

Zmena pôdnej organickej hmoty a humusu po aplikácii biouhlíkových substrátov: štúdia na poľnom experimente na černoze v juhozápadnej časti Slovenska

Soil organic matter and humus alteration under biochar substrates amendment: study in the field experiment on the Chernozem in the southwestern part of Slovakia

Dušan Šrank, Vladimír Šimanský

Biochar has shown much potential to be used as soil amendment and conditioner for improving of soil properties and plant production, however, there are a lot of knowledge gaps, and especially in explanations how biochar can affect soil organic matter (SOM) and humus substances. Therefore, the objective of the experiment was to evaluate the impact of two biochar substrates (B1 – biochar blended with sheep manure, and B2 – biochar blended with sheep manure and the residue from the biogas station) at two rates (10 and 20 t.ha⁻¹) applied alone or in combination with manure (Italpollina was applied at rate 0.85 and 1 t.ha⁻¹ in 2018 and in 2019 respectively) on the quantity and quality of SOM and humus of loamy (Molic, Loamic) Vertic Chernozem (Veľké Úľany, Slovakia). The results showed that a significant role on changes in contents of soil organic carbon (C_{org}) and labile carbon played biochar substrate type, rate and especially combination with manure. The share of humic substances in C_{org} significantly decreased by 9, 15, 16 and 17% in B1 at 10 t.ha⁻¹, B1 at 20 t.ha⁻¹, B2 at 10 t.ha⁻¹ and B2 at 20 t.ha⁻¹ treatments, respectively, compared to the control. A similar tendency was observed for biochar substrates treatments + manure, compared to manured control. Degree of humification after biochar substrates applied alone ranged from 22 to 24 % and in comparison to control due to biochar application it was decreased by 15–22 %. The carbon content of humic substances (C_{HS}) in control treatment was equal to 6.52 g.kg⁻¹ and the biochar substrates had statistically significant influence on C_{HS} content. On average, there was a smaller decrease of C_{HS} in B1 at rate 20 t.ha⁻¹ than at rate 10 t.ha⁻¹ and no effect of B2 compared to control. Combination of both biochar substrates had significant effect on increase of C_{HS} compared to fertilized control treatment. The carbon content of fulvic acid (C_{FA}) was higher by 8% in B1 at 10 t.ha⁻¹, by 30% in B1 at 20 t.ha⁻¹, and by 16% in B2 at 20 t.ha⁻¹ compared to control. As a result of biochar substrates, the increase in C_{FA} was

observed – significantly in case of biochar substrates + manure application than only biochar application alone. The results showed a decrease of C_{HA} : C_{FA} ratio with association to biochar substrates alone application as well as in biochar substrates + manure treatments. Humus stability was increased in biochar substrates alone treatments compared to control, on the other hand, compared to manure control, the application of biochar substrates + manure resulted in a lower humus stability.

carbon sequestration, humic substances, Chernozem, biochar substrates, Effeco

Mnohé štúdie v súvislosti s biouhlím sa zameriavajú na hodnotenie jeho najmä environmentálnych vplyvov (8, 9), ale i na zmeny pôdnych vlastností. Z chemických vlastností pôd sa pozornosť sústreďuje na ovplyvňovanie pôdneho pH, katiónovej výmennej kapacity (25), živinového režimu (28). Z fyzikálnych parametrov sa dôraz kladie na vodný režim, či zmeny v objemovej hmotnosti a pórovitosti (10, 29) v kontexte na pôdnu štruktúru (13). Nezabúda sa ani na bežný agronomický pohľad, t. j. hodnotí sa aj množstvo a kvalita dopestovaných rastlinných produktov po aplikácii biouhlíkových substrátov (3, 23). Biouhlie bolo identifikované ako významný faktor, ktorý priaznivo pôsobí na zvyšovanie C v pôde a jeho sekvestráciu (26). Avšak podstatne menej je informácií a celkovo štúdií, ktoré by riešili vplyv aplikovaného biouhlia a jeho substrátov na obsah humusových látok a ich kvalitu v pôde. Navyše štúdie, kde by sa testovalo biouhlie či už zmixované s prídavným komponentami, resp. ešte ďalšími prídavnými hnojivami, ktoré je v niektorých prípadoch nutné aplikovať z hľadiska nevyrovnaného pomeru živín v biouhli na množstvo a kvalitu humusových látok úplne chýbajú.

Z množstva organických látok vyskytujúcich sa v prírode sú najrozšírenejšie humusové látky, ktoré sú prítomné v pôde, vode, geologických organických ložiskách, v sedimentoch jazier, v rašeline a uhlí. Predstavujú asi 25 % celkového organického uhlíka na Zemi a obsahujú až 50 – 75 % rozpusteného organického uhlíka vo vode. Humusové látky majú nepochybný význam pre viaceré environmentálne procesy v pôdnych aj vodných systémoch. Humusové látky zvyšujú kvalitu a produktivitu pôdy prostredníctvom zlepšovania štruktúry pôdy, zadržiavaním vody a zabezpečením neustáleho prístupu k živinám. Blokujú a deaktivujú aj prvky vyskytujúce sa v toxických dávkach. Vo vodných systémoch sa podieľajú na odstraňovaní toxických prvkov, organických chemikálií antropogénneho pôvodu a ďalších znečisťujúcich látok. Prostredníctvom priamych ako aj nepriamych mechanizmov ovplyvňujú vodné a pôdne organizmy. A napokon, humusové látky sa úspešne používajú v medicíne a farmaceutických výrobkoch (32). Z uvedeného je evidentné, že humusové látky sú nesmierne dôležité, i keď sa dokonca vo veľmi významnom vedeckom časopise objavila štúdia, ktorá ich existenciu spochybňuje a humusové látky podľa autorov tejto publikácie nemajú takú úlohu, keďže sa získavajú extrakciou alkáliami pričom sa údajne mení ich charakter, štruktúra a celkovo zloženie (14). Avšak na druhej strane, Weber (31) uviedol, že funkcie a reakcie humusových látok nevyžadujú nevyhnutne alkalickú extrakciu o čom svedčia niektoré štúdie, ktoré používajú C¹³-NMR spektrá. Pomocou nich sa totižto porovnali vyextrahované materiály so spektrami originálu, t. j. pôdy a zistilo sa, že obe sady spektier sú rovnaké, čo naznačuje, že extrakcia nemení štruktúru humusových látok po ich alkalickéj extrakcii z pôdy.

Humus je súčasťou pôdnej organickej hmoty a vznikol v procese humifikácie, kedy odumreté zvyšky stratili pôvodné znaky anatomickej stavby a nadobudli špecifické znaky a vlastnosti. Keďže, humus zásadným spôsobom ovplyvňuje kvalitu pôdy, je nevyhnutné venovať mu náležitú pozornosť aj v súvislosti s aplikáciou biouhľia do pôdy. V tejto súvislosti sme našu pozornosť upriamili na riešenie nasledovných hypotéz: humus je pomerne stabilný v pôdnom prostredí, ale bioulie pridané do pôdy môže prostredníctvom priming efektov narušiť stabilitu primárnej pôdnej organickej hmoty, čo môže mať za následok tvorbu humusových látok. Tento efekt bude výraznejší vo variantoch, kde sa k biouhlíkovému substrátu pridá aj ďalšie prídavné organické hnojenie. Rozdiely budú jednak závislé od zloženia testovaných biouhlíkových substrátov, aplikačných dávok, tak i ich kombinácii s ďalším prídavným organickým hnojením, ktoré sa vyznačuje vyšším stupňom lability.

Cieľom tejto štúdie bolo vyhodnotiť vplyv aplikovaných biouhlíkových substrátov v rôznych dávkach a ich kombinácii s prídavným organickým hnojením na zmeny v parametroch pôdnej organickej hmoty a humusu.

Materiál a metodika

Charakteristika lokality

Experiment bol založený v juhozápadnej časti Slovenska v lokalite Veľké Uľany (48° 9' 11.5" N 17° 34' 57.6" E) na hlinitej černoziemi. Pokusná lokalita sa vyznačuje priemernou ročnou teplotou 9 – 10 °C a priemerný ročný úhrn zrážok sa pohybuje od 520 do 600 mm. Charakteristika pôdy pred založením pokusu je zosumarizovaná v tabuľke 1.

Charakteristika experimentu

Pokus bol založený na jar 2018 metódou náhodného rozloženia v dvojnásobnom opakovaní každého variantu, pričom veľkosť jedného políčka bola 25 m². Medzi jednotlivými políčkami boli vynechané ochranné pásy. Celkovo boli založené dva experimenty s nasledovnými variantmi:

Pokus 1: I. nehnojená kontrola, II. biouhlíkový substrát 1 (B1) v dávke 10 t.ha⁻¹, III. B1 v dávke 20 t.ha⁻¹, IV. biouhlíkový substrát 2 (B2) v dávke 10 t.ha⁻¹, a V. B2 v dávke 20 t.ha⁻¹.

Pokus 2: I. hnojená kontrola – organické hnojivo (OH), II. B1 v dávke 10 t.ha⁻¹ + OH, III. B1 v dávke 20 t.ha⁻¹ + OH, IV. B2 v dávke 10 t.ha⁻¹ + OH a V. B2 v dávke 20 t.ha⁻¹ + OH.

Ako predplodina sa tu v roku 2017 pestovala mrkva siata, kým počas prvého pokusného roku to bola paprika ročná a v roku 2019 červená repa. Na jar 2018 pred vysadením papriky sa do pôdy (do hĺbky 0,1 – 0,12 m) zapravili oba testované biouhlíkové substráty a v pokuse, kde sa počítalo s organickým hnojením i granulované organické hnojivo Italpollina. Italpollina ako použité organické hnojivo (OH) sa na jar 2018 aplikovalo v dávke 0,85 t.ha⁻¹ a na jar v 2019 v dávke 1 t.ha⁻¹. Pôda sa počas trvania expe-

rimentu obrába konvenčným spôsobom, t. j. na jeseň sa orie do hĺbky 0,2 m a na jar následne pripraví rotačným kypričom a v závislosti od pestovanej zeleniny sa využije mechanická plečka v kombinácii s chemickým ničéním burín. Počas vegetačného obdobia pestovania papriky v roku 2018 tu bola aplikovaná kvapková závlaha celkovo 3-krát (aplikačná dávka = nasýtenie pôdy vodou do 80 % plnej vodnej kapacity) a povrch pôdy bol pokrytý krycou fóliou a v prípade nepriaznivých poveternostných podmienok boli rastliny papriky zakrývané textíliou. Taktiež v roku 2019, kedy modelovou plodinou na experimente bola červená repa sa pre zlepšenie vlhkových pomerov počas jej vegetácie aplikovala závlaha (celkovo 2×).

Charakteristika testovaných substrátov

Testovali sa dva typy biouhlíkových substrátov označených pod obchodným názvom Effeco 50 : 50 (B1) a Effeco 33 : 33 : 33 (B2) od spoločnosti Zdroje Zeme a.s., ktorá sa zaoberá ich vývojom. B1 je substrát, ktorý bol vytvorený zmiešaním biouhľia (vyrobené pyrolýzou bukového dreva) so sušeným ovčím hnojom v pomere 1 : 1 a obsahuje: 43 % celkového organického uhlíka, 1,2 % celkového N, 0,49 % P a 24,6 % K a jeho pH je 8,18. B2 je substrát vytvorený zmiešaním biouhľia so sušeným ovčím hnojom a separátom z bioplynovej stanice (pôvodná surovina kravský hnoj) v pomere 1 : 1 : 1 a obsahuje: 45,4 % celkového organického uhlíka, 1,3 % celkového N, 0,79 % P a 15,5 % K a jeho pH je 8,48. Obsah rizikových prvkov v oboch typoch testovaných biouhlíkových substrátov neprekračuje limitné hodnoty, ktoré stanovuje vyhláška 577/2005, ktorou sa ustanovujú typy hnojív, zloženie, balenie a označovanie hnojív, analytické metódy skúšania hnojív, rizikové prvky, ich limitné hodnoty pre jednotlivé skupiny hnojív, prípustné odchýlky a limitné hodnoty pre hospodárske hnojivá a zákon 220/2004 o ochrane a využívaní poľnohospodárskej pôdy. Oba typy biouhlíkových substrátov sú granulované do tvaru valca, ktorého veľkosť je cca. 1 x 2,5 cm. Organické hnojivo Italpollina je vyrobené z hydínového trusu a obsahuje: 4 % N, 4 % P₂O₅, 4 % K₂O a jeho pH je neutrálne. Dodávané je vo forme granúl s veľkosťou cca. 3 x 5 mm

Odber a analýza pôdnych vzoriek

Vzorky pôdy pre stanovenie pôdnej organickej hmoty a humusu boli odobrané zo všetkých variantov na jar a jeseň v rokoch 2018 a 2019 z hĺbky 0,2 m. Po vysušení sa vzorky pôdy rozdrvili a zhomogenizovali a následne sa v nich stanovil obsah organického uhlíka (C_{org}) – oxidometricky, obsah labilného uhlíka (16) a skupinové zloženie humusových látok – metódou Belčíkovej a Kononovej (4). Absorbancia humusových látok a humínových kyselín bola meraná pri vlnovej dĺžke 465 a 650 nm pomocou spektrofotometra Jenway 6400 a na základe nameraných absorbancií boli vypočítané farebné kvocienty humusových látok a humínových kyselín.

Tabuľka 1: Vlastnosti pôdy pred založením experimentu

Table 1: Soil properties before experiment

Lokalita (1)	Piesok (2)	Prach (3)	Íl (4)	C _{org}	N	P	K	pH
	%							
Veľké Uľany	38,5	47,8	13,7	1,56	966	129	255	7,78

(1) locality, (2) sand, (3) silt, (4) clay

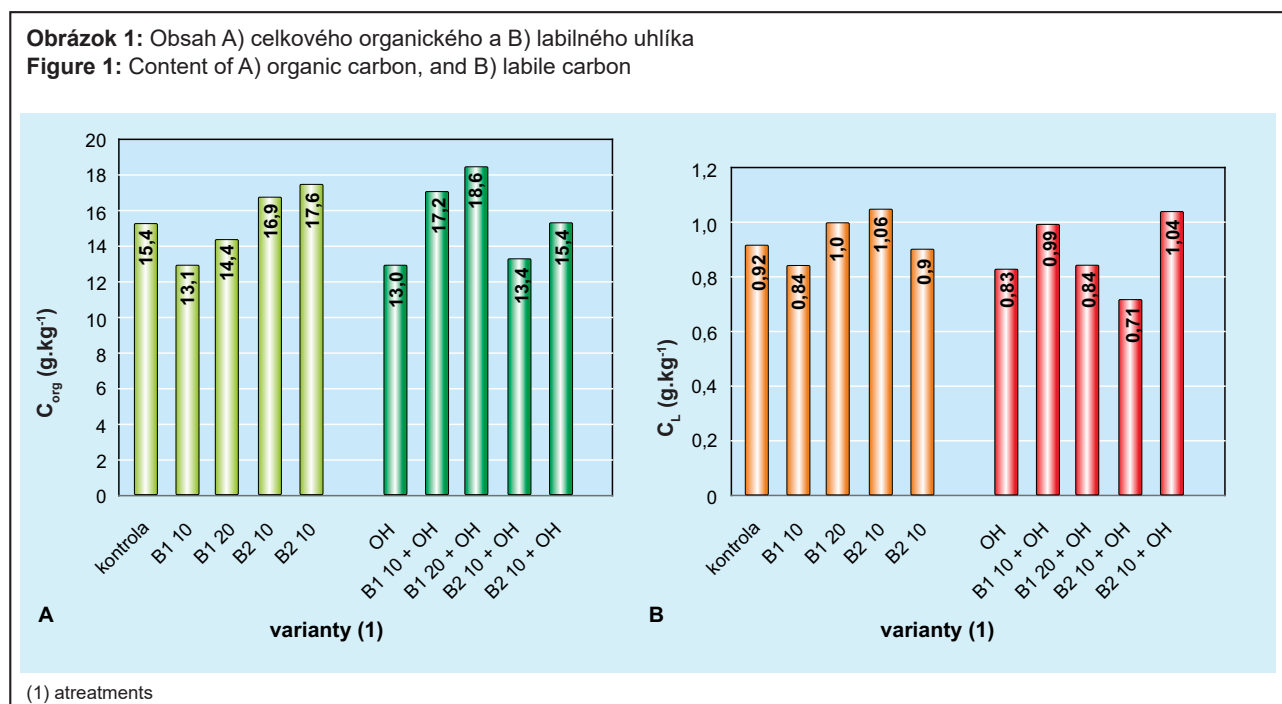
Výsledky a diskusia

Samotná aplikácia substrátu B1 v oboch dávkach za obdobie 2. rokov priemerne znížila obsah organického uhlíka (C_{org}) z 1,54 % v kontrole na 1,31 % a 1,44 % vo variantoch B1 10 (10 t.ha⁻¹) a B1 20 (20 t.ha⁻¹). Na druhej strane, čím vyššia dávka biouhlíkového substrátu B2 bola aplikovaná do pôdy na začiatku experimentu, tým vyšší obsah C_{org} v porovnaní s kontrolou bol stanovený. Ak bolo k biouhlíkovým substrátom pridané každoročne organické hnojivo Italpollina, tak bol pozorovaný výrazný nárast v obsahu C_{org} v porovnaní s hnojenu kontrolou. Čím bola dávka biouhlíkových substrátov vyššia, tým vyšší nárast C_{org} bol zistený. Rozdiely boli pozorované medzi jednotlivými typmi biouhlíkových substrátov. Výraznejšie zvýšenie bolo zistené, ak bol substrát B1 kombinovaný s organickým hnojivom (OH) v porovnaní s hnojenu kontrolou ako to bolo v prípade kombinácie substrátu B2 v porovnaní s nehnojenu kontrolou. Tieto efekty pravdepodobne súvisia s preferenčným využívaním substrátu (obrázok 1A). Aplikovaný biouhlíkový substrát, resp. jeho kombinácia s inými organickými hnojivami môže prispieť k preferenčnému využívaniu týchto substrátov prostredníctvom stimulácie mikrobiálnej aktivity, pričom pôdne mikroorganizmy môžu prednostne využívať labilné zdroje pridaného biouhlíkového substrátu, resp. organického hnojiva (22). Mineralizácia pôdneho organického uhlíka môže byť inhibovaná aj prostredníctvom sorpcie labilného uhlíka na biouhlíkové substráty a následne vyvolať tvorbu relatívne stabilnej organickej hmoty (12). Tieto tzv. pozitívne a negatívne „priming efekty“ závisia predovšetkým od výrobných podmienok biouhľia (2). Z našich výsledkov je evidentné, že obsah C_{org} bol významne ovplyvnený aplikačnou dávkou, samotným typom biouhlíkového substrátu, ale i to či bolo resp. nebolo k biouhlíkovému substrátu zapracované i prídavné organické hnojivo Italpollina. Medzi obsahmi C_{org} a obsahmi labilného uhlíka (C_L) ani v prípade aplikácie biouhlíkových substrátov samostatne a ani v ich kombinácii s OH neboli pozorované štatisticky významné lineárne

závislosti (obrázok 2A). Obsahy C_L sa menili v závislosti od typu substrátu, ale i od toho či k nemu bolo pridané OH (obrázok 1B). Typ substrátu má vplyv na hodnoty labilných zloženík v ňom (2). Horák et al. (9) uvideli, že prídavné hnojenie k biouhľiu môže byť významným akceleratorom ovplyvňujúcim zmeny v pôde vrátane lability pôdnej organickej hmoty.

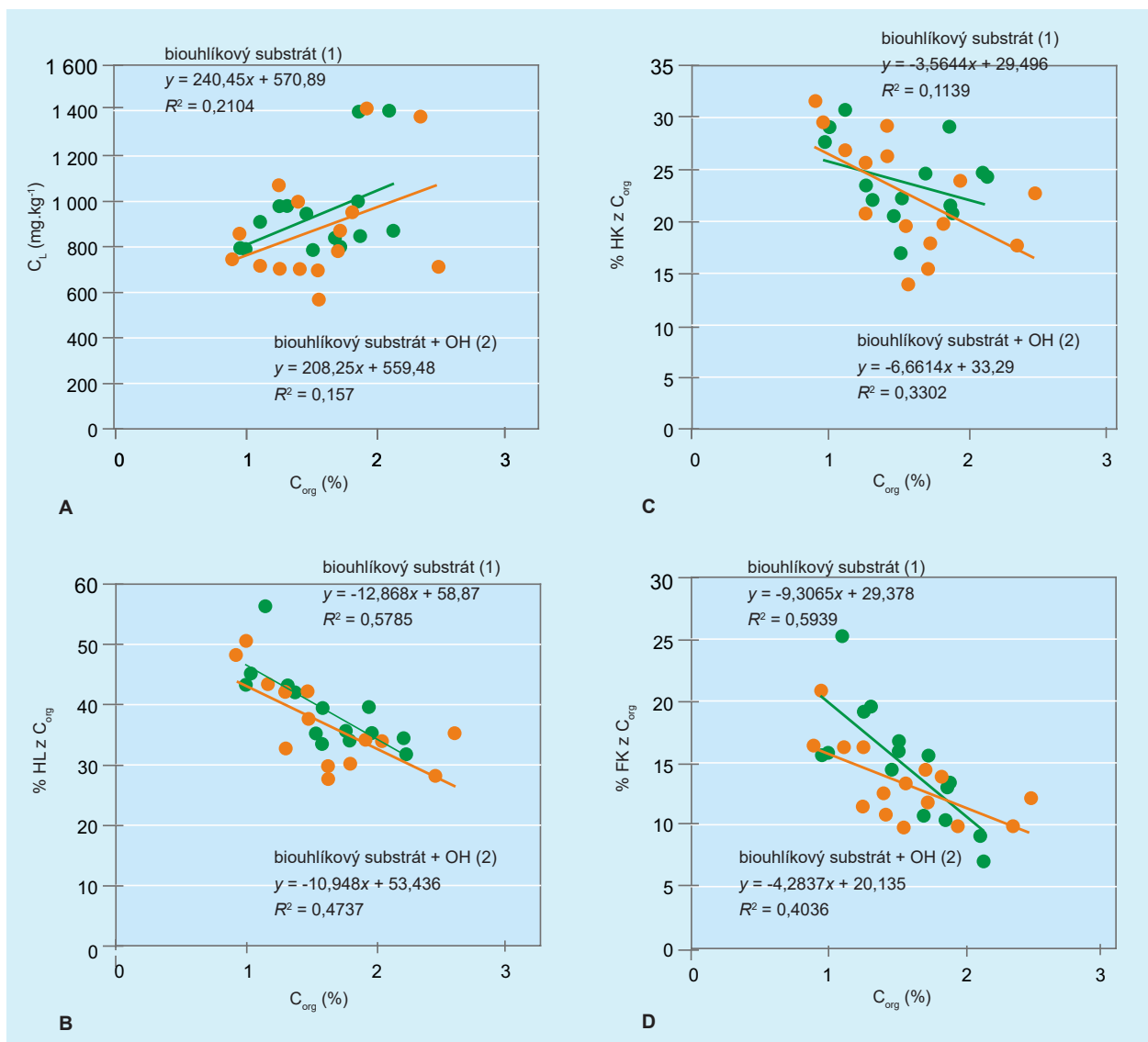
So zvyšovaním obsahu C_{org} vo variantoch s aplikovaným biouhľím samostatne, ale i v kombinácii s OH sa znižovalo množstvo humusových látok (HL) z obsahu C_{org} – výraznejšie vo variantoch, kde boli biouhlíkové substráty aplikované samostatne (obrázok 2B). Za obdobie dvoch rokov (priemer 2. rokov) sa v porovnaní s nehnojenu kontrolou podiel HL z obsahu C_{org} významne znížil o 9, 15, 16 a 17 % vo variantoch B1 v dávke 10 a 20 t.ha⁻¹, B2 v dávke 10 a 20 t.ha⁻¹. Z týchto výsledkov vyplýva, že dodané biouhlíkové substráty síce zvýšili množstvo C_{org} v skúmanej pôde, ale nie podiel HL z jeho obsahu, čo indikuje skutočnosť, že tieto substráty sa vyznačujú nižšou reaktivitou a stabilnejšou štruktúrou a na humifikáciu pôdnej organickej hmoty majú skôr negatívny ako pozitívny efekt. Biouhlie, ktoré sa používa na výrobu substrátov sa stáva stabilným počas pyrolýzy, pretože uhlíkový základ použitých biologických materiálov sa nanovo preskupuje. Alifatické uhlíkové reťazce (reťazové štruktúry, ktorých chemické väzby sú ľahko atakované mikrobiálnymi enzýmami) sú konvertované na aromatické prstence (zvyčajne šesťuhlíkové – ako je benzén alebo príležitostne iné atómy, napríklad dusík, spojené v prstencovitej štruktúre silnými chemickými väzbami, ktoré sú odolné voči mikrobiálnemu rozkladu). Ďalšia reštrukturalizácia vedie k spojeniu týchto aromatických skupín do veľkých komplexov procesom známym ako kondenzácia. Prakticky, dobre spyrolizované biouhlie je tvorené listami kondenzovaných aromatických prstencov rôznych veľkostí, spolu s popolom a stopami menších molekúl. Aromatickosť a stupeň kondenzácie sú spojené so stabilitou biouhľia (6, 19). Ak bolo k biouhlíkovým substrátom každoročne aplikované OH, tak podiel HL z C_{org} sa významne nezmenil (obrázok 3), čo indikuje, že

Obrázok 1: Obsah A) celkového organického a B) labilného uhlíka
Figure 1: Content of A) organic carbon, and B) labile carbon



Obrázok 2: Lineárna závislosť medzi A) C_{org} a C_L , B) C_{org} a podielu HL z C_{org} , C) C_{org} a podielu HK z C_{org} , a D) C_{org} a podielu FK z C_{org} v jednotlivých pokusoch s biouhlíkovými substrátmi

Figure 2: Linear relationships between soil organic carbon and A) labile carbon, B) share of humic substances in soil organic carbon, C) share of humic acids in soil organic carbon, and D) share of fulvic acids in soil organic carbon under biochar treatments



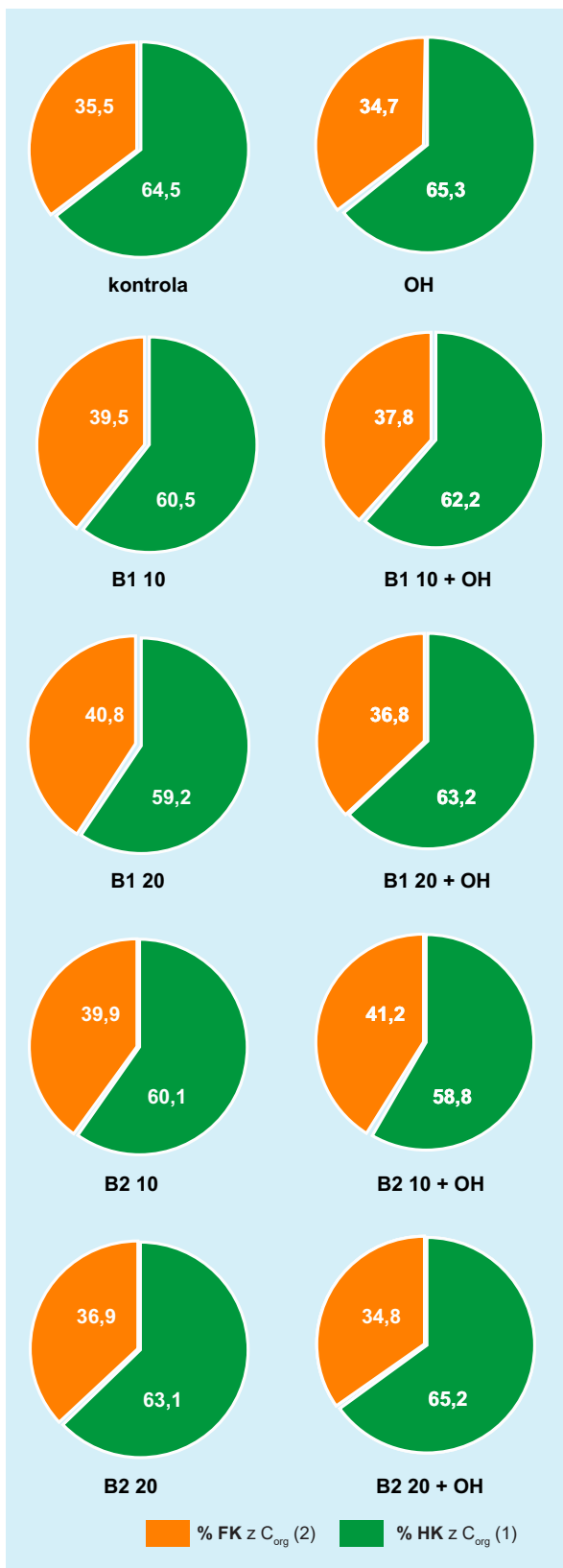
(1) biochar treatments, (2) biochar treatments combined with manure

prídavné OH pôsobí ako stabilizačný faktor na podiel HL z C_{org} v pôde po aplikácii biouhlíkových substrátov. Jindo et al. (11) uviedli, že biouhlie je schopné zvyšovať stabilitu humusových látok v organických hnojivách počas jeho kompostovania. Stupeň humifikácie organickej hmoty po aplikácii biouhlíkových substrátov sa pohyboval v rozpätí od 22 do 24 %, čo zodpovedá strednému stupňu a bol znížený o 15 – 22 % v porovnaní s nehnojenu kontrolou. To hovorí o tom, že v pôde jednoznačne prevláda primárna organická hmota nad humusom, ktorá mineralizuje a podstatne menej humifikuje a i v organicky nehnojenej pôde sa neustále dopĺňa prostredníctvom koreňových exsudátov, rastlinnými a koreňovými zvyškami, biomasou mikroorganizmov atď. (30). Vzťah medzi podielom HK z C_{org} a C_{org} vo variantoch s aplikáciou biouhlíkových substrátov

nebol lineárny. Na druhej strane, v prípade variantov, kde boli kombinované substráty s OH tento vzťah bol štatisticky lineárne významný, t. j. pri vyššom obsahu z dodaných substrátov a OH sa znižoval stupeň humifikácie organickej hmoty pôdy (obrázok 2C). Významný vplyv na zníženie stupňa humifikácie mala nižšia dávka v prípade oboch substrátov ak boli kombinované s OH v porovnaní s vyššou aplikačnou dávkou (obrázok 3). Obsah FK z C_{org} sa v priemere za 2. roky významne znížil iba v prípade oboch substrátov v dávke 20 t.ha⁻¹ v porovnaní s nehnojenu kontrolou a taktiež v prípade oboch substrátov v dávke 10 t.ha⁻¹ v kombinácii s OH v porovnaní s hnojenu kontrolou (obrázok 3). Medzi podielom FK z C_{org} a C_{org} bola zaznamenaná významná negatívna linearita a to v prípade aplikácie samotných biouhlíkových substrátov a aj ich

Obrázok 3: Zastúpenie podielu humusových látok z celkového organického uhlíka

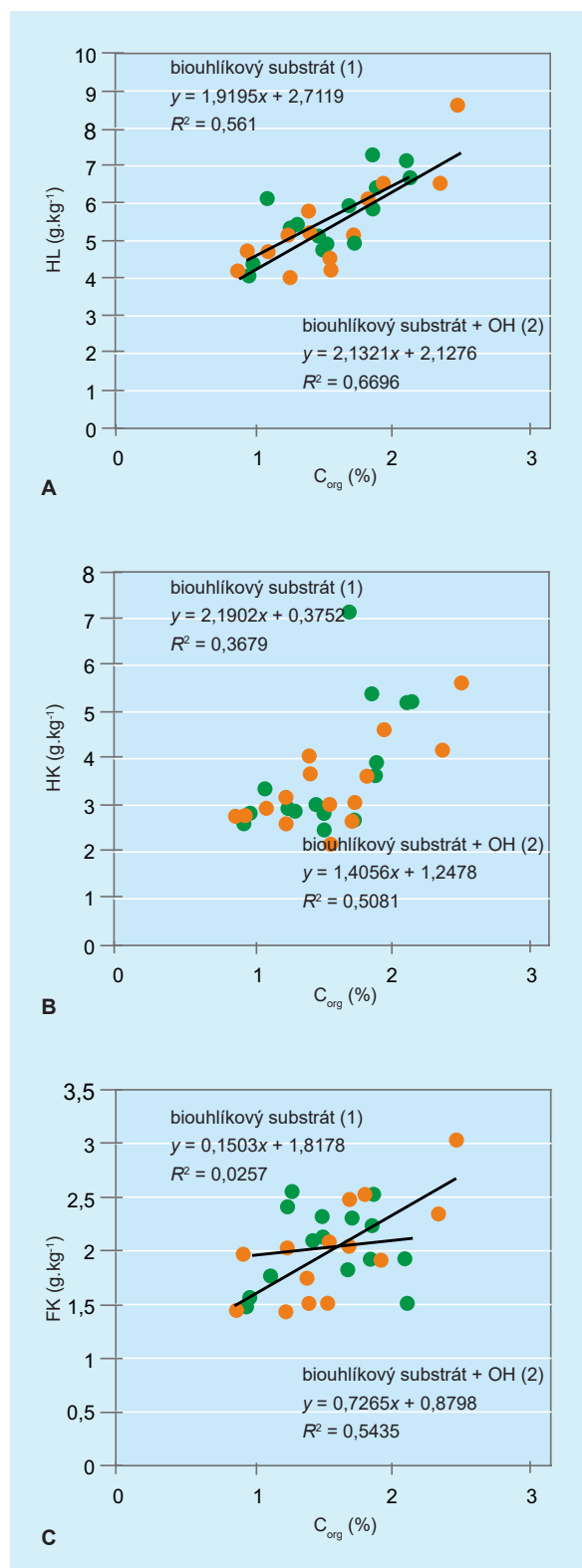
Figure 3: Share of humic substances in soil organic carbon



(1) share of humic acids in soil organic carbon, (2) share of fulvic acids in soil organic carbon

Obrázok 4: Lineárna závislosť medzi A) C_{org} a HL, B) C_{org} a HK, C) C_{org} a FK v jednotlivých pokusoch s biouhlíkovými substrátmi

Figure 4: Linear relationships between soil organic carbon and A) humic substances, B) humic acids, and C) fulvic acids under biochar treatments



(1) biochar treatments, (2) biochar treatments combined with manure

kombinácie s OH. FK sa ľahko rozkladajú, ale aj pomerne rýchlo obnovujú v nepretržitom procese mineralizácie a humifikácie. Obsah FK z organickej hmoty v pôdach s vyššou biologickou aktivitou, čo je i náš prípad (27) je pravdepodobne pre rýchlejšiu mineralizáciu nižší.

Nedávny výskum ukázal, že zvyšky rastlín, ktoré neprešli pyrolýzou, obsahujú málo alebo takmer žiadne stabilné molekuly (20). Farmár, ktorý na svoje polia aplikuje čerstvú biomasu alebo kompost, tak vidí, že po niekoľkých mesiacoch alebo rokoch zostane z týchto vstupných surovín iba málo z ich pôvodného uhlíka. Iba menej ako 1 % z celkového pridaného uhlíka z čerstvých rastlinných zvyškov zostane ako odolný organický uhlík v pôde (niekedy známy ako humus), ktorého kolobeh bude v trvaní niekoľko stoviek či tisícov rokov (21). Z tohto pohľadu môže mať aplikácia biouhľia získaného pyrolýzou biologického odpadu neobsahujúce škodlivé a zdraviu nebezpečné látky či jeho substrátov a rôznych kombinácií s inými hnojivami svoje opodstatnenie. Základom pôdnej úrodnosti je i biologický faktor a o jej udržateľnosti nerozhoduje iba dostatok labilných frakcií primárnej pôdnej organickej hmoty, ale i ich ostatných semilabilných a dokonca i semistabilných organických látok (30). Napríklad aj výsledky štúdie Li et al. (15) ukázali, že biouhlie aplikované do pôdy je prospešné z hľadiska tvorby humusu v pôde, pretože po jeho zapravení do pôdy, avšak v laboratórnych podmienkach došlo k zvýšeniu obsahu HK a FK. Naše výsledky pochádzajú z poľného experimentu a zmenené obsahy humusových látok v skúmanej pôde boli zapríčinené v závislosti od typu aplikovaného biouhľikového substrátu, jeho dávky, ale i od toho či boli substráty aplikované samostatne, resp. kombinované s prídavným organickým hnojením (tabuľka 2). Napr. ak bol biouhľikový substrát B1 v dávkach 10 a 20 t.ha⁻¹ aplikovaný samostatne v porovnaní s nehnojenu kontrolou, tak obsah HL sa znížil z 6,52 g.kg⁻¹ na 4,86 a 5,15 g.kg⁻¹. Na druhej strane substrát B2 obsah HL síce znížil, ale nie štatisticky preukazne. V porovnaní s nehnojenu kontrolou sa obsah HK znížil v rozpätí od 26 do 45 % v prípade oboch testovaných substrátov pokiaľ boli aplikované samostatne v porovnaní s nehnojenu kontrolou. Ak bol substrát B1 kombinovaný s OH, tak sme pozorovali štatisticky významný nárast v obsahu HL v pôde – výrazne viac po aplikácii jeho vyššej dávky. Obsah HK sa zvýšil o 8, 30 a 16 % po aplikácii B1 v dávke 10

a 20 t.ha⁻¹, ale i po aplikácii B2 v dávke 20 t.ha⁻¹. Po aplikácii biouhľikových substrátov sa priemerne za dva roky zvýšil obsah FK v pôde – výraznejšie v prípade kombinácie testovaných substrátov s OH ako iba ich samotnou aplikáciou. Celkovo zvýšenie FK v oboch experimentoch, ale aj zvýšenie HK a teda celkovo HL v experimente, kde sa biouhľikové substráty kombinovali s OH možno pripísať zastúpeniu väčšieho množstva odolných organických molekúl biouhľikových substrátov voči mikrobiálnemu rozkladu (17). Celkovo medzi obsahom C_{org}, ktorý sa zvýšil i vďaka prídaniu biouhľikových substrátov a jeho kombinácii s prídavným OH s obsahom HL vrátane HA bola zistená štatisticky významne lineárna závislosť (obrázok 4 A, B), pričom tento vzťah bol v oboch prípadoch silnejší vo variantoch biouhľikové substráty + OH. To poukazuje na to, že prostredníctvom dodaných oboch substrátov v kombinácii s OH sa v pôde zvýšilo zastúpenie HL.

Využívanie rôznych typov biouhľia má veľký potenciál pre tvorbu (15) a stabilizáciu humusových látok v pôdach (5), čo sa v našom výskume potvrdilo iba čiastočne (tabuľka 2). Kvalita humusu založená na C_{HA} : C_{FA} pre študovanú pôdu bola nad 1, čo naznačuje celkovo priaznivú kvalitu humusu (24), a to i napriek tomu, že prídanie substrátov samostatne, ale i ich kombinácia s OH (okrem substrátu B2 vo vyššej dávke a jeho kombinácia s OH vo vyššej dávke) znížila pomer C_{HA} : C_{FA}. Tento výsledok môže byť v dôsledku narušenia samotnej stability humusu v pôde. Humus v pôde je relatívne stabilný (7, 30), ale v dôsledku vonkajších vplyvov, ako v našom prípade určite bola aplikácia biouhľikových substrátov, môže byť jeho stabilita narušená a humus v pôde začína podliehať ataku pôdnych mikroorganizmov (1) výsledkom čoho je znižovanie HL v pôde (18). Samozrejme zásadný vplyv na tieto procesy budú mať vlastnosti biouhľia. Napr. Zhao et al. (33) uviedli, že rozdielny vplyv biouhľia na obsah HK a FK závisí od rôznych teplôt použitých na výrobu biouhľia. V našom prípade sa kvalita humusu nenarušila v dôsledku zníženia stability humusu vo všetkých variantoch. Hodnoty farebných kvocientov humusových látok (Q_{HL}) sa znížili v rozpätí od 17 do 9 % v prípade variantov bez prídavného hnojenia, čo indikuje stabilizáciu humusu prostredníctvom dodaných substrátov. Na druhej strane, stabilita humusu sa znížila vo variantoch, kde boli substráty aplikované spolu s OH, kdeže sa hodnoty Q_{HL} zvýšili v rozpätí od 6 do 24 %.

Tabuľka 2: Obsah humusových látok a kvalitatívne parametre humusu

Table 2: Content of humic substances and qualitative humus parameters

Variant (1)	HL	Rel. (%)	HK	Rel. %	FK	Rel. %	C _{HK} : C _{FK}	Rel. %	Q _{HL} ^{4/6}	Rel. %	Q _{HK} ^{4/6}	Rel. %
	g.kg ⁻¹		g.kg ⁻¹		g.kg ⁻¹				g.kg ⁻¹			
Kontrola	6,52	100	5,33	100	1,85	100	2,1	100	4,87	100	3,75	100
B1 10t	4,86	75	2,92	55	1,94	105	1,53	73	4,28	88	3,48	93
B1 20t	5,15	79	3,02	57	2,12	115	1,46	70	4,42	91	3,83	102
B2 10t	5,86	90	3,63	68	2,23	121	1,69	81	4,14	85	3,63	97
B2 20t	6,05	93	3,94	74	2,11	114	2,07	99	4,06	83	3,56	95
OH	4,86	100	3,18	100	1,67	100	1,93	100	3,93	100	3,38	100
B1 10t + OH	5,51	113	3,44	108	2,07	124	1,65	86	4,41	112	3,7	109
B1 20t + OH	6,58	135	4,14	130	2,44	149	1,75	91	4,15	106	3,62	107
B2 10t + OH	4,55	94	2,68	84	1,87	112	1,48	77	4,66	119	3,36	100
B2 20t + OH	5,68	117	3,7	116	1,98	119	1,92	100	4,89	124	3,89	115

(1) treatments

Záver

Získané výsledky potvrdili významné zmeny v množstve a kvalite pôdnej organickej hmoty a humusových látok po aplikácii biouhlíkových substrátov v hlinitej černozi. Pozitívne resp. negatívne zmeny boli závislé od typu zapracovaného biouhlíkového substrátu, jeho aplikačnej dávky, ale i od toho či boli resp. neboli kombinované s prídavným organickým hnojením. Testované biouhlíkové substráty sa vyznačujú nižšou reaktivitou a stabilnejšou štruktúrou a na humifikáciu pôdnej organickej hmoty majú skôr negatívny ako pozitívny efekt. Ak sa však k biouhlíkovým substrátom každoročne aplikovalo prídavné organické hnojenie reprezentujúce ľahko dostupné organické zdroje, tak podiel humusových látok z organickej hmoty sa významne nezmenil. Uvedené indikuje, že prídavné organické hnojenie pôsobí ako stabilizačný moment na humifikačný proces organickej hmoty pôdy po aplikácii biouhlíkových substrátov. Aplikáciou biouhlíkových substrátov spolu s organickým hnojením sa v pôde zvýšilo zastúpenie humusových látok – výrazne vyšší nárast fulvo kyselín ako humínových kyselín, čo malo za následok narušenie aj stability humusových látok. Na druhej strane prostredníctvom zapracovaných biouhlíkových substrátov došlo k výraznejšej stabilizácii humusu v pôde.

Z našich výsledkov je zrejme, že ak chce byť farmár úspešný aj v prípade využívania biouhlíkových substrátov v rámci jeho koncepcie hospodárenia na pôde, musí brať do úvahy nie len benefity, ale i nevýhody, ktoré z toho vyplývajú. Naše výsledky sú súhrnom zatiaľ dvojročného experimentu a keďže ako je v článku uvedené, kolobeh humusových látok sa datuje na rádovo stovky až tisícok rokov, nie je možné úplne relevantne vyjadriť sa ako to bude v prípade zmeny humusu v ďalšom dlhodobom období. Naše výsledky však naznačujú, že biouhlíkové substráty sú zdrojom najmä stabilnej organickej hmoty, ktorá sa môže aktivovať prostredníctvom prídavného organického hnojenia k naštartovaniu pozitívnych transformačných procesov v pôde, pričom sa farmár musí vždy zodpovedne zamyslieť nad množstvom a kvalitou aplikovaného biouhlíkového substrátu.

Literatúra

- (1) ADANI, F. – GENEVINI, P. – RICCA, G. – TAMBONE, F. – MONTONERI, E. 2007. Modification of soil humic matter after 4 years of compost application. In *Waste Management*, 2007, 27, pp. 319–324.
- (2) AL-WABEL, M.I. – HUSSAIN, Q. – USMAN, A.R.A. – AHMAD, M. – ABDULJABBAR, A. – SALLAM, A.S. – OK, Y.S. 2018. Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: A review. In *Land Degrad. Dev.*, 2018, 29, pp. 2124–2161.
- (3) AYDIN, E. – ŠIMANSKÝ, V. – HORÁK, J. – IGAZ, D. 2020. Potential of Biochar to Alternate Soil Properties and Crop Yields 3 and 4 Years after the Application. In *Agronomy*, 2020, 10, 889.
- (4) DZIADOWIEC, H. – GONET, S.S. 1999. Przewodnik metodyczny do badań materii organicznej gleb. Prace komisji naukowych Polskiego towarzystwa gleboznacznego. Warszawa, 1999, 65 p.
- (5) GONDEK, K. – MIERZWA-HERSZTEK, M. 2017. Effect of thermal conversion of municipal sewage sludge on the content of Cu, Cd, Pb and Zn and phytotoxicity of biochars. In *Journal of Elementology*, vol. 22, 2017, no. 2, pp. 427–435.
- (6) GUPTA, V. V. – GERMIDA, J. J. 2015. Soil aggregation: influence on microbial biomass and implications for biological processes. In *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 80, 2015, pp. A3–A9.
- (7) HAYNES, R.J. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview. In *Advances in Agronomy*, 2005, no. 85, pp. 221–268.
- (8) HORÁK, J. – ŠIMANSKÝ, V. – AYDIN, E. 2020. Benefits of biochar and its combination with nitrogen fertilization for soil quality and grain yields of barley, wheat and corn. In *Journal of Elementology*, vol. 25, 2020, no. 2, pp. 443–458.
- (9) HORÁK, J. – ŠIMANSKÝ, V. – IGAZ, D. – JURIGA, M. – AYDIN, E. – LUKAC, M. 2020. Biochar – an Important Component Ameliorating the Productivity of Intensively Used Soils. In *Polish Journal of Environmental Studies*. vol. 29, 2020, no. 5, pp. 2995–3001.
- (10) IGAZ, D. – ŠIMANSKÝ, V. – HORÁK, J. – KONDRLOVÁ, E. – DOMANOVÁ, J. – RODNÝ, M. – BUCHKINA, N. P. 2018. Can a single dose of biochar affect selected soil physical and chemical characteristics? In *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, vol. 66, 2018, no. 4, pp. 421–428.
- (11) JINDO, K. – SONOKI, T. – MATSUMOTO, K. – CANELLAS, L. – ROIG, A. – SANCHEZ-MONEDERO, M. A. 2016. Influence of biochar addition on the humic substances of composting manures. In *Waste Management*, vol. 49, 2016, pp. 545–552.
- (12) JONES, D.L. – ROUSK, J. – EDWARDS-JONES, G. – DELUCA, T.H. – MURPHY, D.V. 2012. Biochar mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. In *Soil Biol. Biochem.*, 2012, no. 45, pp.113–124.
- (13) JURIGA, M. – ŠIMANSKÝ, V. 2019. Pôdna organická hmota a pôdna štruktúra hnedozeme ovplyvnená prídavím biouhľia a biouhľia s N hnojivom. In *Agrochémia*, vol. XXII. (59), 2019, no. 1. pp. 16–27.
- (14) LEHMANN, J. – KLEBER, M. 2015. The continuous nature of soil organic matter. In *Nature*, 2015, no. 528, pp. 60–68.
- (15) LI, H. et al. 2015. Effect of biochar on organic matter conservation and metabolic quotient of soil. In *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2015, no. 34, pp. 1467–1472.
- (16) LOGINOW, W. – WISNIEWSKI, W. – GONET, S.S. – CIESCINSKA, B. 1987. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation. In *Pol. J. Soil Sci.*, 20, 1987, pp. 47–52.
- (17) LOPEZ-CAPEL, E. – ZWART, K. – SHACKLEY, S. – POSTMA, R. – STENSTROM, J. – RASSE, D. P. – BUDAI, A. – GLASER, B. 2016. Biochar properties. In *Biochar in European Soils and Agriculture, Science and Practice*. London and New York : Routledge, Taylor and Francis Group, 2016, pp. 39–72. ISBN 978-0-415-71166-1.
- (18) MIERZWA-HERSZTEK, M. – GONDEK, K. – KOPEĆ, M. – UKALSKA-JARUGA, A. 2018. Biochar changes in soil based on quantitative and qualitative humus compounds parameters. In *Soil Science Annual*, 2018, no. 69, pp. 234–242.
- (19) NGUYEN, B.T. – LEHMANN, J. – HOCKADAY, W.C. – JOSEPH, S. – MASIELLO, C.A. 2010. Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation. In *Environmental Science and Technology*, 44, 2010, pp. 3324–3331.
- (20) SCHMIDT, M.W.I. – TORN, M. S. – ABIVEN, S. – DITTMAR, T. – GUGGENBERGER, G. – JANSSENS, I. A. – KLEBER, M. – KOGEL-KNABER, I. – LEHMANN, J. – MANNING, D.A.C. – NANNIPIERI, P. – RASSE, D.P. – WEINDER, S. – TRUMBORE, S.E. 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. In *Nature*, vol. 478, 2011, no. 7367, pp. 49–56.
- (21) SINGH, B. P. – COWIE, A. L. – SMERNIK, R. J. 2012. Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature. In *Environmental Science and Technology*, vol. 46, 2012, no. 21, pp. 11770–11778.

- (22) SINGH, B. P. – COWIE, A. L. 2014. Long-term influence of biochar on native organic carbon mineralisation in a low-carbon clayey soil. In *Scientific Report*, vol. 4, 2014, no. 3687, pp.1–9.
- (23) SLAMKA, P. – LOŽEK, O. 2017. Vplyv lignitu na úrodu a kvalitu zrna ovsa siateho (*Avena sativa*, L.). In *Agrochémia*, vol. 57, 2017, no. 1, pp. 16–21.
- (24) SZOMBATHOVÁ, N. 2010. Chemické a fyzikálno-chemické vlastnosti humusových látok pôd ako ukazovateľ antropogénnych zmien v ekosystémoch (lokality Báb a Dolná Malanta). Nitra : SPU, 2010, 96 s. ISBN 978-80-552-0329-4.
- (25) ŠIMANSKÝ, V. – HORÁK, J. – IGAZ, D. – BALASHOV, E. – JONCZAK, J. 2018. Biochar and biochar with N fertilizer as a potential tool for improving soil sorption of nutrients. In *Journal of Soils and Sediments*, vol. 18, 2018, no. 4, pp. 1432–1440.
- (26) ŠIMANSKÝ, V. – HORÁK, J. – KOVÁČIK, P. – BAJČAN, D. 2017. Carbon sequestration in water-stable aggregates under biochar and biochar with nitrogen fertilization. In *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, vol. 23, 2017, no. 3, pp. 429–435.
- (27) ŠIMANSKÝ, V. – ŠRANK, D. – JURIGA, M. – JONCZAK, J. 2019. Fertilization and Application of Different Biochar Types and their Mutual Interactions Influencing Changes of Soil Characteristics in Soils of Different Textures. In *Journal of Ecological Engineering*, vol. 20, 2019, no. 5, pp. 149–164.
- (28) ŠRANK, D. – ŠIMANSKÝ, V. – JURIGA, M. 2020. Zásoba živín v zrnitostne odlišných pôdach po pridaní biouhlíkových substrátov a ich kombinácií s minerálnymi a organickými hnojivami. In *Agrochémia*, roč. 60, 2020, č. 1, pp. 28–34.
- (29) ŠRANK, D. – ŠIMANSKÝ, V. 2020. Physical properties of texturally different soils after application of biochar substrates. In *Agriculture (Poľnohospodárstvo)*, vol. 66, 2020, no. 2, pp. 45–55.
- (30) VÁCHALOVÁ, R. – KOLÁŘ, L. – MUCHOVÁ, Z. 2016. Primární organická pudní hmota a humus, dvě složky pudní organické hmoty. Nitra : SPU, 2016, 122 s. ISBN 978-80-552-1467-2.
- (31) WEBER, J. – CHEN, Y. – JAMROZ, E. – MIANO, T. 2018. Preface: humic substances in the environment. In *Journal of Soils and Sediments*, vol. 18, 2018, pp. 2665–2667.
- (32) WEBER, J. 2020. Humic Substances and their Role in the Environment. In *EC Agriculture*, 2020, pp. 3–8.
- (33) ZHAO, S. – TA, N. – LI, Z. – YANG, Y. – ZHANG, X. – LIU, D. – ZHANG, A. – WANG, X. 2017. Varying pyrolysis temperature impacts application effects of biochar on soil labile organic carbon and humic substances. In *Applied Soil Ecology*, 2017, 116, pp. 399–409.

doc. Ing. Vladimír Šimanský, PhD.

Katedra pedológie a geológie
Fakulta agrobiológie a potravinových zdrojov
Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre
Tr. Andreja Hlinku 2, 949 76 Nitra
e-mail: Vladimír.Simansky@uniag.sk

PodĎakovanie

Táto práca bola finančne podporená spoločnosťou
Zdroje Zeme a. s.



Foto: Šimanský, V.