



Sergej Uš'ak, Jakub Muňoz, Vojtěch Váňa

Možnosti využití hnojivých substrátů na bázi biouhlu z kombinované hydrotermochemické úpravy kontaminovaných bioodpadů

METODIKA PRO PRAXI



Výzkumný ústav
rostlinné výroby, v.v.i.

2021

Metodika vznikla za finanční podpory Technologické agentury ČR a je jedním z výstupů výzkumného projektu TA ČR č. TH03030452 „Hydrotermochemická úprava bioodpadů na biouhel kombinovaná s odstraněním organických škodlivin a rizikových prvků“.

Metodika je určena zemědělcům, zemědělským poradcům, majitelům a provozovatelům čistíren odpadních vod a bioplynových stanic, odborníkům v oblasti meliorací a rekultivací a dalším zájemcům o dotčenou problematiku.

V rámci schválení metodiky byla uzavřena smlouva o využití výsledků v praxi se spolkem CZ BIOM – České sdružení pro biomasu (www.biom.cz).

Metodika byla schválena Ministerstvem zemědělství České republiky, odborem rostlinných komodit.

Oponenti: 1) za státní správu: Ing. Michaela Budňáková (MZe ČR)
2) za odbornou veřejnost: Ing. Petr Hutla, CSc., VÚZT Praha

Ministerstvo zemědělství doporučuje tuto metodiku pro využití v praxi.

„UPOZORNĚNÍ! Uvedená metodika neprošla dosud oponentním řízením a certifikací a její text není definitivní. Poskytovatel metodiky nenese odpovědnost za její užití.“

© Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., 2021

ISBN 978-80-7427-365-0

Sergej Ust'ak, Jakub Muňoz, Vojtěch Váňa

**Možnosti využití hnojivých substrátů na bázi
biouhlu z kombinované hydrotermochemické
úpravy kontaminovaných bioodpadů**

METODIKA PRO PRAXI

Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.

2021

Možnosti využití hnojivých substrátů na bázi biouhlu z kombinované hydrotermochemické úpravy kontaminovaných bioodpadů

Cílem metodiky je poskytnout zemědělcům, zemědělským poradcům, majitelům a provozovatelům čistíren odpadních vod (ČOV) a bioplynových stanic (BPS), odborníkům v oblasti meliorací a rekultivací, investorům a dalším zájemcům o dotčenou problematiku základní informace o hnojivých přípravcích ke zlepšení půdních vlastností na bázi kombinované hydrotermochemické úpravy bioodpadů včetně kontaminovaných (především kalů ČOV). V úvodu metodika poskytuje základní přehled literárních informací ohledně uhlí podobných hmot, způsobech jejich přípravy, zejména způsobu hydrotermochemické karbonizace bioodpadů včetně kontaminovaných, dále přehled jejich základních vlastností a zejména možností a perspektiv aplikace v praxi. Dále metodika popisuje vlastní výsledky získané v průběhu řešení výzkumného projektu využitelné v praxi a poskytuje jejich agrochemické, ekologické a ekonomické hodnocení. Na závěr uvádí přehled potenciálu uplatnění a hlavních možností využití nových hnojivých přípravků na bázi hydrotermochemické úpravy bioodpadů včetně kontaminovaných ke zlepšení půdních vlastností a zejména pro zúrodnění běžných zemědělských a antropogenních půd.

Klíčová slova: hnojivé substráty; biouhel; biochar; zpracování bioodpadu; hydrotermochemická úprava bioodpadů; kontaminované bioodpady; kaly ČOV; hodnocení přínosu.

The possibilities to use biochar-based fertilizing substrates from combined hydrothermochemical treatment of contaminated biowastes

The methodology aim is to provide the basic information about fertilizing products for improving soil properties based on combined hydrothermochemical treatment of biowaste, including contaminated ones (especially sewage sludge) to the farmers, agricultural advisers, owners and operators of wastewater treatment plants (WWTPs) and biogas plants (BGP), experts in reclamation and amelioration field, investors and others interested parties on the questions concerned. In the introduction, the methodology provides a basic overview about literary information regarding to coal similar materials, methods for their preparation, especially the methods of biowaste hydrothermochemical carbonization, including contaminated ones, as well as an overview about their basic properties and especially the possibilities and perspectives of application in practice. Furthermore, the methodology describes the results obtained during the solution of the research project that are usable in practice, and it provides their agrochemical, ecological and economic evaluation, too. Finally, it is provided an overview of the potential and main possibilities to apply the new fertilizers based on biowaste hydrothermochemical treatment, including contaminated ones, for improving soil properties and especially for the fertilization of common agricultural and anthropogenic soils.

Key words: fertilizing substrates; biochar; biowaste processing; biowaste hydrothermochemical treatment; contaminated biowastes; sewage sludge; evaluation of benefits.

O B S A H

I. CÍL METODIKY	4
II. VLASTNÍ POPIS METODIKY A VÝSLEDKY VYUŽITELNÉ ZEMĚDĚLSKOU PRAXÍ.....	4
1. Úvod.....	4
2. Vegetační zkoušky hnojivých substrátů na bázi biouhlu z kombinované hydrotermochemické úpravy bioodpadů	7
2.1. Objekty a metody pokusů.....	8
2.1.1. Základní pěstební substrát a varianty pokusu	8
2.1.2. Základní popis testovaných hnojivých přípravků na bázi biouhlu.....	10
2.1.3. Popis provedení vegetačních pokusů s ovsem a hořčicí	13
2.1.4. Popis provedení vegetačních pokusů s kukuřicí	15
2.1.5. Popis provedení vegetačních pokusů s pšenicí	16
2.2. Hodnocení výsledků vegetačních pokusů vybraných plodin.....	17
2.2.1. Výsledky první etapy vegetačních pokusů s hořčicí a ovsem.....	17
2.2.2. Výsledky druhé hlavní etapy vegetačních pokusů s kukuřicí a pšenicí..	19
2.2.3. Celkové hodnocení výsledků vegetačních zkoušek a diskuze	20
2.3. Podmínky aplikace přípravků na běžné a antropogenní půdy	23
2.4. Souhrnná doporučení pro uživatele z praxe.....	28
2.5. Obrazová příloha	28
III. Ekonomické aspekty a další přínosy pro uživatele.....	32
IV. Potenciál využití přípravků a možnosti uplatnění metodiky.....	32
V. Srovnání novosti postupů	33
VI. Popis uplatnění metodiky	33
VII. Seznam použité související literatury	34
VIII. Seznam publikací, které předcházely metodice.....	35

I. CÍL METODIKY

Cílem metodiky je poskytnout zemědělcům, zemědělským poradcům, majitelům a provozovatelům čistíren odpadních vod (ČOV) a bioplynových stanic (BPS), odborníkům v oblasti meliorací a rekultivací, investorům a dalším zájemcům o dotčenou problematiku základní informace o přípravcích ke zlepšení půdních vlastností na bázi kombinované hydrotermochemické úpravy bioodpadů, včetně kontaminovaných, a to především kalů ČOV. Doposud v České republice (ČR) podobná metodika zpracována nebyla. V úvodu metodika poskytuje základní přehled literárních informací ohledně uhlí podobných hmot, způsobech jejich přípravy, zejména způsobu hydrotermochemické karbonizace a základních vlastností, možností a perspektiv aplikace v praxi. Dále metodika popisuje vlastní výsledky získané v průběhu řešení výzkumného projektu využitelné v praxi a poskytuje jejich agrochemické, ekologické a ekonomické hodnocení. Na závěr uvádí přehled potenciálu uplatnění a hlavních možností využití nových přípravků na bázi hydrotermochemické úpravy bioodpadů, včetně kontaminovaných, především anaerobně stabilizovaných kalů z čistíren odpadních vod, ke zlepšení půdních vlastností a zejména pro zúrodnění běžných zemědělských a antropogenních půd.

II. VLASTNÍ POPIS METODIKY A VÝSLEDKY VYUŽITELNÉ ZEMĚDĚLSKOU PRAXÍ

1. Úvod.

Současná odpadová politika Evropské unie směřuje k vytvoření účinného systému nakládání s bioodpady se zvýšeným obsahem škodlivin, tzv. kontaminovanými bioodpady, zejména kalů z čistíren odpadních vod (ČOV) a digestátů z bioplynových stanic (BPS), s co nejmenším dopadem na životní prostředí. Stoupající trend produkce zmíněných bioodpadů lze očekávat i do budoucna z důvodu zpřísnění požadavků na kvalitu vyčištěné vody. Proto je důležitý vývoj nových postupů a technologií pro úpravu takových bioodpadů za účelem jejich materiálového a energetického využití.

V posledních letech vznikl v odborných kruzích velký zájem o výzkum uhlí podobných hmot připravovaných z biomasy a zejména z bioodpadů,

včetně kontaminovaných, které jsou často nazývány biocharem (česky biouhlem). V podstatě se jedná o obdobu dřevného uhlí, ale vyrobeného ze zbytkové a odpadní biomasy (Šťastný, 2019). Základní složkou je chemicky stabilní uhlík, který nepodléhá dalšímu rozkladu ani oxidaci. Tento materiál má použití ovšem všestrannější než obyčejné dřevné uhlí. Z hlediska ochrany životního prostředí je především důležité to, že zdrojem výroby biouhlu jsou hlavně bioodpady, jejichž využití se tím stává mnohem lépe dostupné a potřebné.

Biouhel je získáván především jako tuhý produkt pyrolýzy (pyrolýzní uhlí). Další možností pro efektivní výrobu uhlí podobné hmoty neboli biouhlu je vysokotlaká hydrotermochemická úprava biomasy (event. bioodpadů) v uzavřeném systému, bez přístupu vzduchu a často s použitím chemických katalyzátorů, která v poslední době získala název hydrotermální karbonizace (česká zkratka HTK, angl. zkratka HTC). Tento způsob zpracování bioodpadů vyvolal v posledních letech velký zájem odborníků z celého světa, především v rámci nových projektů aplikovaného výzkumu, vývoje a inovací (viz např. Titirici et al., 2007, 2012; Funke A, Ziegler F., 2009; Kos, 2015, 2016). Dle těchto autorů HTC proces zpracování biomasy je energeticky příznivější ve srovnání s tradiční pyrolýzou, protože využívá mírnější podmínky, nepotřebuje předchozí sušení surovin a je exotermický, a proto energeticky přispívá k zásobení až 1/3 celkové energie potřebné k dokončení procesu HTC. Navíc se ušetří významné množství energie tím, že se suroviny při HTC úpravě biomasy nemusí předběžně vysušit, což představuje 2 až 2,5násobně větší potřebu energie, než jí spotřebujeme při ohřevu vodní suspenze biomasy do reakční pozice. Další výhodou HTC oproti pyrolýze jsou významně menší ztráty uhlíku a skoro žádná produkce škodlivých emisí a dehtů (Libra et al., 2011; Titirici et al, 2012). Nesmíme opomenout také možnost výroby pomocí technologie HTC biouhelnatých tuhých biopaliv s vysokou koncentrací uhlíku a tím i energie, příznivých z hlediska jejich logistiky.

Aplikací biouhlu lze díky jeho vysoké chemické odolnosti velmi efektivně vyřešit potřebu snížení emisí CO₂ sekvestrací (ukládáním) uhlíku do půdy (Lehmann, J., 2007b; Sevilla et al, 2011). Biouhel, kromě jeho potenciálně dlouhé rezidentní doby v půdním prostředí, má další výhodu ve zvýšení úrodnosti půdy (Glaser et al., 2002) a stimulaci klíčových rhizobiálních mikroorganismů (Warnock et al., 2007), což zlepšuje podmínky pro růst

rostlin a přispívá k udržitelnému obhospodařování půd (Glaser, B., 2007; Lehmann, 2007a,b). Dle některých výzkumů (Titirici et al., 2012; Wang et al., 2012) jsou biouhelné sorbenty schopné na sebe vázat těžké kovy a rezidua organických cizorodých látek, čímž omezují jejich vstup do rostlin a jsou využitelné jako filtrační materiál při čištění odpadních vod nebo jako složka náplní biofiltrů na čištění odplynů. Proto se mohou stát biouhly a jim podobné látky výborným základem pro výrobu přípravků s vysokými sorpčními vlastnostmi, které jsou perspektivní pro použití v zemědělství, a to především ve formě tzv. pomocných půdních přípravků.

V této publikaci jsou prezentovány výsledky výzkumu zaměřeného především na kaly čistíren odpadních vod (ČOV) jako odpadní produkty ze zařízení často produkujících zbytkové teplo, využitelné pro realizaci hydrotermální úpravy těchto odpadů. Podobné odpady jsou často obtížně likvidovatelné a obsahují velké množství vody, což ztěžuje logistiku nakládání s nimi. Proto jsou velmi vítány nové přístupy a technologie pro zpracování a využití mokrých a tekutých bioodpadů, mezi které lze zařadit rovněž hydrotermochemickou karbonizaci.

Termín biouhel se používá pro produkty z více způsobů tepelné úpravy biomasy, proto je nutno striktně rozlišovat biouhel získaný termickou pyrolýzou suchou cestou a HTCh biouhel získaný mokrou cestou v hermeticky uzavřeném systému. První z nich je v zahraniční literatuře obvykle označován jako biochar, kdežto druhý jako hydrochar. Tyto biouhly mají topné vlastnosti podobné hnědému uhlí neboli lignitu, jsou docela hydrofobní a hlavně mají ve srovnání s původní surovinou vyšší spalné teplo a výhřevnost, což je činí vhodnějšími pro spalování. Hydrochar je na rozdíl od biocharu jemnozrný a snadno drobivý, a proto je vhodnější pro následné peletování.

V případě zpracování bioodpadů kontaminovaných vysokým obsahem patogenních mikroorganismů je HTCh úprava díky vysoké teplotě, tlaku a vlhkosti schopna zajistit dokonalou likvidaci veškerých patogenních mikroorganismů a tím minimalizovat hygienická rizika dalšího využití vzniklých produktů.

V případě zpracování bioodpadů kontaminovaných organickými polutanty je HTCh úprava schopna zajistit částečný až úplný rozklad většiny organických škodlivin, přičemž výstupní hladinu organických polutantů lze

poměrně snadno regulovat změnou procesních parametrů, především teplotou, tlakem a dobou úpravy.

Nejsložitější je zpracování bioodpadů kontaminovaných rizikovými prvky, neboť HTCh úprava neumožňuje na rozdíl od organických škodlivin jejich rozložení na jednoduché netoxické produkty. Může se jednat pouze o jejich cílené snížení podle potřeby buď v tuhé nebo v kapalně složce výstupního produktu. Celkový obsah rizikových prvků v vsádce suroviny do HTCh reaktoru zůstane stejný, změní se akorát jejich podíl v tuhé a kapalně složce vstupní suroviny a výstupního produktu. Tento podíl obsahu rizikových prvků v tuhé a kapalně složce výstupního produktu lze poměrně snadno regulovat změnou procesních parametrů, především teplotou, dobou úpravy a hlavně přidáním vhodných chemických látek jako procesních katalyzátorů a/nebo podpůrných přípravků pro extrakci rizikových prvků z tuhé složky bioodpadu do kapaliny za účelem jejich následné separace a odstranění. Z výše uvedených důvodů musí zařízení pro HTCh úpravu kontaminovaných bioodpadů být doplněno o technologické moduly umožňující snížení obsahu rozličných typů škodlivin v konečných produktech.

2. Vegetační zkoušky hnojivých substrátů na bázi biouhlu z kombinované hydrotermochemické úpravy bioodpadů

Provedení vegetačních zkoušek hnojivých substrátů na bázi biouhlu z hydrotermochemické konverze bioodpadů ve srovnání s dalšími podobnými výrobky bylo prováděno v letech 2019–2021 za účelem porovnání vybraných receptur z hlediska účinnosti ve výživě rostlin, a to na několika základních zemědělských plodinách. Součástí zkoušek bylo hodnocení výnosů a kvality rostlinné produkce. Rovněž byly ověřeny hnojivé účinky testovaných substrátů včetně obsahu rizikových prvků a jejich transportu do rostlin. Vegetační testy byly zahájeny v roce 2019 pěstováním dvou běžných zemědělských plodin, a to ovsa a hořčice. V roce 2020 řešení pokračovalo vegetačními zkouškami další významné zemědělské plodiny, a to kukuřice a v roce 2021 pak vegetačními zkouškami pšenice. Stručný popis výsledků získaných v průběhu těchto pokusů, včetně hodnocení navazujících laboratorních rozborů, následuje dále.

2.1. Objekty a metody pokusů

2.1.1. Základní pěstební substrát a varianty pokusu

Jako základní substrát pro testování hnojivých účinků přípravků na bázi biouhlu byla zvolena uměle připravená půdní směs, která se skládá z na živiny poměrně chudé půdy a kopaného říčního písku v poměru 2:1. Půda byla odebrána na pokusném pozemků stanice VÚRV v Chomutově a jedná se o půdní druh písčito-hlinitý a půdní typ kambizem. Jednotlivé komponenty směsi se nechaly nejprve na betonové ploše částečně vyschnout, poté byly zbaveny rostlinných zbytků a skeletu, prosety na prohazovacím sítu o velikosti ok 10 mm a homogenizovány. Před homogenizací byly pro pozdější chemické analýzy odebrány směsné vzorky jednotlivých komponent směsi a po homogenizaci i vzorky výsledné homogenní směsi. Následně bylo odměřeno potřebné množství dané půdy (pro nádoby s užitným objemem 6 l), váhově sjednocena navážka pro oba druhy půd a tato byla vpravena do jednotlivých pokusných nádob a přiměřeně utlačena. Objemový deficit, vzniklý utlačením půdní směsi, byl poté doplněn ve stejném množství u všech pokusných nádob. Výsledky základních chemických rozborů popsané pěstební směsi jsou uvedeny v tabulkách č. 1 až 2.

Tab. 1. Základní agrochemické rozborů směsného pěstební substrátu

Materiál	Obsah přijatelných živin mg/kg sušiny půdy dle Mehlicha III				N _{celk} % sušiny	Cox % sušiny	Humus % sušiny	pH/ H ₂ O	pH/ KCl	Potřeba vápnění CaO q/ha
	P	K	Ca	Mg						
Směs (Z+P)*	73,2	254	1786	224	0,246	2,21	3,81	5,73	5,22	7,00

Poznámka: * - zde a dále: Směs (Z+P) = Směs substrátů (Zemina + Písek)

Tab. 2. Obsah vybraných rizikových prvků ve směsném pěstebním substrátu

Materiál	Obsah TK mg/kg sušiny ve výluhu lučavkou královskou					
	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr
Směs (Z+P)	17,3	61,5	1,22	0,20	8,96	15,8
	Cu	Mo	Ni	Pb	V	Zn
	14,2	0,43	13,0	15,8	26,1	55,8

Dle tabulek hodnocení obsahu přijatelných živin v orné půdě dle Mehlicha III je obsah fosforu a vápníku v testované směsné půdě vyhovující,

obsah draslíku a hořčíku dobrý. Obsah organického uhlíku, humusu a dusíku je poměrně vysoký, poměr C:N je 8,9. Jedná se o půdu kyselou potřebující vápnění. Z hlediska obsahu sledovaných rizikových prvků žádný limitní obsah pro zemědělské půdy nebyl překročen.

Jako pěstební nádoby byly použity polypropylenové nádoby s podmiskami pro zachycení přebytečné vody o průměru 280 mm, s předpokládanou půdní náplní o objemu 6 l. Základní živiny byly, dle variantního schématu (kromě nehnojené kontrolní varianty), do celého objemového profilu připravené půdní směsi vmíchány ve formě vícesložkového minerálního hnojiva NPK (11-7-7), a to v množství 2,17 g na jednu pokusnou nádobu, což odpovídá dávce 60 kgN/ha v případě ovsa a hořčice, a v množství 3,44 g na jednu pokusnou nádobu, což odpovídá dávce 90 kgN/ha v případě pšenice a kukuřice. Do svrchního profilu (10 cm) pak byly, dle připravených variant, aplikovány jednotlivé typy biouhlu ve třech stupňovaných dávkách – 20 g, 40 g a 80 g na jednu pokusnou nádobu, což odpovídá v přepočtu množství 3 t, 6 t a 12 t/ha, který byl dostatečně promísen s půdní směsí. Pokusné nádoby byly řádně označeny dle variantního schématu.

V první etapě vegetačních pokusů v roce 2019 byly varianty vegetačního pokusu odlišné od druhé hlavní etapy testované v letech 2020-2021.

Varianty nádobového pokusu v roce 2019:

- A1–A2–A3 – tři stupňované dávky hydrocharu z kalu ČOV;
- B1–B2–B3 – tři stupňované dávky hnědouhelného mouru z dolu Most;
- C1–C2–C3 – tři stupňované dávky komerčního dřevěného uhlí;
- D1–D2–D3 – tři stupňované dávky hydrocharu z digestátu;
- KH – kontrolní minerálně hnojená varianta (bez biocharu, ale s přídatkem hnojiva NPK);
- K – kontrolní nulová varianta (bez biocharu a bez přidaného hnojiva).

Dávka minerálního hnojiva byla v přepočtu 60 kgN/ha. Každá varianta byla realizována ve třech opakováních, celkem 42 nádob na pokus s jednou plodinou.

Varianty nádobového pokusu v letech 2020-2021:

- A1–A2–A3 – tři stupňované dávky pyrocharu z kalu ČOV

-
- B1–B2–B3 – tři stupňované dávky hydrocharu z kalu ČOV
 - C1–C2–C3 – tři stupňované dávky hydrocharu z papírenského kalu
 - D1–D2–D3 – tři stupňované dávky hydrocharu z digestátu
 - KH – kontrolní minerálně hnojená varianta (bez biocharu, ale s přidavkem hnojiva NPK);
 - K – kontrolní nulová varianta (bez biocharu a bez přidaného hnojiva).

Dávka minerálního hnojiva byla v přepočtu 90 kgN/ha. Každá varianta byla realizována ve čtyřech opakováních, celkem 56 nádob na pokus s jednou plodinou.

2.1.2. Základní popis testovaných hnojivých přípravků na bázi biouhlu

Pro hlavní srovnávací zkoušky v rámci vegetačních pokusů byly zvoleny 4 různorodé uhelné substráty, a to pyrochar z kalu ČOV, hydrochar z kalu ČOV, hydrochar z papírenského kalu a hydrochar z digestátu.

První z testovaných přípravků je pyrochar z typového kalu ČOV (původ Ústřední čistírna odpadních vod (ÚČOV) na Císařském ostrově, Praha). Pyrolýzní úprava kalu ČOV probíhala následujícím způsobem: sušení suroviny při 105 °C, zuhelnatění bez přístupu vzduchu při 460 °C po dobu 3 hodin, drcení výstupního produktu.

Druhý z nich je hydrochar kalu – biouhel připravený z kontaminovaného kalu ČOV s vyšším obsahem rizikových prvků, předběžně upraveného dekontaminační extrakcí pomocí 0,1 M roztoku EDDS (ethylendiamindijantarové kyseliny), neboť tento postup byl v předchozích etapách vytipován jako jeden z nejefektivnějších pro úpravu kontaminovaných kalů. Extrakce byla prováděna vsázkovým způsobem při pokojové teplotě a neutrálním pH prostředí na orbitální třepačce při 160 ot/min v průběhu 8 hodin, přičemž poměr pevné a tekuté části byl 1:10. Následná hydrotermální úprava dekontaminovaného kalu na biouhel byla prováděna při teplotě 230 °C po dobu 4 hodin s následným oddělením tuhého podílu filtrací, pak následovalo sušení při 70 °C a jemné drcení.

Třetím z testovaných přípravků je biouhel z papírenského kalu (původ Štětí). Hydrotermální úprava papírenského kalu probíhala stejným způsobem jako v případě kalů, tj. poměr tuhý: tekutý podíl 1: 10, 230 °C, 4 hodiny, sušení a jemné drcení.

Čtvrtým z testovaných přípravků je biouhel z digestátu zemědělské BPS (lokalita Vysočany). Hydrotermální úprava digestátu probíhala stejným

způsobem jako v případě kalů, tj. poměr tuhý: tekutý podíl 1: 10, 230 °C, 4 hodiny, sušení a jemné drcení.

Porovnání obsahů vybraných rizikových a stopových prvků v surovinách, a to v digestátu BPS, papírenském kalu a v kalu ČOV před a po dekontaminaci, a následně v biouhlech typu hydrochar po hydrotermotlakové úpravě (neboli hydrotermální karbonizaci) těchto substrátů poskytují následující tabulky č. 3 (papírenský kal a digestát) a č. 4 (kaly ČOV). Z uvedených výsledků lze konstatovat, že obsah rizikových prvků v biouhlu po hydrotermální hydrolýze jednotlivých surovin se u většiny testovaných prvků mírně zvyšuje. Tím kvalita výstupních produktů záleží především na charakteristice původní suroviny. Nejlepší kvalita je u papírenského kalu, druhým v pořadí je digestát zemědělských bioplynových stanic. Nejhorší kvalita je u kalů ČOV, zejména z velkoměst. Námi testovaný kal pochází z ÚČOV Praha Bubeneč.

Tab. 3. Výsledky chemických rozborů testovaných substrátů z hlediska obsahu stopových a rizikových prvků ve srovnání se zemědělskými normami (naměřené a limitní hodnoty jsou uvedeny jako celkový obsah po rozkladu lučavkou královskou v mg/kg sušiny)

Rizikový prvek	Naměřený obsah ve vzorku				Limitní hodnoty rizikových prvků v org. hnojivech dle vyhl. č. 474/2000 Sb. k zákonu o hnojivech č. 156/1998 Sb. ¹⁾ v platném znění	Mezní hodnoty obsahu rizikových prvků v kalech ČOV pro jejich použití na zemědělské půdě dle vyhl. 273/2021 Sb. ²⁾
	Surovina (papírenský kal)	Hydrochar z papírenského kalu	Surovina (digestát)	Hydrochar z digestátu		
As	3,82	4,06	2,12	2,36	30	30
Be	0,654	0,687	0,164	0,187	--	--
Cd	0,633	0,641	0,336	0,344	1**/ 2	5
Co	3,36	3,72	1,49	1,68	--	--
Cr	20,4	21,8	2,58	2,85	100	200
Cu	21,2	22,3	26,2	23,4	100/ 150/ 250*	500
Hg	0,144	0,127	0,132	0,104	1,0	4,0
Mo	1,37	1,51	2,41	2,69	--	--
Ni	18,5	20,1	8,45	9,29	50	100
Pb	8,53	9,36	1,61	1,83	100	200
V	20,3	22,4	9,2	10,5	--	--
Zn	81,7	88,3	131	149	300/600/1200*	2500
Al	13417	14630	289	319		
Fe	5342	5862	1696	1885		
Mn	19,3	22,5	160	160	--	--
S	4656	4486	4110	4008		
B	27,7	24,9	33,4	31,8	--	--
Ba	50,9	54,3	17,6	19,7	--	--

Z tabulky je rovněž vidět, že dekontaminace pomocí chelatačního činidla dle výše popsaného postupu byla nejefektivnější (nadpoloviční) v případě Cu (snížení o 59,2 % původní hodnoty), Zn (o 54,7 %), Cd (o 54,3 %) a Cr (50,2 %), dalšími v pořadí byly Ni (49,4 %), Co (47,2 %), Mn (47,1 %), V (43,3 %), a Pb (41,8 %), a Mo (41,3 %).

Tab. 4. Výsledky chemických rozborů testovaných substrátů z hlediska obsahu stopových a rizikových prvků ve srovnání se zemědělskými normami (*naměřené a limitní hodnoty jsou uvedeny jako celkový obsah po rozkladu lučavkou královskou v mg/kg sušiny*)

Rizikový prvek	Naměřený obsah ve vzorku				Limitní hodnoty rizikových prvků v org. hnojivech dle vyhl. č. 474/2000 Sb. k zákonu o hnojivech č. 156/1998 Sb. ¹⁾ v platném znění	Mezní hodnoty obsahu rizikových prvků v kalech ČOV pro jejich použití na zemědělské půdě dle vyhl. 273/2021 Sb. ²⁾
	Surovina (kal ČOV před dekontam.)	Surovina (kal ČOV po dekontam.)	Hydrochar z kalu ČOV	Pyrochar z kalu ČOV		
As	19,5	16,4	15,8	14,7	30	30
Be	0,175	0,117	0,141	0,906	--	--
Cd	2,184	0,998	0,964	2,923	1**/ 2	5
Co	9,21	4,86	5,39	7,28	--	--
Cr	105	52,3	59,5	71,5	100	200
Cu	234	95,4	98,6	177	100/ 150/ 250*	500
Hg	0,489	0,436	0,377	0,253	1,0	4,0
Mo	5,38	3,16	3,58	6,05	--	--
Ni	76,5	38,7	42,9	47,5	50	100
Pb	104	60,5	74,8	150	100	200
V	25,2	14,3	16,1	28,6	--	--
Zn	1119	507	562	835	300/600/1200*	2500
Al	9786	7816	8602	1808		
Fe	9532	7783	8674	1636		
Mn	257	136	167	279	--	--
S	10750	10086	9571	9613	--	--
B	17,45	16,15	16,33	22,8		
Ba	183	128	145	248	--	--

Ostatní prvky měly snížení o méně než jednu třetinu. Nejnižší hodnoty dekontaminace (pod 10 %) měly nekovy, a to S a B. Je zřejmé, že nekovy se chovají při zvolených procesech dekontaminace a následně hydrotermální karbonizace úplně odlišným způsobem než kovy. Poznamenejme však, že od žádné dekontaminační metody nemůžeme očekávat plné odstranění rizikových prvků, ale pouze částečné, přičemž různé prvky budou mít různou efektivitu dekontaminace. Rozhodující je dosažení podlimitních hodnot. Např. u námi testovaného kalu došlo po dekontaminaci ke snížení hodnot pod stanovené limity pro hnojiva se

sušinou větší než 13 % právě u 6 prvků, a to Cd, Cr, Cu, Zn, Ni a Pb. U ostatních prvků tyto normy nebyly překročeny ani před dekontaminací anebo jejich obsahy nejsou limitovány.

Příprava pyrocharu probíhala bez dekontaminační úpravy, neboť se jedná o suchý proces. Jako následek obsah většiny stopových a rizikových prvků, zejména pravých kovů, je v pyrocharu znatelně vyšší než v hydrocharu, přičemž u pyrocharu došlo k překročení limitního obsahu pro organická hnojiva u 4 z 6 prvků, jejichž hodnoty byly překročeny u suroviny (kal ČOV), a to u Cd, Cu, Zn a Ni. Pouze obsah Cr a Ni byl pod stanoveným limitem (viz stínované hodnoty v tab. 4).

Základní agrochemické rozborů všech čtyř testovaných biouhelných přípravků jsou uvedeny v následující tabulce 5. Z uvedených výsledků je vidět, že nejvyšším obsahem dusíku, jako nejdůležitější živiny, se vyznačuje hydrochar z digestátu, za ním docela těsně následují oba dva biouhly (hydrochar a pyrochar) z kalu ČOV. Na posledním místě je hydrochar z papírenského kalu s obsahem dusíku nižším o cca ¼. Oba dva biouhly z kalu mají velmi vysoký obsah fosforu a síry s vícenásobným rozdílem oproti biouhlu z papírenského kalu a digestátu, kdežto obsah draslíku má zcela obrácenou tendenci, a to mnohem vyšší obsah v biouhlu z digestátu s největším (více než 10násobným) rozdílem oproti biouhlům z kalů. Obsah zbylých živin (Ca, Mg, Na a B) nevykazuje tak významné rozdíly mezi testovanými biouhly.

Tab. 5. Výsledky agrochemických rozborů testovaných uhelných přípravků na obsah živin (celkový obsah živin v % sušiny)

Přípravek	N	P	K	Ca	Mg	Na	S	B
<i>Pyrochar z kalu ČOV</i>	3,74	2,27	0,311	3,11	0,488	0,123	9 613	22,8
<i>Hydrochar z kalu ČOV</i>	3,82	1,87	0,230	3,52	0,151	0,024	9 571	16,3
<i>Hydrochar z papírenského kalu</i>	2,75	0,802	0,815	3,08	0,319	0,075	4 486	24,9
<i>Hydrochar z digestátu BPS</i>	3,94	0,776	3,820	1,37	0,818	0,138	4 208	13,5

2.1.3. Popis provedení vegetačních pokusů s ovsem a hořčicí

Jako základní testovací plodina v prvním roce experimentů byla zvolena hořčice setá (*Sinapis alba*), odrůda Zlata, která byla zaseta v množství 20 ks semen na jednu nádobu. Jednotlivá semena byla dle šablony rozmístěna na osevní ploše a poté zatlačena do hloubky 2,5 cm. Osetý povrch byl následně urovnán a byla aplikována iniciační závlivková dávka pro každou pěstební

nádobu v množství 300 ml na jednu pokusnou nádobu. Zálivka v průběhu vegetace byla zajišťována dle průběhu počasí, a to v dávce 1–2 jednotky (300 ml) na nádobu, na počátku vegetačního cyklu na povrch půdy, později pak do podmisek pokusných nádob; v extrémně teplém počasí pak byla zálivka aplikována v dvojnásobné dávce (600 ml). Po vzejití jednotlivých rostlin byly tyto vyjednoceny na finální počet 8 ks.

Ošetřování rostlin v pokusných nádobách spočívalo jednak v zásahu proti chorobám a škůdcům (dle klimatické situace a stupně napadení), a to použitím vhodných pesticidních přípravků – konkrétně byl v průběhu vegetace aplikován insekticidní přípravek Karate se Zeon technologií 5 SC proti dřepčíkům – dále v mechanickém odplevelování a narušování půdního škrálopou povrchu půdy. Ve fázi plného květu byla nadzemní biomasa jednotlivých rostlin sklizena. Rostliny byly odstříženy u země, ihned zváženy a poté rozloženy za účelem usušení. Usušená nadzemní hmota byla zvážena a zjištěné hodnoty zaznamenány.

Po sklizni první testovací plodiny se ve stejných pokusných jednotkách realizoval tentýž experiment s druhou testovací plodinou – ovšem setým (*Avena sativa*). Povrch pokusných nádob byl po první sklizené plodině zbaven mechanických nečistot. K příslušným variantám bylo přidáno hnojivo (NPK 11-7-7) ve stejné dávce, tzn. 2,17 g na jednu pokusnou nádobu a toto bylo následně prokypřením půdní směsi zapraveno. Každá pokusná nádoba byla rovnoměrně oseta semeny ovsa setého v počtu 28 ks do hloubky cca 3 cm. Následně byla na povrch každé pokusné nádoby aplikována iniciační zálivková dávka vody v množství 300 ml. V průběhu vegetace byla zálivka zajišťována dle průběhu počasí, a to v dávce 1–2 jednotky (300 ml – 600 ml) na nádobu. Po vzejití byly mladé rostliny vyjednoceny na konečný počet 20 jedinců.

V průběhu růstu bylo ošetření omezeno pouze na mechanické zásahy (vytrhávání plevelných rostlin, odstraňování mechanických nečistot). Vzhledem k pokročilému podzimnímu termínu byl růst ukončen ve fázi počátku odnožování a jednotlivé rostliny sklizeny odstřížením těsně u povrchu půdy. Následně byla sklizená biomasa z každé pokusné nádoby zvážena, usušena a opětovně zvážena. Suchá biomasa pak byla dána ke zpracování pro následnou chemickou analýzu.

2.1.4. Popis provedení vegetačních pokusů s kukuřicí

Jako základní testovací plodina ve druhém roce experimentů byla zvolena kukuřice setá (*Zea mays*) - hybrid CEKLAD 235, přičemž osev pěstebních nádob byl proveden následně po aplikaci biocharu v polovině června roku 2020. Zvolený hybrid CEKLAD 235 je extrémně raný tříliniový (MTc) hybrid s raností FAO 235 a mezitypovým typem zrna vhodný pro pěstování na zrno v teplejší řepařské oblasti a na siláž v bramborářské, obilnářské a chladnější řepařské oblasti, s využitím na zrno, siláž i bioplyn, v rámci své kategorie ranosti poskytující velmi dobré výnosy zrna i siláže a vykazující velmi dobrý zdravotní stav.

Osevní množství dle metodik ÚKZÚZ činilo 9 ks semen na jednu nádobu. Semena byla vybrána pohledově zdravá, nepoškozená, bez deformací nebo barevných změn. Jednotlivá semena byla dle šablony rozmístěna na osevní ploše pokusné nádoby a poté zatlačena do hloubky 8 cm. Osetý povrch byl následně urovnán a byla aplikována iniciační závlivková dávka pro každou pěstební nádobu v množství 300 ml na jednu pokusnou nádobu. Závlivka v průběhu vegetace byla zajišťována dle průběhu počasí, a to v dávce 1–2 jednotky (300 ml) na nádobu, na počátku vegetačního cyklu na povrch půdy, později pak do podmisek pokusných nádob; v extrémně teplém počasí pak byla závlivka aplikována v dvojnásobné dávce (600 ml). Po osevu nádob byl pravidelně mechanicky udržován bezplevelný povrch půdy a rovněž byl rozrušován půdní škraloup vzniklý závlivkou nebo dešťovými srážkami. Od doby zasetí byla průběžně kontrolována vzcházivost semen v jednotlivých nádobách. Po vzejití rostlin byly tyto vyjednoceny na finální počet 4 ks na nádobu.

Ošetřování nádobových pokusů za vegetace – od vzejití rostlin po sklizeň – spočívalo v mechanické eliminaci plevelných rostlin a v počátečních fázích růstu rostlin v rozrušování půdního povrchu – půdního škraloupu – vzniklého v důsledku závlivky v kombinaci s typem půdy a počasím.

Ve fázi intenzivního nárůstu biomasy (25. 8. 2020) byla tato nadzemní biomasa jednotlivých rostlin v nádobách sklizena. Rostliny byly odstřiženy u povrchu půdy, ihned zváženy (čerstvá hmota) a poté rozloženy na teplé místo za účelem předsušení. Následně byly předsušené rostliny pozvolně sušeny v sušících pecích při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin. Usušená nadzemní hmota byla zvážena (suchá hmota) a zjištěné hodnoty

zaznamenány. V následném termínu byly ze všech nádob odebrány půdní vzorky (ze třech odběrů půdy z každé nádoby byl vytvořen směsný vzorek pro danou variantu), tyto byly zpracovány (sušení, drcení, prosévání, vážení) a předány do laboratoří k provedení chemické analýzy. Získané výsledky byly poté podrobeny hodnocení a zaneseny do výroční zprávy.

Po ukončení vegetačního pokusu byly nádoby přeneseny z pokusného stanoviště a uloženy na suchém chráněném místě (skleník).

Během celého průběhu realizace vegetačního nádobového pokusu byla průběžně pořizována příslušná fotodokumentace (viz obrazová příloha).

2.1.5. Popis provedení vegetačních pokusů s pšenicí

Jako testovací plodina v třetím roce testování byla zvolena pšenice setá jarní (*Triticum aestivum*) – odrůda Vánek a osev pěstebních nádob byl proveden následně po aplikaci biocharu počátkem dubna roku 2021. Odrůda „Vánek“ je středně raná odrůda elitní (E) jakosti se středně vysokým až nízkým výnosem zrna v ošetřené i neošetřené variantě pěstování. Rostliny jsou středně vysoké až vysoké, středně až méně odnožující, zrno je velké až velmi velké. Hlavní přednosti jsou střední odolnost proti napadení fuzariózami klasů a vysoká objemová hmotnost. Naopak mezi pěstitelská rizika patří menší odolnost proti napadení padlím travním na listu a v klasu, rzí pšeničnou a travní, nižší hodnota čísla poklesu.

Osevní množství dle metodik ÚKZÚZ činilo 28 ks semen na jednu nádobu. Semena byla vybrána pohledově zdravá, nepoškozená, bez deformací nebo barevných změn. Jednotlivá semena byla dle šablony rozmístěna na osevní ploše pokusné nádoby a poté zatlačena do hloubky 2,5 cm. Osetý povrch byl následně urovnán a byla aplikována iniciační závlivková dávka pro každou pěstební nádobu v množství 300 ml na jednu pokusnou nádobu. Závlivka v průběhu vegetace byla zajišťována dle průběhu počasí, a to v dávce 1–2 jednotky (300 ml) na nádobu, na počátku vegetačního cyklu na povrch půdy, později pak do podmisek pokusných nádob; v extrémně teplém počasí pak byla závlivka aplikována v dvojnásobné dávce (600 ml). Po osevu nádob byl pravidelně mechanicky udržován bezplevelný povrch půdy a rovněž byl rozrušován půdní škraloup vzniklý závlivkou nebo dešťovými srážkami. Od doby zasetí byla průběžně kontrolována vzcházivost semen v jednotlivých nádobách. Po vzejití rostlin byly tyto vyjednoceny na finální počet 20 ks na nádobu.

Ošetřování nádobových pokusů za vegetace – od vzejití rostlin po sklizeň – spočívalo v mechanické eliminaci plevelných rostlin a v počátečních fázích růstu rostlin v rozrušování půdního povrchu – půdního škrálovu – vzniklého v důsledku zálivky v kombinaci s typem půdy a počasím.

Dva týdny před vlastní sklizní byly pokusné nádoby, v reakci na aktivitu zrnuchtivého ptactva, přesunuty do krytého, větraného prostoru (skleník), zabezpečeného proti vniknutí těchto živočišných škůdců. V plné zralosti (17. 8. 2021) byly rostliny z jednotlivých pokusných nádob sklizeny. Rostliny byly odstřiženy u povrchu půdy a poté zváženy. Následně byly pozvolně sušeny v sušících pecích při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin. Usušená celková nadzemní hmota byla zvážena (suchá hmota) a poté bylo ručně z jednotlivých klasů odděleno zrno. Čisté zrno z pokusných variant bylo zváženo a zjištěné hodnoty zaznamenány.

V následném termínu byly ze všech nádob odebrány půdní vzorky (ze třech odběrů půdy z každé nádoby byl vytvořen směsný vzorek pro danou variantu), tyto byly zpracovány (sušení, drcení, prosévání, vážení) a předány do laboratoří k provedení chemické analýzy.

Během celého průběhu realizace vegetačního nádobového pokusu byla průběžně pořizována příslušná fotodokumentace.

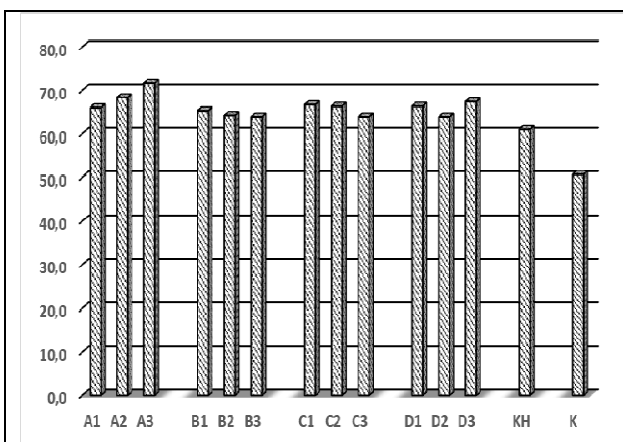
2.2. Hodnocení výsledků vegetačních pokusů vybraných plodin

2.2.1. Výsledky první etapy vegetačních pokusů s hořčicí a ovsem

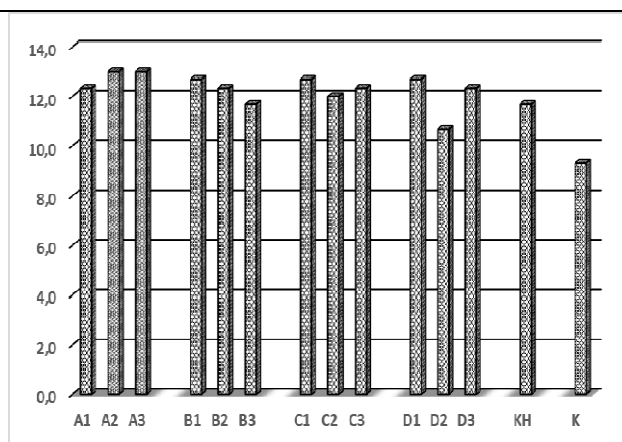
Hořčice setá

Získané výsledky výnosů hořčice seté dle jednotlivých variant hnojení dle schématu pokusu z roku 2019 jsou znázorněny na grafech č. 1 a 2. Nejvyšší výnos čerstvé hmoty hořčice seté (71,7 g/nádoba) byl zaznamenán u varianty A3, což je biouhel z kalu ČOV v nejvyšší ze tří použitých dávek. Naopak nejnižší výnos (50,7 g) vykazala varianta kontrolní – bez přídatku biouhlu nebo hnojiva. Rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším výnosem čerstvé hmoty hořčice činí 21,0 g, což znamená 41 % nárůst výnosu proti kontrole brané jako 100 %. Nejvyšší výnos suché hmoty (13,0 g) byl shodně zaznamenán u biouhlu z kalu u variant A2 a A3, nejnižší pak u varianty kontrolní (9,33 g). Rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším výnosem sušiny hořčice činí 3,67 g, což znamená 39 % nárůst výnosů proti kontrole brané jako 100 %. Z hlediska obsahu sušiny byla nejvyšší hodnota (19,4 %)

zjištěna u varianty mour Most na nejnižší hladině použité dávky B1, nejnižší (16,7 %) pak u přípravku biouhel z digestátu u střední dávky D2. Rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším obsahem sušiny činí u hořčice pouhých 2,72 %.



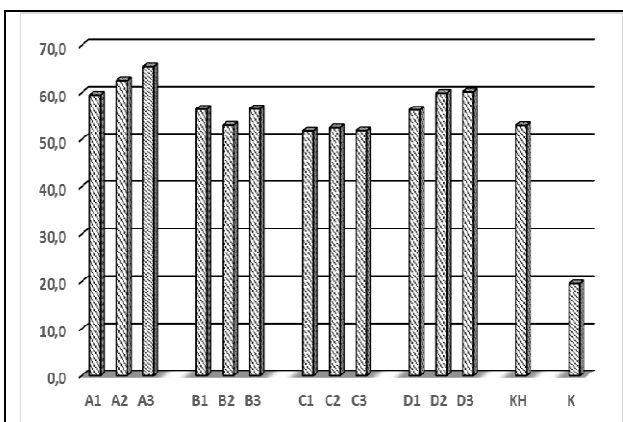
Graf 1: Výnos **čerstvé** hmoty hořčice, g/nádoba



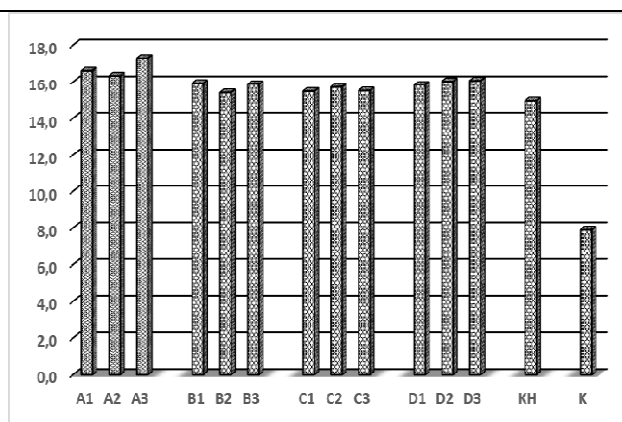
Graf 2: Výnos **suché** hmoty hořčice, g/nádoba

Oves setý

Získané výsledky výnosů ovsa setého dle jednotlivých variant hnojení dle schématu pokusu z roku 2019 jsou znázorněny na grafech č. 3 a 4. Nejvyšší výnos čerstvé hmoty ovsa setého (65,4 g/nádoba) byl zaznamenán u varianty A3, což je biouhel z kalu ČOV v nejvyšší ze tří použitých dávek. Naopak nejnižší výnos (19,6 g) vykázala varianta kontrolní – bez přídavku biouhlu nebo hnojiva. Rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším výnosem činí 45,8 g, což znamená 234% nárůst výnosu čerstvé hmoty proti kontrole bez hnojení brané jako 100 %. Druhým v pořadí byl 219% nárůst výnosu čerstvé hmoty proti kontrole bez hnojení brané jako 100 % u varianty A2, což je biouhel z kalu ČOV v druhé nejvyšší ze tří použitých dávek.



Graf 3: Výnos **čerstvé** hmoty ovsa, g/nádoba



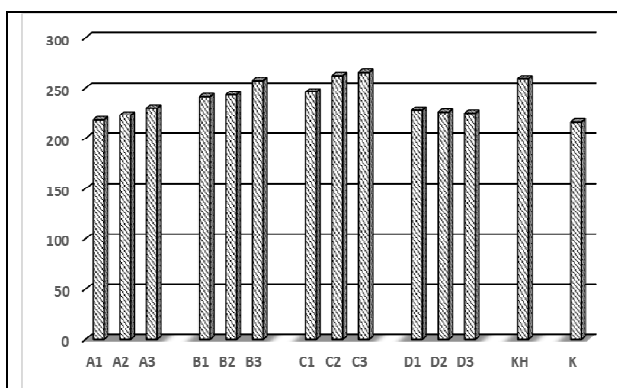
Graf 4: Výnos **suché** hmoty ovsa, g/nádoba

Nejvyšší výnos suché hmoty ovsa (17,3 g) byl zaznamenán u biouhlu z kalu u varianty A3, nejnižší pak u varianty kontrolní (7,90 g). Rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším výnosem sušiny ovsa činí 9,37 g, což znamená 119 % nárůst výnosu proti kontrole bez hnojení brané jako 100 %. Z hlediska obsahu sušiny byla nejvyšší hodnota (40,3 %) zjištěna u varianty kontrolní, nejnižší (26,1 %) pak u přípravku biouhel z kalu ČOV u střední dávky A2. Rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším obsahem sušiny u této plodiny je mnohem vyšší ve srovnání s hořčicí a činí 14,2 %.

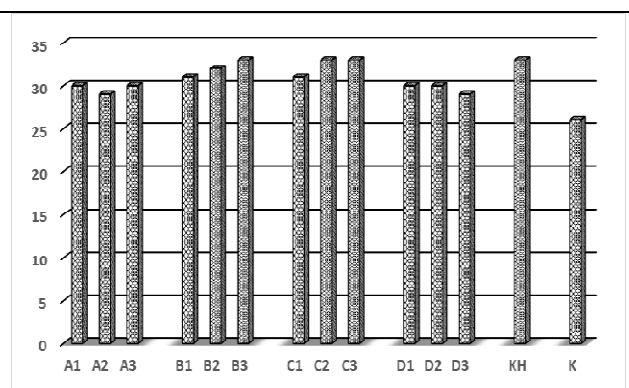
2.2.2. Výsledky druhé hlavní etapy vegetačních pokusů s kukuřicí a pšenicí

Kukuřice setá

Získané výsledky výnosů kukuřice seté dle jednotlivých variant hnojení dle schématu pokusu z let 2020-2021 jsou znázorněny na grafech č. 5 a 6. Nejvyšší výnos čerstvé hmoty kukuřice seté (265 g/nádoba) byl zaznamenán u varianty C3, což je hydrochar z papírenského kalu v nejvyšší ze tří použitých dávek. Naopak nejnižší výnos (216 g) vykázala varianta kontrolní K – bez přídatku biouhlu nebo hnojiva. Rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším výnosem činí 49 g čerstvé hmoty kukuřice, což znamená 23 % nárůst výnosu proti kontrole brané jako 100 %. Nejvyšší výnos suché nadzemní hmoty kukuřice (33 g) byl shodně zaznamenán hned u čtyř variant – hydrocharu z papírenského kalu v nejvyšší a střední dávce (C3 a C2), hydrocharu z kalu ČOV v nejvyšší dávce (B3) a u minerálně hnojené kontrolní varianty (KH), nejnižší pak u varianty kontrolní bez hnojení (26 g).



Graf 5: Výnos **čerstvé** hmoty kukuřice, g/nádoba



Graf 6: Výnos **suché** hmoty kukuřice, g/nádoba

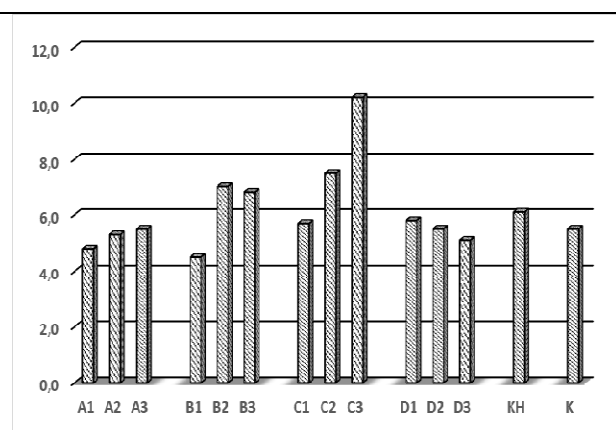
Rozdíl mezi nejnižším a nejvyššími výnosy kukuřice činí 7 g, což znamená 27 % nárůst výnosů proti kontrole bez hnojení brané jako 100 %. Z hlediska obsahu sušiny kukuřice byla nejvyšší hodnota (13,6 %) zjištěna u

varianty pyrochar z kalu ČOV na nejnižší hladině použité dávky A1, nejnižší (12,1 %) pak u kontrolní nehnojené varianty K. Rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším obsahem sušiny u kukuřice činí pouhých 1,5 %.

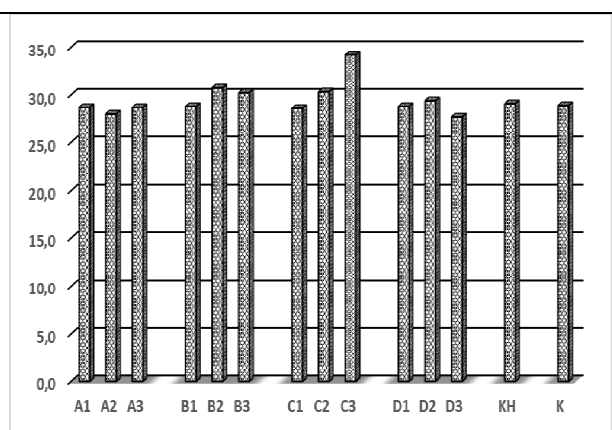
Pšenice setá

Získané výsledky výnosů pšenice seté dle jednotlivých variant hnojení dle schématu pokusu z let 2020-2021 jsou znázorněny na grafech č. 7 a 8. Nejvyšší výnos zrna – 10,2 g – byl zjištěn u varianty C3 (hydrochar z papírenského kalu v nejvyšší ze tří použitých dávek), nejnižší výnos – 4,5 g – vykazala varianta B1 (hydrochar z kalu ČOV v nejnižší z použitých dávek). Rozdíl mezi nejvyšším výnosem zrna a kontrolou bez hnojení činí 4,7 g, což znamená 85% nárůst výnosů proti kontrole bez hnojení brané jako 100 %.

Nejvyšší výnos slámy – 32,3 g – byl zjištěn také u varianty C3 (hydrochar z papírenského kalu v nejvyšší ze tří použitých dávek), nejnižší výnos – 26,4 g – pak shodně vykazaly dvě varianty – varianta A2 (pyrochar z kalu ČOV ve střední dávce) a varianta D3 (hydrochar z digestátu v nejvyšší z použitých dávek). Rozdíl mezi nejvyšším výnosem slámy pšenice a kontrolou bez hnojení činí 5,3 g, což znamená 18 % nárůst výnosu proti kontrole přijaté za 100 %. Nejvyšší průměrný výnos celkové nadzemní hmoty pšenice seté (tj. zrna + sláma) 44,4 g/nádoba byl zaznamenán u varianty C3, což je hydrochar z papírenského kalu v nejvyšší ze tří použitých dávek. Rozdíl mezi nejvyšším výnosem celkové nadzemní hmoty pšenice a kontrolou bez hnojení činí 10,0 g, což znamená 29 % nárůst výnosu proti kontrole přijaté za 100 %.



Graf 7: Výnos **zrna** pšenice, g/nádoba



Graf 8: Výnos **slámy** pšenice, g/nádoba

Z hlediska obsahu sušiny byla nejvyšší hodnota (96,6 %) zjištěna u varianty KH – kontrolní varianta (bez biocharu, s přidavkem hnojiva NPK), nejnižší (95,1 %) pak u varianty B1 (hydrochar z kalu ČOV v nejnižší z

použitých dávek). Rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším obsahem sušiny této plodiny je nízký a činí pouhých 1,5 %.

2.2.3. Celkové hodnocení výsledků vegetačních zkoušek a diskuze

Na základě výše uvedeného hodnocení výsledků vegetačních testů různých zemědělských plodin lze konstatovat, že zcela jednoznačně byl prokázán vliv přídatku různých typů biouhlů, především typu hydrochar na zvýšení výnosů čerstvé i suché hmoty testovaných plodin oproti kontrolní variantě (bez přídatku biouhlu, bez hnojení) i oproti minerálně hnojené kontrolní variantě (bez přídatku biouhlu). Poslední fakt znamená, že biouhelné přípravky zvyšují využitelnost a účinek minerálních hnojiv. Pokud např. vezmeme výnos z kontrolní varianty jako hodnotu 100 %, pak výnosově nejlepší varianta dosáhla hodnoty přes 334 % u čerstvé biomasy ovsa resp. 141 % u čerstvé biomasy hořčice a takřka 219 % u suché biomasy ovsa resp. 139 % u suché biomasy hořčice, přičemž výnosy u kontroly bez hnojení vždy byly brané jako 100 %.

Z výnosového hlediska – jak čerstvé, tak suché biomasy – se jednoznačně nejlépe projevil biouhel z kalů ČOV v nejvyšší použité dávce A3, a to u obou testovaných plodin. U biouhlu z kalů ČOV byly také, jako u jediného typu biouhlu, patrné zvyšující se výnosy čerstvé biomasy hořčice i ovsa se zvyšující se dávkou biouhlu. Tento tendenční předpoklad byl také zaznamenán u biouhlu z digestátu, ale pouze u jedné plodiny – ovsa. Výnosové rozdíly mezi ostatními testovanými typy uhelných přípravků nejsou tak markantní.

Za zmínku stojí vysoký obsah sušiny u kontrolní varianty u biomasy ovsa, která je více jak 1,4× vyšší oproti průměrné sušině ostatních variant pokusu, což je zřejmě způsobeno omezeným růstem a rychlejším vývojem směrem ke konci vegetace u rostlin kontrolní varianty bez hnojení. U hořčice nebylo toto zjištění zaznamenáno.

Z rozborů rostlin jsou patrné určité souvislosti mezi použitím biouhlu a obsahem některých prvků. U hořčice seté u kontrolní nehnojené varianty se vyskytují, vcelku předpokládaně, nejnižší hodnoty základních živin N a P ze všech variant, naopak nejvyšší u Ca a Mg. U dalších prvků a těžkých kovů pak byly u této kontrolní varianty zaznamenány hodnoty ze všech nejvyšší, a to pro B, S, Cd, Cu a Zn. Závislosti obsahu sledovaných prvků na stupňovaných dávkách v rámci daného typu biouhlu nebyly významné.

U druhé testované plodiny – ovsa setého – se, podobně jako u hořčice, vyskytl u kontrolní varianty nejnižší obsah N a také K ze všech variant, naopak nejvyšší byl zaznamenán opět u Ca. U ostatních prvků a těžkých kovů byl společný nejvyšší obsah B, S a Cd, navíc kontrolní varianta vykazala nejvyšší obsah Pb. Na druhou stranu byl u kontrolní varianty zaznamenán celkově nejnižší obsah Cu ze všech variant, což je v kontrastu s obsahem tohoto prvku v hořčici (kde byl naopak u kontrolní varianty zaznamenán nejvyšší obsah tohoto prvku). U výnosově nejlepší varianty – biouhel z kalů ČOV var. A3 (nejvyšší dávka) – byl zaznamenán v rostlinách nejvyšší obsah základních živin N, P a Mg, ale taky některých stopových prvků (Cr, Cu a Zn) ze všech testovaných variant pokusu.

Na základě realizace vegetačních experimentu prostřednictvím nádobových pokusů v roce 2020 lze konstatovat, že se ve zvoleném variantním systému podařilo prokázat vliv přídatku všech typů biouhlů vč. všech jejich stupňovaných dávek na výnos testované plodiny – kukuřice seté – a to jak u čerstvé biomasy, tak i u biomasy suché. Oproti ostatním variantám se na výnosu čerstvé hmoty kukuřice významněji statisticky průkazně projevily vliv přídatku hydrocharu z papírenského kalu při střední a nejvyšší aplikované dávce, který se zatím jeví jako nejperspektivnější.

Z hypotézy, ze které vychází idea experimentu, vyplývá nejen předpokládaný pozitivní efekt použitých typů biouhlu na růst a výnos testovaných plodin, ale i úměrný vliv stupňovaných dávek testovaných typů biouhlů na tyto sledované parametry. Z tohoto pohledu byla přímá úměra mezi dávkami daného typu biouhlu a výší výnosu čerstvé biomasy průkazně prokázána u variant A, B a C. U varianty D (hydrochar z digestátu) byla zaznamenána naopak nepřímá úměra, byť na hranici průkaznosti, tzn., že se zvyšující se dávkou biouhlu klesaly výnosy čerstvé biomasy testované plodiny, tj. v tomto případě se projevily inhibiční efekt, který pravděpodobně závisí na typu suroviny.

Do pokusného schématu byla zařazena i kontrolní varianta KH s přídatkem průmyslového hnojiva a tato nejenže, zcela dle předpokladu, výrazně výnosově předčila kontrolní variantu K0, ale ve výnosu čerstvé biomasy předčila i biouhlové varianty A, B, D, a to na všech třech úrovních dávkování. Pouze varianta C – hydrochar z papírenského kalu – měla při střední a nejvyšší dávce (C2 a C3) lepší výnosové parametry.

To poukazuje jednak na významný vliv dodaného průmyslového hnojiva jako dominantního výnosového faktoru v rámci tohoto vegetačního pokusu, na druhou stranu ale i na fakt, že výše uvedené dávky hydrocharu z papírenského kalu na úrovních hnojení 2 a 3 dokáží výživově nahradit množství použitého průmyslového hnojiva v dávce 90 kgN/ha při zachování nebo i zvýšení výnosu čerstvé biomasy kontrolní plodiny.

Na závěr lze říci, že realizované vegetační pokusy jednoznačně prokázaly pozitivní vliv přidaných biouhlů typu hydrochar na výnos testovaných plodin.

2.3. Podmínky aplikace přípravků na běžné a antropogenní půdy

Dle svých vlastností a složení lze přípravky na bázi hydrotermálně upravených zbytků po anaerobní fermentaci, zejména anaerobně stabilizované kaly z čistíren odpadních vod (ČOV) nebo digestáty z bioplynových stanic (BPS) zařadit mezi stabilizované bioodpady nebo mezi substráty, použitelné pro zúrodnění běžných zemědělských a antropogenních půd.

V případě aplikace na zemědělskou nebo lesní půdu se jedná o uplatnění stabilizovaných bioodpadů v zemědělství jako pomocné půdní látky, substrátu nebo organického hnojiva ve smyslu zákona č. 156/1998 Sb. o hnojivech, v platném znění pozdějších předpisů, které se posuzuje dle vyhlášky MZe ČR č. 474/2000 Sb. o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů. Zásadní novela této vyhlášky č. 271/2009 Sb. rozdělila do té doby jednotné posuzování všech organických hnojiv a pěstebních substrátů z hlediska obsahu cizorodých látek do 3 skupin – pěstební substráty, organická a statková hnojiva tuhá se sušinou nad 13 % a hnojiva tekutá se sušinou pod 13 % (viz tab. č. 6). Rovněž tak jsou rozdílná i pravidla aplikace těchto typů hnojiv na půdu: maximální aplikační dávka je u tuhých hnojiv stanovena na 20 tun sušiny na 1 ha v průběhu 3 let, kdežto u tekutých na 10 tun sušiny na 1 ha za 3 roky. U substrátů bez významného obsahu živin toto omezení není definováno.

Do kategorie kapalných organických hnojiv spadají, mimo tradičních statkových hnojiv jako je kejda, též digestáty z bioplynových stanic, tj. odpadní produkty zpracování bioodpadů nebo biomasy na bioplyn. Hydrotermálně upravené digestáty BPS a jiné fermentační odpady se musí hodnotit podle jejich stavu, zda jsou tuhá nebo tekutá. V případě obsahu

dusíku nižšího než 0,6 % mohou být tuhé hydrotermálně upravené odpady anaerobní fermentace zařazeny mezi substráty bez účinného obsahu živin (tab. 6, sloupec 3). Tzn. že v závislosti na obsahu vody a dusíku lze hydrotermálně upravené odpady anaerobních fermentátů hodnotit z hlediska obsahu rizikových prvků podle všech čtyřech kategorií uvedených v tab. č. 6.

Tab. 6. Limitní koncentrace vybraných rizikových prvků (mg/kg sušiny) v hnojivech a substrátech určených pro zemědělskou půdu dle vyhl. č. 474/2001 Sb. k Zákonu č. 156/1998 Sb. v platném znění

Prvek	Popele ze samostatného spalování biomasy, produkty získané procesem pyrolýzy	Substrát	Organická a statková hnojiva se sušinou	
			nad 13 % (tuhá)	pod 13 % (tekutá)
As	30	30	30	30
Cd	5	1*/2	2	2
Cr_{celk.}	100	100	100	100
Cu	--	100	150	250
Hg	0,5	1	1	1
Ni	--	50	50	50
Pb	100	100	100	100
Zn	--	300	600	1200

Vysvětlivky k limitům:

* - 1 mg/kg **Cd** pouze pro substráty určené pro pěstování zeleniny a ovoce, v ostatních případech 2 ppm;

Samotné zpracování všech typů bioodpadů, včetně naším výzkumem dotčených odpadů z procesů anaerobní fermentace a jejich následná aplikace na nezemědělské půdy, se řídí, analyzuje a vyhodnocuje dle nové vyhlášky č. 273/2021 Sb. o podrobnostech nakládání s odpady. Hlavním motem této nové vyhlášky je na rozdíl od předchozích obdobných právních předpisů odklonění biologických odpadů a produktů jejich zpracování od skládkování. Výstupy ze zařízení pro biologické zpracování biologicky rozložitelných odpadů se posuzuje dle přílohy č. 29 této vyhlášky a podle svých vlastností a způsobu využití zařazují do celkem 5 skupin.

Do 1. skupiny jsou zařazeny výstupy zpracování bioodpadů využívané na zemědělské a lesní půdě a posuzované dle Zákonu č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a agrochemickém zkoušení půd, ve znění pozdějších předpisů.

Do 2. skupiny jsou zařazeny výstupy, které splňují požadavky podle vyhlášky č. 273/2021 Sb. a využívají se mimo zemědělskou a lesní půdu. Na základě skutečných vlastností, složení a způsobu využití se 2. skupina dělí na tři třídy (viz tab. 7):

1) **třída I** - určena pro využití na povrchu terénu užívaného nebo určeného pro zeleň u sportovních a rekreačních zařízení včetně těchto zařízení v obytných zónách s výjimkou venkovních hracích ploch (tzv. **rekultivační kompost**);

2) **třída II** - určena pro využití na povrchu terénu užívaného nebo určeného pro městskou zeleň, zeleň parků a lesoparků, pro využití při vytváření re kultivačních vrstev nebo pro přimíchávání do zemin při tvorbě rekultivačních vrstev, v intravilánu průmyslových zón, při úpravách terénu v průmyslových zónách (**rekultivační kompost a rekultivační digestát**). Použité množství v místě použití nesmí přesahovat v průměru **200 t sušiny** na 1 ha v období deseti let. Rekultivační digestát musí být aplikován v dělených dávkách tak, aby nedošlo k zamokření pozemku na dobu delší než 12 hodin či k jeho zaplavení. Pro uvedená místa a účely je možné užívat i třídu I;

3) **třída III** - určena pro využití k vytváření rekultivačních vrstev zabezpečených skládek odpadů podle ČSN 83 8035 Skládání odpadů - Uzavírání a rekultivace skládek, rekultivačními vrstvami odkališť nebo pro filtrační náplně biofiltrů (**rekultivační kompost**). Pro uvedené účely je možné užívat i třídu I a třídu II;

Příloha č. 30 k vyhlášce č. 273/2021 Sb. stanovuje pro výstupní produkty ze zařízení pro biologické zpracování bioodpadů 3 třídy limitních směrnic v rámci výstupů dle 2. skupiny pro hodnocení obsahu rizikových látek (viz tab. č. 7) a 2 druhy směrnic pro hodnocení znaků jakosti výstupních produktů (viz tab. č. 8). Hodnoty znaků jakosti jsou rozdílně stanoveny pro obvyklé tuhé produkty zpracování bioodpadů aerobní fermentací pojmenované ve vyhlášce jako „rekultivační komposty“ a obvyklé tekuté produkty anaerobní fermentace pojmenované vyhláškou jako „rekultivační digestáty“. Slovo „rekultivační“ podtrhuje určení těchto produktů zpracování bioodpadů pro využití na nezemědělské půdě.

Jednotlivé třídy skupiny 2 se liší svou přísností posuzování obsahu rizikových látek. Hodnoty limitních obsahů škodlivin jsou u třídy 1 velmi podobné hodnotám pro běžná organická hnojiva a jsou použitelná v celém

spektru možností aplikace produktů této skupiny, kdežto u 2. a zejména 3. třídy jsou limitní hodnoty méně přísné, ale o to přísnější jsou omezení co do možností jejich aplikace. Třída 3 je určena pro využití na povrchu terénu vytvářeného rekultivačními vrstvami pouze u zabezpečených skládek a odkališť nebo jako náplň do biofiltrů. Třída 2 mimo možností třídy 3 umožňuje uplatnění do rekultivačních vrstev jakýchkoliv průmyslových rekultivací, a navíc do ozelenění městských travních a dřevinných porostů (parky, lesoparky, trávníky apod.). Produkty třídy 1 lze navíc použít i pro hnojení zeleně u sportovních a rekreačních zařízení, včetně těchto zařízení v obytných zónách, s výjimkou venkovních hracích ploch.

Tab. 7. Limitní koncentrace vybraných rizikových látek a prvků pro výstupy ze zpracování bioodpadů dle přílohy č. 30 k vyhlášce č. 273/2021 Sb.

Ukazatel	Jednotka	Výstupy (skupina 2)			Stabilizovaný biologicky rozložitelný odpad (skupina 4)
		Třída 1	Třída 2	Třída 3	
As	mg/kg suš.	10	20	30	-
Cd	mg/kg suš.	1,7	3	4	-
Cr_{celk.}	mg/kg suš.	100	250	300	-
Cu	mg/kg suš.	170	400	400	-
Hg	mg/kg suš.	0,8	1,5	2	-
Ni	mg/kg suš.	65	100	120	-
Pb	mg/kg suš.	100	300	400	-
Zn	mg/kg suš.	500	1200	1500	-
PCB	mg/kg suš.	0,02	0,2	-	-
PAU	mg/kg suš.	3	6	-	-
Nečistoty > 2 mm	% hm.	< 0,5%	< 0,5%		-
Nerazložitelné a nežádoucí příměsi	% hm.	< 5%	< 5%	-	-
AT₄	mg O ₂ /g suš.	-	-	-	< 10

Použité zkratky:

PCB - polychlorované bifenyly (suma kongenerů č. 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180);

PAU - polycyklické aromatické uhlovodíky (suma antracenu, benzo(a)antracenu, benzo(a)pyrenu, benzo(b)fluoranthenu, benzo(ghi)perylenu, benzo(k)fluoranthenu, fluoranthenu, fenanthrenu, chrysenu, indeno(1,2,3-cd)pyrenu, naftalenu a pyrenu);

AT₄ - test respirační aktivity, testovací metoda pro hodnocení stability bioodpadu na základě měření spotřeby O₂ za 4 dny podle rakouské normy ÖNORM S 2027 - 1 ze dne 1.9. 2004. Pokud je AT₄ testovaného materiálu nižší než 10 mg O₂/g sušiny není již tento materiál považován za biologicky rozložitelný.

Další 3 skupiny výstupů ze zpracování bioodpadů neobsahují limity obsahu škodlivých látek a nejsou určeny pro přímou aplikaci, pouze pro další zpracování. Do 3. skupiny patří upravený biologicky rozložitelný odpad určený k dalšímu zpracování v zařízení určeném k nakládání s biologicky rozložitelnými odpady. Do 4. skupiny patří biologicky stabilizovaný odpad rovněž určený k dalšímu zpracování, přičemž do této skupiny mohou být zařazeny pouze výstupy, které nesplňují podmínky pro zařazení do 1., 2. nebo 3. skupiny. Jediným parametrem pro posouzení výstupů 4. skupiny patří výsledky testu respirační aktivity AT4, přičemž limitní hodnotou je 10 mg O₂/g sušiny. Do poslední 5. skupiny patří odpad, který nebyl biologicky rozložitelným odpadem (tj. inertní odpad).

Tab. 8. Hodnoty znaků jakosti pro výstupy ze zařízení pro biologické zpracování bioodpadů, použitelných mimo zemědělskou a lesní půdu

Znaky jakosti	Jednotky	Rekultivační kompost ¹⁾	Rekultivační digestát ²⁾
Vlhkost	% hm.	30 až 65	max. 98,0
Spalitelné látky	% suš.	min. 20	-
Celkový dusík	% suš.	min. 0,6	min. 0,3
Poměr C:N	-	max. 30	-
pH	-	6,0 – 9,0	6,0 – 9,0
Nerazložitelné příměsi > 20 mm	% hm. v sušině	< 3,0	-
Nežádoucí příměsi > 5 mm	% hm. v sušině	< 0,5	-
Klíčivá semena v 1l kompostu	ks	≤ 3	-

Poznámky: 1) Rekultivačním kompostem se rozumí stabilizovaný výstup z aerobního zpracování biologicky rozložitelných odpadů, určený pro udržení nebo zlepšení vlastností půdy, použitelný mimo zemědělskou a lesní půdu. 2) Rekultivační digestát je stabilizovaný výstup z anaerobního zpracování biologicky rozložitelných odpadů, použitelný mimo zemědělskou a lesní půdu, nesmí vykazovat pachy svědčící o nedostatečné stabilitě výstupu nebo o přítomnosti nežádoucích látek.

V případě využití hydrotermálně upravených odpadů anaerobní fermentace v zemědělství se jejich kvalita hodnotí přednostně dle prováděcí vyhlášky č. 474/2000 Sb. k zákonu o hnojivech č. 156/1998 Sb. ve znění pozdějších předpisů (viz výše tab. 6). Posuzování hnojivých substrátů podle tohoto zákona má větší prioritu nežli posuzování podle vyhlášky o BRO, což v praxi znamená, že pokud hnojivý substrát vyhovuje legislativě hnojiv, může být použit nejenom pro zemědělské, ale pro všechny ostatní účely jako např. využití na povrchu terénu pro hnojení a rekultivační účely apod., nikoliv naopak. Toto pravidlo je zakomponováno do vyhlášky č. 273/2021 Sb. v platném znění, kde hnojivé substráty posuzované dle legislativy hnojiv jsou

vyčleněny do tzv. skupiny 1. Zvláštní podmínkou uplatnění hnojiv a substrátů dle zemědělských norem je v případě jejich distribuce nutnost úřední registrace u Ústředního kontrolního a zkušebního ústavu zemědělského (UKZÚZ), viz www.ukzuz.cz.

2.4. Souhrnná doporučení pro uživatele z praxe

Hydrotermochemickou úpravu zbytků po anaerobní fermentaci lze doporučit jako vhodný způsob odstranění nebo alespoň omezení jejich nepříznivých fyzikálně-chemických vlastností z hlediska aplikace na půdu. Jelikož realizace procesu hydrotermální úpravy vyžaduje přísun energie, postup je vhodný především pro zařízení produkující zbytkové teplo. Jedná se především o bioplynové stanice a o čistírny odpadních vod.

Omezujícím faktorem výběru kalů ČOV pro hydrotermální úpravu je vysoká pravděpodobnost výskytu nadlimitního obsahu rizikových prvků. U digestátů BPS, zejména zemědělských, je toto riziko docela nízké.

V případě výskytu nadlimitních obsahů rizikových prvků v hydrotermálně upravených odpadech z anaerobní fermentace musíme snížit přísun nadlimitních prvků v surovinách. Pokud to není možné (např. v případě kalů ČOV), hydrotermální úpravu musíme kombinovat s chemickým ošetřením za účelem snížení až odstranění škodlivých látek.

Hydrotermální úpravou zbytků po anaerobní fermentaci, zejména digestátů z bioplynových stanic (BPS) rovněž jako obsahem rizikových prvků vyhovujících anaerobně stabilizovaných kalů z čistíren odpadních vod (ČOV), dochází ke ztrátě koloidní struktury odpadů, snížení objemu sraženin, zvýšení chemické stability organické hmoty, snížení fytotoxicity, hygienických rizik, a dokonce k mírnému navýšení agronomické účinnosti upravených substrátů.

V případě orientace na aplikaci hydrotermálně upravených fermentačních zbytků v blízkém okolí výrobního zařízení lze využít tekuté výrobky ve formě suspenze se sušinou nižší než 13 %. Výhodou v tomto případě je možnost zavlažování a současného odstranění přebytků procesní vody. Nevýhodou jsou vyšší náklady na transport a aplikaci přípravků. Proto v případě větších vzdáleností (obvykle více než 15 km) lze doporučit výrobu a aplikaci odvodněné formy hydrotermálně upravených anaerobních fermentátů, čemuž napomůže i zvýšení separovatelnosti odpadů po jejich

hydrotermální úpravě. Za nejvhodnější považujeme kombinaci obou možností v závislosti na dopravní vzdálenosti: čím větší bude plánovaná transportní vzdálenost, tím větší by měl být obsah sušiny ve vyráběném přípravku.

Aplikační dávky přípravků stanovíme výpočtem na základě obsahu dusíku a potřeb plodin a současně podle legislativních podmínek aplikace jednotlivých kategorií substrátů dle legislativy hnojiv v případě zemědělských půd nebo dle legislativy biologických odpadů v případě ostatních půd. Zařazení přípravků do jednotlivých kategorií provedeme na základě obsahu sušiny, živin (především dusíku) a rizikových prvků (podrobnosti o jednotlivých kategoriích viz kap. 2.3).

V případě využití hydrotermálně upravených fermentačních zbytků pro melioraci málo úrodných půd nebo rekultivaci poškozených a antropogenních půd doporučujeme vysoké jednorázové (iniciační) dávky, a to v rozmezí 50 až 200 tun sušiny přípravků v přepočtu na 1 ha. V případě velmi nízkého obsahu organických látek v půdě doporučujeme velmi vysoké iniciační dávky 200 až 800 tun sušiny na 1 ha. Pouze při takto vysokých dávkách organických hnojiv nebo rekultivačních substrátů lze očekávat významné zlepšení půdních fyzikálně-chemických vlastností a tím i úrodnosti půd a jejich odolnosti proti erozi. Toto bylo například dokázáno na příkladě kompostů – viz metodika kolektivu autorů z ČZU a VÚZT „Technologie a ekonomika zvyšování protierozní odolnosti půdy zapravením organické hmoty“, (Kováříček a spol., 2012).

Obdobné výsledky o významu vlivu vysokých dávek organických hnojiv na zúrodnění půd byly dosaženy kolektivem řešitelů z VÚRV, v.v.i. a Botanického ústavu akademii věd ČR, souhrnně vyhodnocených v metodice pro praxi pod názvem „Pěstování vybraných druhů nepotravinářských plodin v kombinaci s aplikacemi organických hnojiv a mikrobiologických preparátů jako prostředek biologické rekultivace antropogenních půd“ (Ust'ak a spol., 2010).

2.5. Obrazová příloha



Obr. 1: Uspořádání nádobových pokusů



Obr. 2: Pokusné nádoby po aplikaci biouhlu



Obr. 3: Oves setý ve fázi počátečního růstu



Obr. 4: Pšenice ve fázi počátečního růstu



Obr. 5: Hořčice bílá ve fázi plného růstu



Obr. 6: Hořčice bílá ve fázi počátku kvetení



Obr. 7: Vzešlé rostliny kukuřice před
jednocením – celkový pohled



Obr. 8: Vzešlé rostliny kukuřice před
jednocením – detail



Obr. 9: Rostliny kukuřice ve fázi nárůstu
biomasy před sklizní



Obr. 10: Pšenice jarní ve fázi aktivního růstu po
jednocení



Obr. 11: Porost pšenice po fázi metání



Obr. 12: Porost pšenice v plné zralosti v době
sklizně

III. Ekonomické aspekty a další přínosy pro uživatele

Možné ekonomické přínosy byly modelově vypočítány na základě získaných pokusných výsledků a literárních údajů s využitím expertních systémů Výzkumného ústavu zemědělské techniky, v.v.i. (VÚZT) pro modelování výrobních technologií (www.vuzt.cz, záložka expertní systémy). Předpokládané ekonomické přínosy jsou v závislosti na dávce přípravku v rozmezí 20-200 t/ha (v přepočtu na sušinu) odhadovány na 3.000,- Kč až 30.000,- Kč v průběhu 3-5 let působení jednorázové aplikace v důsledku zvýšení výnosů a tržeb o 0,5-5 % v souvislosti se zlepšením struktury půdy, zintenzivněním biologické aktivity a zvýšením retenční schopnosti půdy pro vodu a živiny. Dalším přínosem je snížení rizika vodní eroze půdy a půdní degradace. Aplikací přípravků na bázi hydrotermálně upravených zbytků po anaerobní fermentaci dochází k uchování produkčních i mimoprodukčních funkcí zemědělské půdy. Důležitým ekologickým přínosem je dlouhodobá sekvestrace sloučenin uhlíku do půdy.

IV. Potenciál využití přípravků a možnosti uplatnění metodiky

Hlavní potenciál využití přípravků ke zlepšení půdních vlastností na bázi hydrotermálně upravených zbytků po anaerobní fermentaci v praxi, zejména anaerobně stabilizovaných kalů z čistíren odpadních vod (ČOV) nebo digestátů z bioplynových stanic (BPS) je spojený především s možností jejich využití pro biologickou revitalizaci antropogenně poškozených území a zúrodnění nízko produktivních půd a zemin.

Na základě vlastních zkušeností a literárních údajů můžeme konstatovat, že využití podobných přípravků v zemědělství je schopno zajistit zvýšení půdní úrodnosti a agrochemické kvality půdy, a to zlepšením agrofyzikálních vlastností a zvýšením účinnosti dodaných průmyslových hnojiv. S výhodou lze tento přípravek využít při provedení biologické rekultivace antropogenně postižených a málo úrodných půd. Využití tohoto přípravku rovněž zajišťuje dlouhodobou sekvestraci (neboli uskladnění) uhlíku v půdě. Při výrobě přípravku jsou účelně využívány problémové odpady, jakými jsou zbytky po anaerobní fermentaci, zejména anaerobně stabilizované kaly ČOV a digestáty BPS.

V. Srovnání novosti postupů

Dle poznatků autorů nebyla dosud zpracována žádná metodika o přípravcích ke zlepšení půdních vlastností na bázi kombinované hydrotermochemické úpravy kontaminovaných bioodpadů, zejména kalů ČOV. V předložené metodice jsou zahrnuty kromě vlastních poznatků nově získaných v průběhu řešení výzkumných projektů uvedených v dedikaci i údaje dostupné ze světové literatury. Metodika popisuje všestranné aspekty využití přípravků ke zlepšení půdních vlastností na bázi hydrotermálně upravených zbytků po anaerobní fermentaci v praxi, včetně jejich ekonomického hodnocení. Rovněž je zdůrazněn význam těchto přípravků pro zúrodnění půd a pro uchování produkčních i mimoprodukčních funkcí zemědělské půdy.

VI. Popis uplatnění metodiky

Metodika je určena širokému okruhu uživatelů z oblasti rostlinné výroby a zpracování rostlinné produkce, především prvovýrobcům – pěstitelům běžných zemědělských a energetických plodin, ale také potenciálním zpracovatelům a uživatelům bioodpadů, hlavně majitelům a provozovatelům čistíren odpadních vod a bioplynových stanic. Metodika je rovněž určena odborníkům v oblasti meliorací a rekultivací a poskytuje zájemcům o dotčenou problematiku základní informace o přípravcích ke zlepšení půdních vlastností na bázi kombinované hydrotermochemické úpravy kontaminovaných bioodpadů, zejména kalů ČOV. Dále metodika poslouží jako zdroj znalostních informací pro zemědělské poradce a pro výuku na zemědělských školách. Smluvním uživatelem metodiky, který bude zajišťovat její transfer do zemědělské a výrobní praxe, je spolek CZ BIOM – České sdružení pro biomasu.

Dle podmínek MZe ČR bude tato metodika také dostupná všem zájemcům i v elektronické verzi na stránkách Výzkumného ústavu rostlinné výroby, v.v.i. (www.vurv.cz).

VII. Seznam použité související literatury

1. Funke, A, Ziegler, F., 2009: Hydrothermal carbonization of biomass: a literature survey focussing on its technical application and prospects. In: Proc. 17th European Biomass Conference & Exhibition; Florence, Italy, and Munich, Germany, p. 1037-1050.
2. Funke, A, Ziegler, F., 2010: Hydrothermal carbonization of biomass: a summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuel. Bioprod. Bior.* 4 (2), p. 160–177.
3. Glaser, B., 2007: Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences* 362, p. 187–196.
4. Glaser, B., Lehmann, J., Zech, W., 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review. *Biology and Fertility of Soils* 35, p. 219–230.
5. Kos, M. Termochemické zpracování čistírenských kalů. *SOVAK*, 2015, 2, s. 20–23.
6. Kos, M. Čistírenský kal obnovitelný zdroj pro výrobu paliva a hnojiva. *SOVAK*, 2016, 1, s. 16–20.
7. Kovaříček P., Abraham Z., Hula J., Plíva P., Vlášková M., Kroulík M., Mašek J., 2012: Technologie a ekonomika zvyšování protierozní odolnosti půdy zapravením organické hmoty“, *Certifikovaná metodika pro praxi*, vyd. VÚZT Praha, cit. Kovaříček a spol., 2012, 34 p.
8. Lehmann, J., 2007a: Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 5, 381–387.
9. Lehmann, J., 2007b: A handful of carbon. *Nature* 447, p. 143–144.
10. Libra, J.; Ro, K.; Kammann, C.; Funke, A.; Berge, N.; Neubauer, Y.; Titirici, M.; Fuhner, C.; Bens, O.; Emmerich, K., 2011: Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, 2 (1), p. 89–124.
11. Sevilla, M., Fuertes, A. B. (2009a): Chemical and Structural Properties of Carbonaceous Products Obtained by Hydrothermal Carbonization of Saccharides. *Chem. Eur. J.* 2009, 15: 4195–4203.
12. Sevilla M., Fuertes A.B. (2009b): The production of carbon materials by hydrothermal carbonization of cellulose. *Carbon* 2009; 47(9): 2281–2289.
13. Sevilla M., Maciá-Agulló J.A., Fuertes A.B., 2011: Hydrothermal carbonization of biomass as a route for the sequestration of CO₂: Chemical and structural properties of the carbonized products. *Biomass and Bioenergy*, Volume 35, Issue 7, p. 3152-3159.
14. Šťastný, V. Biouhel – nová perspektiva v technologii dočišťování odpadních vod, nebo slepá ulička?. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2019, roč. 61, č. 3, str. 40–43. ISSN 0322-8916
15. Titirici, M.M., Thomas, A., Antonietti, M., 2007: Back in the black: hydrothermal carbonization of plant material as an efficient chemical process to treat the CO₂ problem? *New Journal of Chemistry* 31, 787–789.
16. Titirici, M.M., White, R.J., Falcoa, C., Sevilla, M., 2012: Black perspectives for a green future: hydrothermal carbons for environment protection and energy storage. In: *Energy Environ. Sci.*, vol. 5, p. 6796–6822.

-
17. Ušťak, S., Püschel, D., Rydlová, J., Gryndler, M., Mikanová, O. & Vosátka, M. 2010. Pěstování vybraných druhů nepotravinářských plodin v kombinaci s aplikacemi organických hnojiv a mikrobiologických preparátů jako prostředek biologické rekultivace antropogenních půd, Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. Botanický ústav AV ČR, v.v.i., 36 str.
 18. Wang, Hang; Ma, Lijian; Cao, Kecheng; et al., 2012: Selective solid-phase extraction of uranium by salicylideneimine-functionalized hydrothermal carbon. *J. of Hazardous Materials*, vol. 229, p. 321-330.
 19. Warnock, D.D., Lehmann, J., Kuyper, T.W., Rillig, M.C., 2007: Mycorrhizal responses to biochar in soil—concepts and mechanisms. *Plant and Soil* 300, p. 9–20.
-

VIII. Seznam publikací, které předcházely metodice

1. Petříková, V., Váňa, J., Ušťak, S., 1996: Pěstování a využití technických a energetických plodin na rekultivovaných pozemcích. *Metodiky pro zemědělskou praxi 17/1996*, Praha, ÚZPI 1996, 24 s.
2. Czako-Markupová A., Mikanová, O., Ušťak, S., 2007: The effect of inoculation on reclaimed soil. In: *Počvovedenie i agrochimia*, 1, 2007 (38), s. 232 –237.
3. Ušťak, S., Váňa, J., Habart, J., Tlustoš, P., 2009: Vliv různých způsobů předúpravy podsítné frakce směsného komunálního odpadu a následné anaerobní fermentace na kvalitu výstupních produktů. - *Agritech Science*, 2009/3, článek č. 10, str. 1-10, ISSN 1802-8942.
4. Mikanová, O., Ušťak, S. & Czako, A. 2009. Utilization of microbial inoculation and compost for revitalization of soils. *Soil and Water Research*, 4(3): 126-130.
5. Váňa, J. & Ušťak, S. 2009: Tepelně tlaková hydrolýza lignocelulózových odpadů. *Waste forum*, 2(2): 133-139.
6. Ušťak, S., Püschel, D., Rydlová, J., Gryndler, M., Mikanová, O. & Vosátka, M. 2010. Pěstování vybraných druhů nepotravinářských plodin v kombinaci s aplikacemi organických hnojiv a mikrobiologických preparátů jako prostředek biologické rekultivace antropogenních půd, Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. Botanický ústav AV ČR, v.v.i., 36 str.
7. Ušťak, S., Muňoz, J., 2012: Vliv základních technologických parametrů hydrotermální úpravy vybraných bioodpadů na užité vlastnosti výstupních produktů. In: *Agritech Science*, roč. 6, č. 2, článek 7. ISSN 1802-8942.
8. Ušťak, S. 2013. Laboratorní zařízení pro simulaci procesů hydrotermálně-katalytického zpracování biomasy a bioodpadů. Úřad průmysl. vlastnictví ČR, Osvědčení o zápisu UV č. 25119 ze dne 3.4.2013.
9. Ušťak S.; Muňoz J.; Šinko J., 2019: Hnojivý substrát na bázi biouhlu z kombinované hydrotermochemické úpravy bioodpadů. Úřad průmysl. vlastnictví ČR, Osvědčení o zápisu UV č. 33 516 ze dne 17.12.2019.

Autoři: Ing. Sergej Ust'ak, CSc.; Ing. Jakub Muňoz, Ph.D.,
Ing. Vojtěch Váňa

Název: Možnosti využití hnojivých substrátů na bázi biouhlu
z kombinované hydrotermochemické úpravy
kontaminovaných bioodpadů

Vydal: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.
Drnovská 507, 161 06 Praha 6 - Ruzyně

Redakce, sazba a tisk: EnviBio - sdružení pro rozvoj technologií
trvale udržitelného života

Vazba: brožura

Náklad: 250 ks

Vyšlo v roce: 2021

Počet stran: 35

Vydáno bez jazykové úpravy

Fotografie: autorů

Kontaktní e-mail: ustak@eto.vurv.cz

© Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., 2021

ISBN 978-80-7427-365-0



Vydal Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.
ve spolupráci s EnviBio - sdružení pro rozvoj
technologií trvale udržitelného života

2021