sewage sludge (Vol. 26, No. 3, pp. 795-801). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Wanner, F. 2019. Nakládání s čistírenskými kaly v České republice. SOVAK [online]. Sdružení oboru vodovodů a kanalizací ČR, zs (SOVAK ČR), 5, 1-23.
- Wasik E., Bohdziewicz J., Błaszczyk M. 2001. Removal of nitrates from ground water by a hybrid process of biological denitrification and microfiltration membrane. *Process Biochemistry* 37. 57–64.

- Wei, H., Tang, Y., Li, A., & Yang, H. 2019. Insights into the effects of acidification on sewage sludge dewaterability through pH repeated adjustment. *Chemosphere*, 227, 269-276.
- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Varjani, S. J., & Saravanan, A. 2019. Advances in production and application of biochar from lignocellulosic feedstocks for remediation of environmental pollutants. *Bioresource technology*, 292, 122030.
- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Varjani, S., & Saravanan, A. 2020. A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, 28, e00570.
- Zhang L, Jing Y, Chen C, Xiang Y, Rezaei Rashti M, Li Y, Deng Q, 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* 13:1859–1873.
- Zhang Q, Song Y, Wu Z, Yan X, Gunina A, Kuzyakov Y, Xiong Z. 2020. Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation. *Journal of Cleaner Production* 242: 118435.
- Zhao, B., O'Connor, D., Zhang, J., Peng, T., Shen, Z., Tsang, D.C.W., Hou, D. 2017. Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. *Journal of Cleaner Production*, 174, 977-987.
- Zhou, J. M., Jiang, Z. C., Qin, X. Q., Zhang, L. K., Huang, Q. B., Xu, G. L., & Dionysiou, D. D. 2020. Efficiency of Pb, Zn, Cd, and Mn removal from Karst water by *Eichhornia crassipes*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(15), 5329.
- Zhu, Y., Zhai, Y., Li, S., Liu, X., Wang, B., Liu, X., ... & Zhu, Y. 2022. Thermal treatment of sewage sludge: A comparative review of the conversion principle, recovery methods and bioavailability-predicting of phosphorus. *Chemosphere*, 291, 133053.3.