

padne tmavomodrej farby zrna bola skutočnosť, že draslík významne ovplyvňuje glycidový metabolizmus (5), pričom pri jeho poruchách sa v nadmernej miere tvoria antokyány (13). Antokyány sú vodou rozpustné pigmenty, ktorých farba môže byť červená, fialová, modrá (12).

Okrem, doposiaľ nám neznámeho zaznamenania žltaného zafarbenia zrn kukurice v dôsledku nedostatku draslíka, sa zaznamenal i dlhodobo známy poznatok o nepelení špičky kukuričného šúľka (obr. 4) v dôsledku nedostatku draslíka (6).

## Záver

Prezentované poznatky spresnili (číselne vyjadrili) význam racionálnej výživy kukurice siatej vybranými makroelementmi a mikroelementmi (N, P, K, Mg, S, Cu, Zn, Fe a Mn) a zároveň priniesli unikátny poznatok o zmene farby kukuričného zrna v dôsledku výrazného nedostatku draslíka v pestovateľskom substráte.

## Literatúra

- (1) BALIGAR, V. C. – N. K. FAGERIA – HE, Z. L. 2001. Nutrient use efficiency in plants. In Communications in soil science and plant analysis, vol. 32, 2001, no. 7–8, pp. 921–950.
- (2) BERGMANN W. 1992. Nutritional disorders of plants. Development, visual and analytical diagnosis. Colour atlas. Jena, Gustav Fischer Verlag, 1992, 386 p. ISBN 3-334-60423-3.
- (3) DETURK, E. E. 1941. Plant nutrient deficiency symptoms. In Physiological basis industrial & engineering chemistry, vol. 33, 1941, no. 5, pp. 648–653.
- (4) FECENKO, J. – LOŽEK, O. 2000. Výživa a hnojenie poľných plodín: Nitra – Šaľa : SPU a Duslo, 2000, 452 s. ISBN 80-7137-777-5.

- (5) IVANIČ, J. – HAVELKA, B. – KNOP, K. 1984. Výživa a hnojenie rastlín. Bratislava a Praha: Príroda a SZN, 1984, 488 s.
- (6) KIRÁLY, Z. 1976. Plant disease resistance as influenced by biochemical effects on nutrients in fertilizers. In Fertilizer use and plant health, Proceedings of colloquium 12, Atlanta, GA: International potash institute, 1976, pp. 33–46.
- (7) KOVÁČIK, P. 2009. Výživa a systémy hnojenia rastlín. České Budějovice : Kurent, s. r. o., 2009, 109 s. ISBN 978-80-87111-16-1.
- (8) KOVÁČIK, P. 2014. Princípy a spôsoby výživy rastlín. Nitra : SPU, 2014, 278 s. ISBN 978-80-552-1193-0.
- (9) RICHTER, R. – RYANT. P. – HLUŠEK, J. – FRYŠČÁKOVÁ, E. 2004. Multimediální učební texty z výživy rostlin. [http://web2.mendelu.cz/af\\_221\\_multitext/vyziva\\_rostlin/htm/biogenní\\_prvky/a\\_index\\_biogen.htm](http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/htm/biogenní_prvky/a_index_biogen.htm). 23.november, 2018
- (10) RUFFO, M. – OLSON, R. – DAVEREDE, I. 2016. Maize yield response to zinc source and effectiveness of diagnostic indicators. In Communications in soil science and plant analysis, vol. 47, 2016, no. 2.
- (11) SHIVE, J. W. 1915. A three-salt Nutrient solution for plants. In American Journal of Botany, vol. 2, 1915, no. 4, pp. 157–160. <http://www.jstor.org/stable/2435048>
- (12) VOLLMANNOVÁ, A. – MUSILOVÁ, J. – URMINSKÁ, D. et al. 2018. Chémia potravín. Nitra : SPU, 2018, 543 s. ISBN 978-80-552-1814-4.
- (13) WALLACE, T. 1961. The diagnosis of mineral deficiencies in plants by visual symptoms. 3<sup>rd</sup> ed., London : Her Majesty's Stationery Office, 1961, 124 p.

prof. Ing. Peter Kováčik, CSc.  
Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre  
Fakulta agrobiológie a potravinových zdrojov  
Katedra agrochémie a výživy rastlín  
Tr. Andreja Hlinku 2, 949 01 Nitra  
e-mail: [peter.kovacik@uniag.sk](mailto:peter.kovacik@uniag.sk)

## Pôdna organická hmota a pôdna štruktúra hnedozeme ovplyvnená pridaním biohľia a biohľia s N hnojivom

## Soil organic matter and soil structure of Haplic Luvisol affected of biochar and biochar with N fertilizer

Martin Juriga, Vladimír Šimanský

The study was conducted on experimental site of SUA in Nitra (Dolná Malanta) on a silty loam Haplic Luvisol as a part of biochar experiment, during the vegetation season of corn in 2017. The aims of study were (1.) to quantify the extent to which individual rates of biochar: 0 t.ha<sup>-1</sup>, 10 t.ha<sup>-1</sup> and 20 t.ha<sup>-1</sup> (B0, B10 and B20) and biochar with N fertilizer at the rate of 240 kg.ha<sup>-1</sup> affected soil organic matter (SOM) and soil structure parameters, (2.) to evaluate the dynamic changes of SOM and soil structure parameters to relate on application rates of biochar and biochar in combination with N, and (3.) to determine the interrelationships between SOM and soil structure parameters. The results

showed that the application rate 20 t.ha<sup>-1</sup> of pure biochar (B20) had the strongest effects on evaluated parameters SOM and soil structure. In comparison to the control (B0), the biochar dose of 20 t.ha<sup>-1</sup> statistical significantly increased the soil organic carbon content (C<sub>org</sub>) by 29%. There was the extractability of humic substances carbon (CHS), humic acids carbon (C<sub>HA</sub>) and fulvic acids carbon (C<sub>FA</sub>) decreased by 18%, 16% and 20%, respectively than B0 treatment, at B20 treatment. At the same time, the higher rate of pure biochar significantly increased content of the water-stable macro-aggregates (WSA<sub>ma</sub>), the mean weight diameter of water-stable aggregates (MWD<sub>w</sub>) and the index of water-stable aggregates (S<sub>w</sub>) by 10%, 37% and 11%, respectively, compared to the B0. In B20, during the vegetation season of corn, we also observed statistical significantly dynamic changes in follows parameters: C<sub>HA</sub>, labile carbon (C<sub>L</sub>), C<sub>FA</sub>, C<sub>HA</sub> : C<sub>FA</sub> and colour quotient of humic acids (Q<sub>HA</sub>). In addition, significant changes in dynamics of soil structure parameters were observed at B20 treatment. These dynamics are the best expressed the quadratic polynomial model. Content of C<sub>L</sub> positively correlated with WSA<sub>ma</sub> (r = 0.384, P ≤ 0.05), MWD<sub>w</sub> (r = 0.427, P ≤ 0.05) and S<sub>w</sub> (r = 0.393, P ≤ 0.05). At the same time, C<sub>L</sub> negatively correlated with WSA<sub>mi</sub> (r = -0.384, P ≤ 0.05) and K<sub>v</sub> (r = -0.466, P ≤ 0.01). Higher content of C<sub>HA</sub> resulted in higher MWD<sub>d</sub> and K<sub>v</sub> values. Between Q<sub>HA</sub> and MWD<sub>d</sub> (r = -0.576, P ≤ 0.001) and K<sub>v</sub> (r = -0.559, P ≤ 0.01) negative correlations were confirmed.

**biochar, nitrogen fertilization, organic carbon, aggregation**

Pôdna organická hmota (POH) je kľúčovou súčasťou každého ekosystému. POH zahŕňa rastlinné a živočíšne zvyšky v rôznych štádiách rozkladu, od čerstvých nerozložených materiálov až po humus (22). Humus predstavuje amorfnú, koloidnú organickú hmotu, ktorej rozklad je veľmi pomalý. Skladá sa zo stabilných prírodných organických komplexov tvorených produktmi biologického rozkladu a resyntézy (18). POH zohráva v pôde mnoho významných úloh, napr. slúži ako rezervoár živín a vody, podieľa sa na tvorbe a stabilite pôdnych agregátov, na iónovej výmene či sekvestracii C a plní i mnoho iných významných funkcií v pôde.

Pôdna štruktúra predstavuje priestorové usporiadanie jednotlivých častíc, agregátov a pórov medzi nimi. Zohráva významnú úlohu v mnohých procesoch. Pôdna štruktúra sa primárne týka procesu agregácie, pri ktorom dochádza k tvorbe pôdnych agregátov. Najskôr sa medzi sebou viažu minerálne a organické častice. Potom sa vzniknuté agregáty spájajú s časticami piesku a prachu, ako aj s organickými zvyškami a tvoria tak väčšie agregáty rôznych veľkostí (23). Pôdny organický uhlík a jeho frakcie sú základnými elementmi agregáčného procesu. Pôdny agregát je základná stavebná jednotka pôdnej štruktúry, ktorá zohráva kľúčovú úlohu pri zachovávaní úrodnosti pôdy. Množstvo, ale i kvalita organickej hmoty v pôde zohráva podstatnú úlohu pri tvorbe a stabilizácii pôdnych agregátov (22). Na druhej strane, pôdne agregáty stabilizujú C prostredníctvom zabezpečenia fyzických bariér voči mikroorganizmom a tým podporujú zadržiavanie C v pôde (23).

V poslednom období narastá záujem o pridávanie biouhlia do pôdy (31). Biouhlie predstavuje pevnú hmotu vyrobenú z rôzneho organického materiálu v procese zvanom pyrolýza, pri teplote vyššej ako 350 °C, v prostredí bez alebo s obmedzeným prístupom kyslíka. Používanie biouhlia, ako pôdneho aditíva, sa javí ako vhodná alternatíva pre dlhodobú sekvestraciu C v pôde. Odhadovaná dĺžka trvania účinku biouhlia na ukladanie C je niekoľko stoviek až tisícok rokov (9). Vďaka veľkej ploche merného povrchu a pórovitosti môžu mať častice biouhlia vysokú sorpčnú schopnosť, čím podporujú tvorbu kationových mostíkov, prostredníctvom ktorých sa spájajú minerálne i organické častice s časticami biouhlia (31). Okrem toho biouhlie môže podporiť rozvoj a aktivitu pôdnych mikroorganizmov (12), ktoré vylučujú extrakty s cementačným účinkom (2). Účinky biouhlia sú závislé najmä od jeho vlastností, ktoré sú ovplyvnené predovšetkým typom vstupnej suroviny, teplotou pyrolýzy či dĺžkou trvania tohto procesu (20).

Na základe množstva rôznych štúdií z tejto oblasti predpokladáme, že aplikácia biouhlia by mohla priaznivo pôsobiť na hodnotené parametre pôdnej organickej hmoty a pôdnej štruktúry. Preto aj cieľom tejto štúdie bolo:

1. sledovať účinky biouhlia a biouhlia s N na parametre pôdnej organickej hmoty a pôdnej štruktúry,
2. posúdiť dynamiku zmien hodnotených parametrov počas vegetačného obdobia kukurice siatej,
3. určiť vzájomné vzťahy medzi parametrami pôdnej organickej hmoty a pôdnej štruktúry.

## Materiál a metodika

Štúdia sa uskutočnila na experimentálnej báze SPU Nitra na lokalite Dolná Malanta (48° 10' 00" S, 18° 09' 00" W) počas vegetačného obdobia kukurice siatej (2017). Územie leží približne 5 km od mesta Nitra. Z geografického

hľadiska sa oblasť rozprestiera na rozhraní sprašových sedimentov pohoria Tribeč a Žitavskej pahorkatiny, v nadmorskej výške 170 m n. m. Pôdny typ je klasifikovaný ako hnedozem kultizemná. Pôda je stredne ťažká, hlinitá až piesočnato-hlinitá. Územie je zaradené do suchého a teplého agro-klimatického pásma, s priemernou ročnou teplotou vzduchu 10,2 °C a priemerným ročným úhrnom atmosférických zrážok 540 mm.

Experiment bol založený na jar v roku 2014. Za obdobie rokov 2014 – 2017 sa na ploche vystriedali tieto plodiny: jarný jačmeň, kukurica siata (na zrno), pšenica jarná a opäť kukurica siata (na zrno). Aplikácia biouhlia bola realizovaná na začiatku experimentu v dvoch dávkach, a to 10 t.ha<sup>-1</sup> a 20 t.ha<sup>-1</sup>. Biouhlie bolo vyrobené z obilných pliev a odpadového kalu, vytvoreného pri výrobe papiera v pomere 1 : 1, pri teplote pyrolýzy 500 °C. Jeho vlastnosti a základné zloženie sú uvedené v tabuľke 1. Ako dusíkaté hnojivo sa používal LAD 27, ktorý sa každoročne aplikoval v dvoch dávkach. Jeho dávky záviseli od požiadaviek konkrétnej plodiny pestovanej v danom roku. V roku 2017 boli použité dávky 160 kg.ha<sup>-1</sup> a 240 kg.ha<sup>-1</sup> N. Táto štúdia však bola zameraná na účinok vyššej dávky N. Prehľad testovaných variantov je uvedený v tabuľke 2.

Tabuľka 1: Základné vlastnosti biouhlia

Table 1: The basic properties of biochar

Ca	57 g.kg <sup>-1</sup>
Mg	3,9 g.kg <sup>-1</sup>
K	15 g.kg <sup>-1</sup>
N	0,7 g.kg <sup>-1</sup>
Celkový C (1)	53,1 %
Celkový N (2)	1,4 %
Popol (3)	38,3 %
pH	8,8
Veľkosť biouhlia (4)	1 – 5 mm
Merný povrch (5)	21,7 m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup>

(1) content of total carbon, (2) content of total nitrogen, (3) ash, (4) particles size, (5) surface area

Tabuľka 2: Prehľad hodnotených variantov

Table 2: Overview of the evaluated treatments

Variant (1)	Popis variantu (2)
B0 (3)	kontrola
B10 (4)	biouhlie v dávke 10 t.ha <sup>-1</sup>
B20 (5)	biouhlie v dávke 20 t.ha <sup>-1</sup>
B10 + N (6)	biouhlie v dávke 10 t.ha <sup>-1</sup> + N hnojivo
B20 + N (7)	biouhlie v dávke 20 t.ha <sup>-1</sup> + N hnojivo

(1) treatment, (2) description of treatments, (3) control, (4) 10 t.ha<sup>-1</sup> of biochar, (5) 20 t.ha<sup>-1</sup> of biochar, (6) 10 t.ha<sup>-1</sup> of biochar and nitrogen, (7) 20 t.ha<sup>-1</sup> of biochar and nitrogen

Vzorky pôdy boli zo všetkých variantov odoberané v pravidelných mesačných intervaloch počas vegetačného obdobia kukurice siatej v roku 2017. Každý odber bol realizovaný z hĺbky 0 – 0,25 m. Zo vzoriek pôdy boli odstránené väčšie organické zvyšky. Následne boli vzorky vysušené pri laboratórnej teplote. Napokon boli hodnotené tieto parametre pôdnej organickej hmoty a pôdnej štruktúry:

- o obsah celkového organického uhlíka (C<sub>org</sub>) (27),
- o obsah labilného uhlíka (C<sub>L</sub>) (15),
- o skupinové zloženie humusových látok (11),

- o farebný kvocient humusových látok ( $Q_{HL}$ ) a farebný kvocient huminových kyselín ( $Q_{HK}$ ),
- o stupeň humifikácie (SH),
- o frakcie vodoodolných agregátov: WSA (frakcie: >5 mm; 5 – 3 mm; 3 – 2 mm; 2 – 1 mm; 1 – 0,5 mm; 0,5 – 0,25 mm a <0,25 mm) (8),
- o stredný vážený priemer agregátov získaný preosievaním za sucha ( $MWD_d$ ),
- o stredný vážený priemer vodoodolných agregátov získaný preosievaním za mokra ( $MWD_w$ ),
- o koeficient zraniteľnosti ( $K_v$ ) (28),
- o index stability vodoodolných makro-agregátov vypočítaný, na základe zrnitostného zloženia a percentuálneho zastúpenia vodoodolných makro-agregátov (33).

Jednotlivé parametre organickej hmoty a pôdnej štruktúry sme hodnotili pomocou jednofaktorovej analýzy rozptylu. Priemerné hodnoty medzi variantmi boli testované pomocou LSD testu s hladinou významnosti  $\alpha = 0,05$ . Dynamiku zmien parametrov POH a pôdnej štruktúry sme hodnotili prostredníctvom regresnej analýzy. Na určenie závislosti medzi parametrami pôdnej štruktúry a pôdnej organickej hmoty sme použili jednoduchú korelačnú maticu.

## Výsledky a diskusia

### Účinok biouhlia a biouhlia s N na parametre POH a pôdnej štruktúry

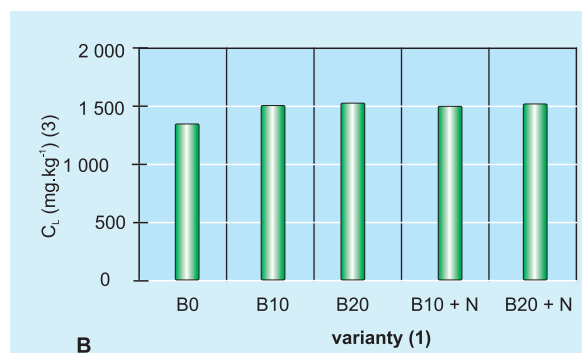
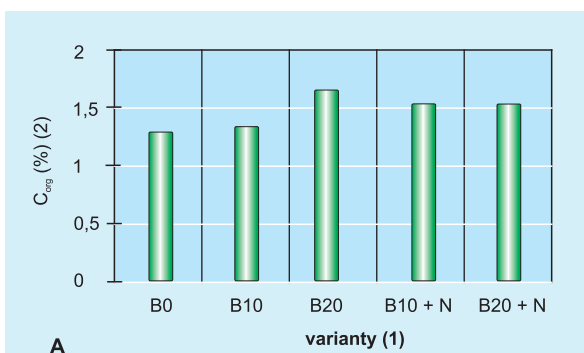
Celkový organický uhlík ( $C_{org}$ ), reprezentuje pomerne stabilnú frakciu organickej hmoty a preto zmeny v jeho obsahu najmä v krátkom časovom úseku prostredníctvom bežných agronomických postupov nie sú detekované (30). Biouhlie je bohaté najmä na stabilnú frakciu C, a to vďaka jeho aromatickej povahe (21). Podľa Hamer et al. (7) majú pôdy obohatené biouhlím väčšinou vyšší obsah C, ako pôdy bez jeho aplikácie. Naše výsledky ukázali, že aplikácia samotného biouhlia štatisticky významne zvýšila obsah  $C_{org}$  a to pri vyššej dávke biouhlia (B20) o 22 % oproti kontrole (B0). Keď bolo biouhlie aplikované spolu s N hnojivom, rovnaký nárast  $C_{org}$  bol dosiahnutý pri oboch dávkach biouhlia, a to o 17 %, v porovnaní s kontrolou (obr. 1A). Guo et al. (6) tiež poukázali na pozitívny účinok N hnojiva na nárast obsahu  $C_{org}$  v pôde, keďže N hnojenie stimulovalo mikrobiálnu aktivitu a tiež vyššiu produkciu koreňových zvyškov. Labilný uhlík ( $C_L$ ) je považovaný za

frakciu s vysokou aktivitou a ľahko podlieha pôsobeniu rastlín a mikroorganizmov, pre ktoré je cenným zdrojom energie. Je teda náchylný na oxidáciu, rozklad a jeho obsah sa preto nepočíta k dlhodobým zásobám C v pôde (21). Významný nárast obsahu  $C_L$  v pôdach po pridaní biouhlia bol pozorovaný v mnohých štúdiách (napr. 29, 34). Tieto výsledky však boli získané v krátkom časovom intervale po pridaní biouhlia a neskôr došlo k poklesu  $C_L$ . Pri hodnotení  $C_L$  sme nepozorovali žiadne významné zmeny vplyvom aplikácie biouhlia ani biouhlia s N (obr. 1B), čo môže byť spôsobené tým, že tieto výsledky sme získali až vo štvrtom roku, po tom ako bolo biouhlie aplikované do pôdy. To vysvetľuje zistenie Shackley et al. (21), že pomerne malý obsah  $C_L$  prítomný v biouhli podlieha mineralizácii v pomerne krátkom čase po aplikácii biouhlia.

Humus je pomerne stabilná a odolná zložka POH. Humifikácia je všeobecne definovaná, ako proces transformácie ľahko rozložiteľnej organickej hmoty na plne stabilizované humusové látky. Chemická povaha biouhlia je charakterizovaná vysokým stupňom polymerizácie humusových látok (HL). HL predstavujú dôležité frakcie POH. Zvyčajne sa delia na humínové kyseliny (HK), fulvokyseliny (FK) a humín (HU), v závislosti od ich rozpustnosti v roztokoch s rôznym pH (29). Podľa Song et al. (24) môže byť obsah HL v pôde najviac ovplyvnený druhom aplikovaného hnojiva. Okrem toho poukázal na zmenu molekulárnej štruktúry HL vplyvom dlhodobého hnojenia. Z našich výsledkov je zrejmé, že aplikácia 20 t.ha<sup>-1</sup> samotného biouhlia významne znížila extrahovateľnosť uhlíka huminových kyselín ( $C_{HK}$ ) a uhlíka fulvokyselín ( $C_{FK}$ ) o 16 % a o 20 % (obr. 2A, 2B). Biouhlie môže pôsobiť rôzne na extrahovateľnosť uhlíka humusových látok ( $C_{HL}$ ). Jeho aplikácia má stimulačný účinok na aktivitu pôdných mikroorganizmov (12) a  $C_{HL}$  môže byť degradovaný pôdnymi baktériami (14). Napríklad, Zhao et al. (34) poukázali na teplotu pyrolýzy, ako na významný faktor pôsobiaci na výsledný účinok biouhlia na obsah  $C_{HL}$  v pôde. Podľa týchto autorov (34), vyššia teplota pyrolýzy vedie k nižšej extrahovateľnosti  $C_{HK}$ . Biouhlie vyrobené pri nižšej teplote obsahuje vyšší podiel alifatických frakcií C, ktoré sa môžu podieľať na tvorbe HK a FK pri svojom rozklade. Na druhej strane, biouhlie vyrobené pri vyšších teplotách sa vyznačuje vyšším obsahom aromatického C (21), ktorý by mohol zvýšiť kondenzáciu alebo polymerizáciu HK vodíkovou väzbou, čo by viedlo

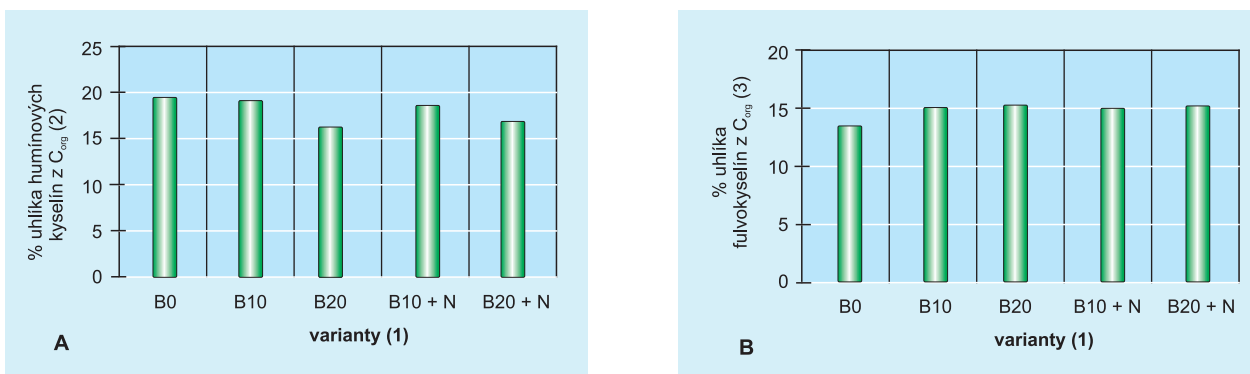
Obrázok 1: Obsah A) celkového organického uhlíka, B) labilného uhlíka

Figure 1: The content of A) total organic carbon, B) labile carbon



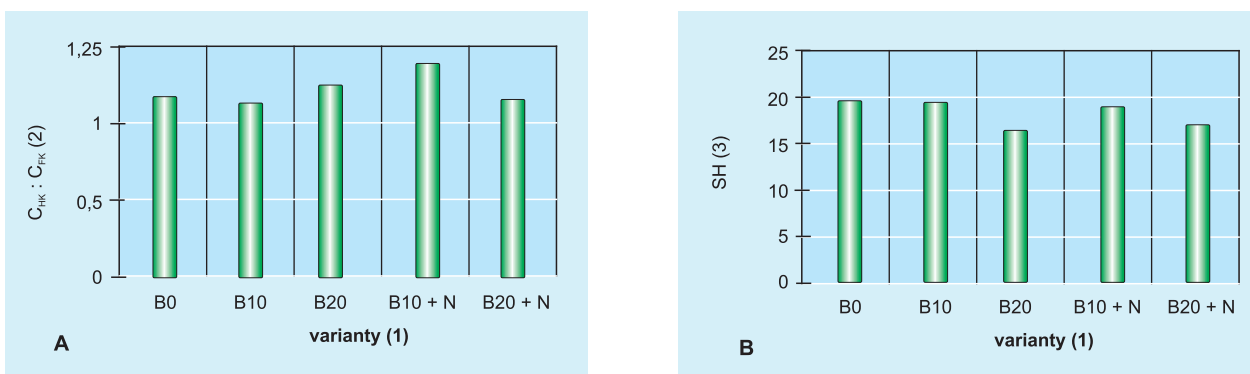
(1) treatments, (2) soil organic carbon content, (3) labile carbon content

**Obrázok 2:** Extrahovateľnosť A) uhlíka humínových kyselín, B) uhlíka fulvokyselín  
**Figure 2:** Extractability of A) humic acids carbon, B) fulvic acids carbon



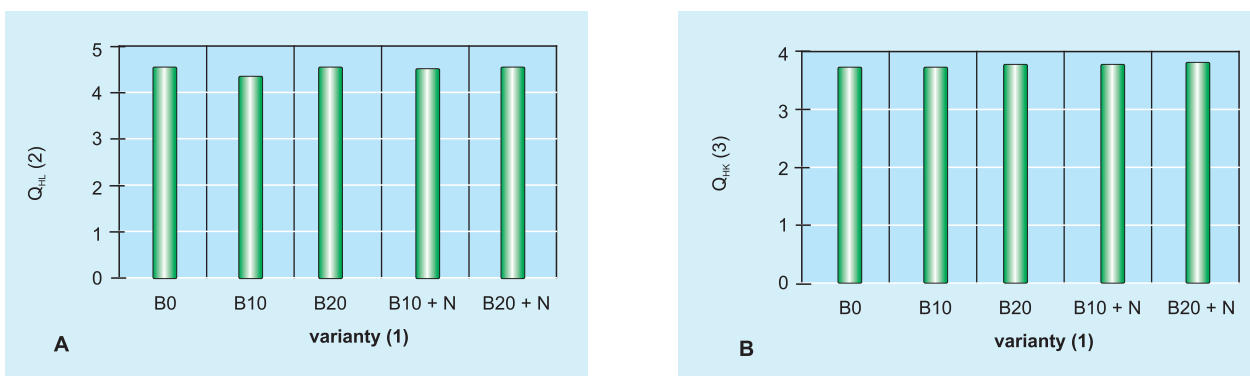
(1) treatments, (2) percentage content of humic acids carbon from soil organic carbon, (3) percentage content of fulvic acids carbon from soil organic carbon

**Obrázok 3:** Kvalitatívne parametre humusu A) pomer uhlíka humínových kyselín k uhlíku fulvokyselín, B) stupeň humifikácie  
**Figure 3:** Qualitative humus parameters A) humic acids carbon to fulvic acids carbon ratio, B) degree of humification



(1) treatments, (2) humic acids carbon to fulvic acids carbon ratio, (3) degree of humification

**Obrázok 4:** Farebný kvocient A) humusových látok, B) humínových kyselín  
**Figure 4:** Colour quotient of A) humic substances, B) humic acids

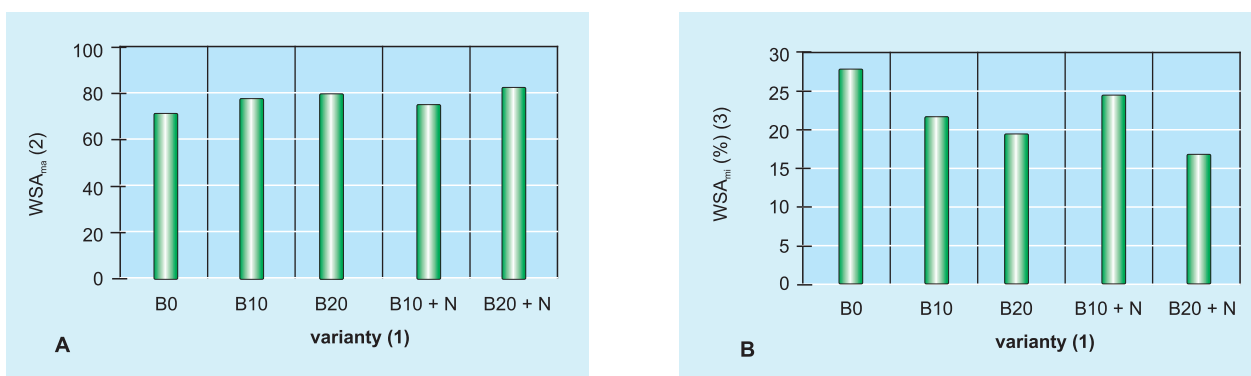


(1) treatments, (2) colour quotient of humic substances, (3) colour quotient of humic acids

k poklesu  $C_{HK}$  (34). Madari et al. (16) pozorovali zvýšenie obsahu frakcie  $C_{HL}$  vplyvom pôsobenia biouhľia, už v prvom roku po jeho aplikácii. Podľa nich by tento účinok biouhľia mohol byť spôsobený vysokým obsahom extrahovateľného C v pridanom biouhľí. Periférne štruktúry

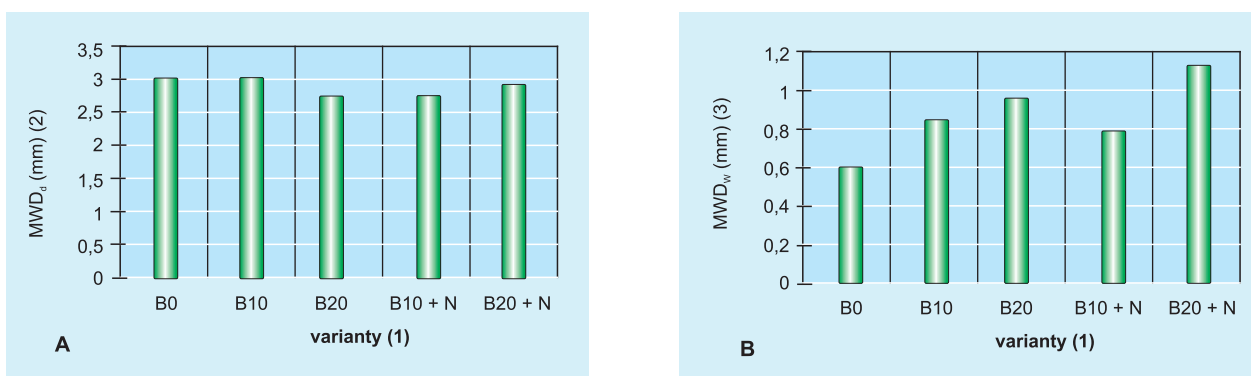
v kondenzovanom aromatickom jadre podliehajú časom pomalej oxidácii (21). Hnojenie N hnojivom môže často viesť k poklesu pH, čím by sa tiež mohla znížiť extrahovateľnosť  $C_{HL}$  (16). Kombinovaná aplikácia oboch dávok biouhľia s N tiež štatisticky významne znížila extrahova-

**Obrázok 5:** Obsah vodoodolných A) makroagregátov, a B) mikroagregátov  
**Figure 5:** Content of water-stable A) macroaggregates, B) microaggregates



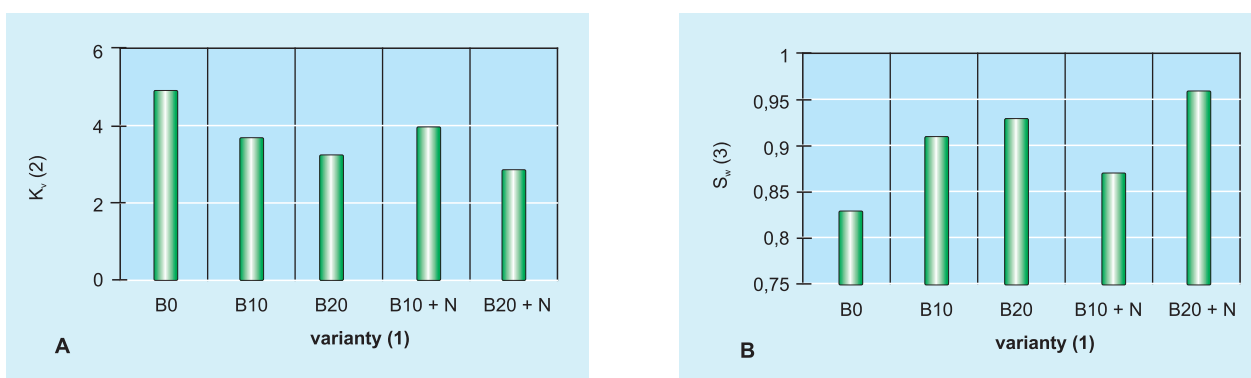
(1) treatments, (2) content of water-stable macroaggregates, (3) content of water-stable microaggregates

**Obrázok 6:** Stredný vážený priemer agregátov získaný preosievaním za A) sucha, B) za mokra  
**Figure 6:** Mean weight diameter of A) aggregates for dry sieving, B) water-stable aggregates



(1) treatments, (2) mean weight diameter of aggregates for dry sieving, (3) mean weight diameter of water-stable aggregates

**Obrázok 7:** Parametre pôdnej štruktúry A) koeficient zraniteľnosti, B) index stability vodoodolných makroagregátov  
**Figure 7:** Soil structure parameters A) vulnerability coefficient, B) stability index of water-stable macroaggregates



(1) treatments, (2) vulnerability coefficient, (3) stability index of water-stable macroaggregates

teľnosť  $C_{HK}$  o 7 % (B10 + N) a o 13 % (B20 + N) a kombinácia 20 t.ha<sup>-1</sup> biouhľia s N aj extrahovateľnosť  $C_{FK}$  o 9 % (B20 + N). Znížená extrahovateľnosť  $C_{HK}$  sa zároveň odzrkadľila na kvalite (obr. 3A) a stabilite humusu (obr. 4A, 4B), ale i na znížení stupňa humifikácie (obr. 3B). Jeho hodnota (SH) sa vo variantoch s 20 t.ha<sup>-1</sup> biouhľia znížila o 16 % (B20) a o 13 % (B20+N), oproti kontrole (B0). Tieto výsledky môžu mať súvislosť so sorpčnou schopnosťou aplikovaných častíc biouhľia, ktoré znižujú prístupnosť C pre enzymatickú aktivitu vedúcu k procesu humifikácie (13).

Pri väčšine hodnotených parametrov pôdnej štruktúry sa prejavil pozitívny účinok aplikácie biouhľia a biouhľia s N (obr. 7). Iba stredný vážený priemer agregátov získaný preosieváním za sucha ( $MWD_d$ ) nebol aplikáciou významne ovplyvnený. Podľa Sui et al. (25) sú obsah vodoodolných makro-agregátov ( $WSA_{ma}$ ) a stredný vážený priemer agregátov získaný preosieváním za mokra ( $MWD_w$ ) vhodnými ukazovateľmi pre hodnotenie zmien v dôsledku rozdielného hospodárenia na pôde. Pôdy, ktoré majú vyššie hodnoty  $WSA_{ma}$  a  $MWD_w$  sú zvyčajne bohatšie na obsah organického C. Tieto pôdy by preto mali byť odolnejšie voči degradácii a erózii. Zvýšenie stability pôdnych agregátov v pôde obohatenej o biouhlie bolo potvrdené vo viacerých štúdiách (26, 20). V našom prípade, prídanie 20 t.ha<sup>-1</sup> samotného biouhľia štatisticky významne zvýšilo hodnoty  $WSA_{ma}$  o 10 %,  $MWD_w$  o 37 % a indexu stability vodoodolných makro-agregátov ( $S_w$ ) o 11 %, v porovnaní s kontrolou. Zvýšený podiel makro-agregátov sa prirodzene prejavil na poklese podielu mikro-agregátov. Vo variante B20 sme teda zistili aj významne nižšiu hodnotu  $WSA_{mi}$  ako na variante B0, a to o 30 %. Menšie zastúpenie mikro-agregátov sa zároveň prejavilo na znížení koeficientu zraniteľnosti ( $K_v$ ), ktorý podľa Valla et al. (33) vyjadruje mieru, akou dochádza k znížovaniu veľkostí agregátov. Jeho hodnota bola vo variante B20 nižšia o 34 %, v porovnaní s B0. Aplikácia 20 t.ha<sup>-1</sup> biouhľia v kombinácii s N tiež priaznivo pôsobila na hodnotené parametre pôdnej štruktúry. Vo variante B20 + N boli dosiahnuté vyššie hodnoty:  $WSA_{ma}$ ,  $MWD_w$  a  $S_w$ , a to o 13 %, 46 % a 14 % a nižšie hodnoty:

$WSA_{mi}$  a  $K_v$ , o 40 % a 42 %, ako vo variante B0. Fonte et al. (3), ale i Jiang et al. (10) dokázali negatívny účinok samotného N hnojiva na parametre pôdnej štruktúry, ale zároveň pozitívny účinok aplikácie N hnojiva s kompostom či inými organickými hnojivami. Prídanie C v komposte malo preukázateľný účinok na elimináciu negatívneho dopadu N hnojenia (3). Biouhlie predstavuje bohatý zdroj C a ak je kombinovaný s N, môže mať pozitívny efekt na hodnotené parametre ako to potvrdili naše zistenia.

### Dynamika zmien parametrov POH a pôdnej štruktúry za sledované obdobie

Priebeh dynamiky zmien hodnotených parametrov POH a humusu, v priebehu vegetačného obdobia kukurice sietej (2017) je zobrazený na obrázku 8A až 8H. V dynamike zmien  $C_{org}$  sme počas sledovaného obdobia nepozorovali žiadny štatisticky významný (lineárny, polynomický, exponenciálny, logaritmický) trend (tab. 3). To je pravdepodobne spôsobené tým, že organické materiály, ako je biouhlie sú pomerne stabilné zdroje C v pôde a preto bývajú mineralizované a humifikované pomaly (21). Stabilitu biouhľia potvrdili tiež Barriga et al. (1), ktorí uviedli, že obsah  $C_{org}$  zostal stabilný počas celého sledovaného obdobia. Na druhej strane, výrazné zmeny sú zvyčajne pozorované v prípade  $C_L$ .  $C_L$  je často používaný ako citlivý ukazovateľ krátkodobých zmien v pôde (21). Štatisticky významné trendy narastania obsahu  $C_L$  sme na základe hodnôt koeficientu determinácie ( $R^2$ ) zistili v prípade kontroly (B0) a variantov so samotným biouhľím (B10 a B20) (tab. 3). Najvyšší nárast  $C_L$  bol zaznamenaný vo variante B0 ( $R^2 = 0,81$ ), zatiaľ čo so zvyšujúcou sa dávkou biouhľia nadobudla intenzita rastu klesajúcu tendenciu: B10 ( $R^2 = 0,77$ ), B20 ( $R^2 = 0,73$ ). Významným zdrojom  $C_L$  vo všetkých variantoch mohli byť organické zvyšky pestovaných plodín, ktoré sú podľa Yan et al. (32) vysoko účinné pri zvyšovaní obsahu  $C_L$  v pôde.  $C_L$  môže byť v pôde absorbovaný časticami biouhľia (13), čo mohlo obmedziť mieru jeho narastania na variantoch s biouhľím. Najlepšie dynamiku zmien  $C_L$  popisoval podľa  $R^2$  polynomický model. V B20 okrem polynomickeho trendu dobre dynamiku zmien popisovali

**Tabuľka 3:** Trendy hodnotených parametrov pôdnej organickej hmoty v priebehu vegetačného obdobia 2017 na jednotlivých variantoch.

**Table 3:** Trends of evaluated soil organic matter parameters at individual treatments during vegetation season in 2017.

Variant (1)	Lineárny (2)		Polynomický (3)		Exponenciálny (4)		Logaritmický (5)	
	rovnica (6)	$R^2$ (7)	rovnica	$R^2$	rovnica	$R^2$	rovnica	$R^2$
$C_{org}$ (8)								
B0	$y = -0,01x + 1,32$	0,05	$y = 0,01x^2 - 0,10x + 1,44$	0,15	$y = 1,31e^{-0,009x}$	0,04	$y = -0,06\ln(x) + 1,34$	0,13
B10	$y = -0,02x + 1,40$	0,24	$y = 0,01x^2 - 0,10x + 1,51$	0,45	$y = 1,40e^{-0,014x}$	0,23	$y = -0,07\ln(x) + 1,41$	0,37
B20	$y = 0,04x + 1,53$	0,19	$y = -0,03x^2 + 0,22x + 1,28$	0,42	$y = 1,53e^{0,0213x}$	0,20	$y = 0,11\ln(x) + 1,53$	0,24
B10 + N	$y = 0,01x + 1,39$	0,03	$y = 0,01x^2 - 0,08x + 1,50$	0,09	$y = 1,38e^{0,0085x}$	0,03	$y = 0,01\ln(x) + 1,42$	0,00
B20 + N	$y = -0,03x + 1,74$	0,23	$y = 0,02x^2 - 0,16x + 1,91$	0,37	$y = 1,74e^{-0,019x}$	0,22	$y = -0,12\ln(x) + 1,75$	0,36
$C_L$ (9)								
B0	$y = -3,72x + 1\ 384$	0,00	$y = 60,68x^2 - 429x + 1\ 950$	0,81	$y = 1\ 363e^{-5E-04x}$	5E-01	$y = -76,75\ln(x) + 1\ 455$	0,08
B10	$y = 45,71x + 1\ 354$	0,58	$y = 17,93x^2 - 79,8x + 1\ 521$	0,77	$y = 1\ 362e^{0,0296x}$	0,56	$y = 105,61\ln(x) + 1\ 398$	0,39
B20	$y = 102,6x + 1\ 177$	0,73	$y = 4,58x^2 + 70,51x + 1\ 220$	0,73	$y = 1\ 207e^{0,0664x}$	0,75	$y = 277,5\ln(x) + 1\ 232$	0,67
B10 + N	$y = 18,22x + 1\ 392$	0,04	$y = 49,08x^2 - 325x + 1\ 850$	0,60	$y = 1\ 394e^{0,0103x}$	0,02	$y = 7,47\ln(x) + 1\ 447$	0,00
B20 + N	$y = 17,51x + 1\ 437$	0,09	$y = 29,63x^2 - 190x + 1\ 713$	0,65	$y = 1\ 439e^{0,0108x}$	0,07	$y = 22,39\ln(x) + 1\ 474$	0,02

$C_{org}$  – celkový organický uhlík,  $C_L$  – labilný uhlík

(1) treatment, (2) linear, (3) polynomial, (4) exponential, (5) logarithmic, (6) equation, (7) coefficient of determination, (8) total organic carbon, (9) labile carbon

**Tabuľka 4:** Trendy hodnotených kvantitatívnych a kvalitatívnych parametrov humusu v priebehu vegetačného obdobia 2017 na jednotlivých variantoch

**Table 4:** Trends of evaluated quantitative and qualitative humus parameters at individual treatments during vegetation season in 2017

Variant (1)	Lineárny (2)		Polynomický (3)		Exponenciálny (4)		Logaritmický (5)	
	rovnica (6)	R <sup>2</sup> (7)	rovnica	R <sup>2</sup>	rovnica	R <sup>2</sup>	rovnica	R <sup>2</sup>
<b>C<sub>HL</sub> (8)</b>								
B0	$y = 0,10x + 35,96$	0,01	$y = -0,18x^2 + 1,35x + 34,29$	0,07	$y = 35,83e^{0,0035x}$	0,01	$y = 0,60\ln(x) + 35,66$	0,04
B10	$y = 0,46x + 35,18$	0,05	$y = -0,62x^2 + 4,83x + 29,36$	0,25	$y = 35,02e^{0,013x}$	0,06	$y = 1,88\ln(x) + 34,74$	0,11
B20	$y = -0,73x + 32,36$	0,25	$y = 0,38x^2 - 3,38x + 35,90$	0,39	$y = 32,37e^{-0,025x}$	0,25	$y = -2,14\ln(x) + 32,16$	0,27
B10 + N	$y = -0,33x + 36,32$	0,03	$y = -0,70x^2 + 4,58x + 29,77$	0,36	$y = 36,22e^{-0,01x}$	0,04	$y = -0,06\ln(x) + 35,22$	0,00
B20 + N	$y = 0,42x + 29,52$	0,14	$y = -0,71x^2 + 5,37x + 22,91$	0,98	$y = 29,43e^{0,0141x}$	0,14	$y = 1,82\ln(x) + 28,98$	0,33
<b>C<sub>HK</sub> (9)</b>								
B0	$y = -0,16x + 20,16$	0,02	$y = -0,27x^2 + 1,74x + 17,61$	0,16	$y = 20,00e^{-0,007x}$	0,02	$y = -0,08\ln(x) + 19,68$	0,00
B10	$y = -0,39x + 20,78$	0,20	$y = -0,32x^2 + 1,85x + 17,79$	0,50	$y = 20,81e^{-0,021x}$	0,22	$y = -0,73\ln(x) + 20,21$	0,09
B20	$y = -1,16x + 20,52$	0,76	$y = -0,12x^2 - 0,34x + 19,42$	0,77	$y = 20,93e^{-0,071x}$	0,77	$y = -2,92\ln(x) + 19,66$	0,60
B10 + N	$y = 0,11x + 18,78$	0,01	$y = -0,59x^2 + 4,26x + 13,25$	0,67	$y = 18,65e^{0,0068x}$	0,02	$y = 0,88\ln(x) + 18,21$	0,09
B20 + N	$y = 0,29x + 15,55$	0,04	$y = -0,74x^2 + 5,48x + 8,63$	0,62	$y = 15,27e^{0,02x}$	0,06	$y = 1,53\ln(x) + 14,87$	0,15
<b>C<sub>FK</sub> (10)</b>								
B0	$y = 0,27x + 15,80$	0,33	$y = 0,09x^2 - 0,38x + 16,66$	0,41	$y = 15,84e^{0,0153x}$	0,31	$y = 0,67\ln(x) + 15,99$	0,26
B10	$y = 0,86x + 14,40$	0,32	$y = -0,31x^2 + 2,99x + 11,55$	0,40	$y = 14,41e^{0,0508x}$	0,36	$y = 2,62\ln(x) + 14,53$	0,37
B20	$y = 0,43x + 11,90$	0,19	$y = 0,48x^2 - 2,96x + 16,41$	0,70	$y = 12,06e^{0,0278x}$	0,16	$y = 0,79\ln(x) + 12,53$	0,08
B10 + N	$y = -0,45x + 17,59$	0,07	$y = -0,12x^2 + 0,42x + 16,43$	0,08	$y = 17,38e^{-0,028x}$	0,07	$y = -0,94\ln(x) + 17,04$	0,04
B20 + N	$y = 0,13x + 13,96$	0,02	$y = 0,03x^2 - 0,11x + 14,28$	0,02	$y = 13,83e^{0,0098x}$	0,02	$y = 0,30\ln(x) + 14,10$	0,01
<b>C<sub>HK</sub> : C<sub>FK</sub> (11)</b>								
B0	$y = -0,03x + 1,26$	0,11	$y = -0,02x^2 + 0,12x + 1,07$	0,27	$y = 1,26e^{-0,023x}$	0,12	$y = -0,05\ln(x) + 1,23$	0,04
B10	$y = -0,08x + 1,42$	0,82	$y = 0,00x^2 - 0,09 + 1,43$	0,82	$y = 1,45e^{-0,072x}$	0,80	$y = -0,22\ln(x) + 1,38$	0,76
B20	$y = -0,11x + 1,64$	0,70	$y = -0,05x^2 + 0,21x + 1,21$	0,96	$y = 1,73e^{-0,098x}$	0,71	$y = -0,26\ln(x) + 1,53$	0,47
B10 + N	$y = 0,04x + 1,11$	0,05	$y = -0,04x^2 + 0,31x + 0,75$	0,17	$y = 1,08e^{0,0337x}$	0,07	$y = 0,13\ln(x) + 1,10$	0,08
B20 + N	$y = 0,00x + 1,16$	0,00	$y = -0,07x^2 + 0,48x + 0,53$	0,27	$y = 1,11e^{0,0092x}$	0,00	$y = 0,09\ln(x) + 1,09$	0,03
<b>Q<sub>HL</sub> (12)</b>								
B0	$y = 0,08x + 4,27$	0,53	$y = -0,00x^2 + 0,11x + 4,24$	0,53	$y = 4,28e^{0,017x}$	0,52	$y = 0,23\ln(x) + 4,30$	0,56
B10	$y = 0,08x + 4,23$	0,27	$y = -0,01x^2 + 0,15x + 4,13$	0,29	$y = 4,23e^{0,0171x}$	0,28	$y = 0,22\ln(x) + 4,26$	0,28
B20	$y = 0,07x + 4,28$	0,21	$y = 0,06x^2 - 0,32x + 4,80$	0,48	$y = 4,29e^{0,015x}$	0,19	$y = 0,15\ln(x) + 4,37$	0,11
B10 + N	$y = 0,04x + 4,38$	0,05	$y = 0,04x^2 - 0,25 + 4,77$	0,18	$y = 4,37e^{0,0084x}$	0,05	$y = 0,07\ln(x) + 4,43$	0,02
B20 + N	$y = 0,12x + 4,05$	0,60	$y = 0,05x^2 - 0,23x + 4,50$	0,84	$y = 4,07e^{0,0252x}$	0,60	$y = 0,27\ln(x) + 4,15$	0,42
<b>Q<sub>HK</sub> (13)</b>								
B0	$y = 0,08x + 3,43$	0,80	$y = -0,01x^2 + 0,12x + 3,38$	0,80	$y = 3,44e^{0,022x}$	0,79	$y = 0,23\ln(x) + 3,46$	0,83
B10	$y = 0,04x + 3,56$	0,75	$y = 0,02x^2 - 0,07x + 3,71$	0,95	$y = 3,56e^{0,0119x}$	0,75	$y = 0,11\ln(x) + 3,60$	0,52
B20	$y = 0,07x + 3,62$	0,76	$y = 0,01x^2 - 0,02x + 3,70$	0,83	$y = 3,62e^{0,0122x}$	0,77	$y = 0,12\ln(x) + 3,65$	0,63
B10 + N	$y = 0,05x + 3,63$	0,48	$y = 0,03x^2 - 0,16x + 3,91$	0,88	$y = 3,64e^{0,0125x}$	0,48	$y = 0,11\ln(x) + 3,69$	0,29
B20 + N	$y = 0,06x + 3,61$	0,55	$y = 0,03x^2 - 0,17x + 3,91$	0,94	$y = 3,62e^{0,0147x}$	0,55	$y = 0,12\ln(x) + 3,67$	0,32

C<sub>HL</sub> – uhlík humusových látok, C<sub>HK</sub> – uhlík humínových kyselín, C<sub>FK</sub> – uhlík fulvokyselín, C<sub>HK</sub> : C<sub>FK</sub> – pomer uhlíka humínových kyselín k uhlíku fulvokyselín, Q<sub>HL</sub> – farebný kvocient humusových látok, Q<sub>HK</sub> – farebný kvocient humínových kyselín

(1) treatment, (2) linear, (3) polynomial, (4) exponential, (5) logarithmic, (6) equation, (7) coefficient of determination, (8) humic substances carbon, (9) humic acids carbon, (10) fulvic acids carbon, (11) humic acids carbon to fulvic acids carbon ratio, (12) colour quotient of humic substances, (13) colour quotient of humic acids

aj ostatné trendy (lineárny, exponenciálny, logaritmický). Keďže biouhlie pozostáva prevažne zo stabilných štruktúr, obsah labilných štruktúr je nízky. To je spôsobené modifikáciou organických materiálov v procese pyrolýzy. Podľa Shackley et al. (21) vyjadruje stabilitu či labilitu biouhlia aromaticita a stupeň kondenzácie v závislosti od podmienok pyrolýzy (17). Barriga et al. (1) odporúčajú aplikovať biouhlie s čerstvou organickou hmotou, čím by bol do

pôdy dodaný C, prístupný pre labilné frakcie POH a humusové frakcie. Dynamiku zmien extrahovateľnosti C<sub>HL</sub>, C<sub>HK</sub> a C<sub>FK</sub> na základe R<sup>2</sup> štatisticky preukazane najlepšie popisoval polynomický trend (tab. 4). Extrahovateľnosť C<sub>HL</sub> (R<sup>2</sup> = 0,98) klesala významne vo variante B20 + N, C<sub>HK</sub> (R<sup>2</sup> = 0,77) a C<sub>FK</sub> (R<sup>2</sup> = 0,70) vo variante B20. Pokles hodnôt C<sub>HK</sub> v B20 za sledované obdobie dobre vyjadroval aj lineárny, exponenciálny a logaritmický trend. Aplikácia

**Tabuľka 5:** Trendy hodnotených parametrov pôdnej štruktúry v priebehu vegetačného obdobia 2017 na jednotlivých variantoch  
**Table 5:** Trends of evaluated soil structure parameters at individual treatments during vegetation season in 2017

Variant (1)	Lineárny (2)		Polynomický (3)		Exponenciálny (4)		Logaritmický (5)	
	rovnica (6)	$R^2$ (7)	rovnica	$R^2$	rovnica	$R^2$	rovnica	$R^2$
<b>WSA<sub>ma</sub> (8)</b>								
B0	$y = 0,72x + 69,42$	0,09	$y = 0,72x^2 - 4,31x + 76,13$	0,30	$y = 69,4e^{0,0098x}$	0,09	$y = 1,51\ln(x) + 70,28$	0,05
B10	$y = -0,87x + 81,30$	0,05	$y = -0,31x^2 + 1,30x + 78,41$	0,06	$y = 81,20e^{-0,012x}$	0,05	$y = -2,82\ln(x) + 81,34$	0,07
B20	$y = 2,93x + 70,04$	0,75	$y = 0,60x^2 - 1,28x + 75,65$	0,82	$y = 70,60e^{0,0361x}$	0,75	$y = 7,56\ln(x) + 72,01$	0,62
B10 + N	$y = 0,79x + 70,88$	0,08	$y = 0,27x^2 - 1,07x + 73,36$	0,09	$y = 70,53e^{0,0117x}$	0,08	$y = 1,50\ln(x) + 71,99$	0,03
B20 + N	$y = 2,32x + 71,23$	0,16	$y = 1,18x^2 - 5,96x + 82,26$	0,24	$y = 71,21e^{0,0286x}$	0,14	$y = 5,85\ln(x) + 72,93$	0,13
<b>WSA<sub>mi</sub> (9)</b>								
B0	$y = -0,72x + 30,59$	0,09	$y = -0,72x^2 + 4,31x + 23,87$	0,30	$y = 30,59e^{-0,028x}$	0,10	$y = -1,51\ln(x) + 29,72$	0,05
B10	$y = 0,87x + 18,70$	0,05	$y = 0,31x^2 - 1,30x + 21,59$	0,06	$y = 18,22e^{0,0368x}$	0,04	$y = 2,82\ln(x) + 18,66$	0,07
B20	$y = -2,93x + 29,96$	0,75	$y = -0,60x^2 + 1,28x + 24,34$	0,82	$y = 33,69e^{-0,168x}$	0,75	$y = -7,56\ln(x) + 27,99$	0,62
B10 + N	$y = -0,79x + 29,12$	0,08	$y = -0,27x^2 + 1,073x + 26,64$	0,09	$y = 28,27e^{-0,024x}$	0,06	$y = -1,50\ln(x) + 28,01$	0,03
B20 + N	$y = -2,32x + 28,77$	0,16	$y = -1,18x^2 + 5,96x + 17,74$	0,24	$y = 28,93e^{-0,131x}$	0,20	$y = -5,85\ln(x) + 27,07$	0,13
<b>MWD<sub>d</sub> (10)</b>								
B0	$y = -0,419x + 4,51$	0,79	$y = 0,01x^2 - 0,49x + 4,60$	0,79	$y = 4,78e^{-0,139x}$	0,84	$y = -1,12\ln(x) + 4,27$	0,70
B10	$y = -0,26x + 3,94$	0,41	$y = -0,08x^2 + 0,27x + 3,23$	0,49	$y = 4,01e^{-0,087x}$	0,48	$y = -0,604\ln(x) + 3,69$	0,27
B20	$y = -0,35x + 3,99$	0,45	$y = -0,01x^2 - 0,28x + 3,89$	0,45	$y = 4,05e^{-0,121x}$	0,54	$y = -0,868\ln(x) + 3,72$	0,35
B10 + N	$y = -0,12x + 2,86$	0,54	$y = -0,03x^2 + 0,08x + 2,59$	0,60	$y = 2,89e^{-0,05x}$	0,54	$y = -0,279\ln(x) + 2,75$	0,37
B20 + N	$y = -0,15x + 3,26$	0,36	$y = 0,03x^2 - 0,32x + 3,50$	0,38	$y = 3,30e^{-0,057x}$	0,33	$y = -0,409\ln(x) + 3,19$	0,34
<b>MWD<sub>w</sub> (11)</b>								
B0	$y = 0,00x + 0,60$	0,00	$y = 0,02x^2 - 0,16x + 0,81$	0,51	$y = 0,60e^{0,0032x}$	0,00	$y = -0,01\ln(x) + 0,62$	0,00
B10	$y = 0,00x + 0,85$	0,00	$y = -0,02x^2 + 0,12x + 0,70$	0,05	$y = 0,83e^{0,0034x}$	0,00	$y = 0,00\ln(x) + 0,86$	0,00
B20	$y = 0,15x + 0,46$	0,66	$y = 0,02x^2 + 0,04x + 0,60$	0,68	$y = 0,52e^{0,1612x}$	0,65	$y = 0,40\ln(x) + 0,54$	0,61
B10 + N	$y = 0,01x + 0,72$	0,01	$y = 0,05x^2 - 0,34x + 1,19$	0,39	$y = 0,66e^{0,0314x}$	0,03	$y = -0,03\ln(x) + 0,79$	0,01
B20 + N	$y = 0,09x + 0,61$	0,23	$y = 0,05x^2 - 0,25x + 1,07$	0,38	$y = 0,63e^{0,0892x}$	0,16	$y = 0,22\ln(x) + 0,69$	0,17
<b>S<sub>w</sub> (12)</b>								
B0	$y = 0,01x + 0,80$	0,08	$y = 0,01x^2 - 0,056x + 0,89$	0,31	$y = 0,80e^{0,0094x}$	0,08	$y = 0,02\ln(x) + 0,81$	0,04
B10	$y = -0,01x + 0,94$	0,04	$y = -0,00x^2 + 0,01x + 0,91$	0,06	$y = 0,94e^{-0,011x}$	0,05	$y = -0,03\ln(x) + 0,94$	0,06
B20	$y = 0,03x + 0,81$	0,75	$y = 0,01x^2 - 0,01x + 0,88$	0,82	$y = 0,82e^{0,0364x}$	0,75	$y = 0,09\ln(x) + 0,83$	0,62
B10 + N	$y = 0,01x + 0,80$	0,17	$y = 0,00x^2 + 0,00x + 0,81$	0,17	$y = 0,80e^{0,0167x}$	0,17	$y = 0,03\ln(x) + 0,81$	0,11
B20 + N	$y = 0,03x + 0,82$	0,16	$y = 0,01x^2 - 0,07x + 0,96$	0,25	$y = 0,82e^{0,0293x}$	0,14	$y = 0,07\ln(x) + 0,85$	0,13

WSA<sub>ma</sub> – obsah vodoodolných makro-agregátov, WSA<sub>mi</sub> – obsah vodoodolných mikro-agregátov, MWD<sub>d</sub> – stredný vážený priemer agregátov získaný presievaním za sucha, MWD<sub>w</sub> – stredný vážený priemer agregátov získaný preosievaním za mokra, K<sub>v</sub> – koeficient zraniteľnosti, S<sub>w</sub> – index stability vodoodolných makro-agregátov

(1) treatment, (2) linear, (3) polynomial, (4) exponential, (5) logarithmic, (6) equation, (7) coefficient of determination, (8) water-stable macroaggregates, (9) water-stable microaggregates, (10) mean weight diameter of aggregates for dry sieving, (11) mean weight diameter of water-stable aggregates, (12) coefficient of vulnerability, (13) stability index of water-stable macroaggregates

biouhľia prispieva z dlhodobého hľadiska k stabilite humusových látok (21). V našej štúdií sme však zistili zníženie stability humusových kyselín. Tieto zmeny zo všetkých pozorovaných trendov najlepšie vyjadroval polynomický model. Vo variantoch so samotným biouhlím, ako aj biouhlím s N: B10 ( $R^2 = 0,95$ ), B20 ( $R^2 = 0,83$ ), B10 + N ( $R^2 = 0,88$ ), B20 + N ( $R^2 = 0,94$ ) bolo štatisticky preukázané zvyšovanie, no na variante B0 ( $R^2 = 0,80$ ) znižovanie hodnôt Q<sub>HK</sub>, čo potvrdzuje skutočnosť, že biouhlie, ale aj jeho kombinácia s N hnojivom narušuje a celkovo znižuje stabilitu humusu.

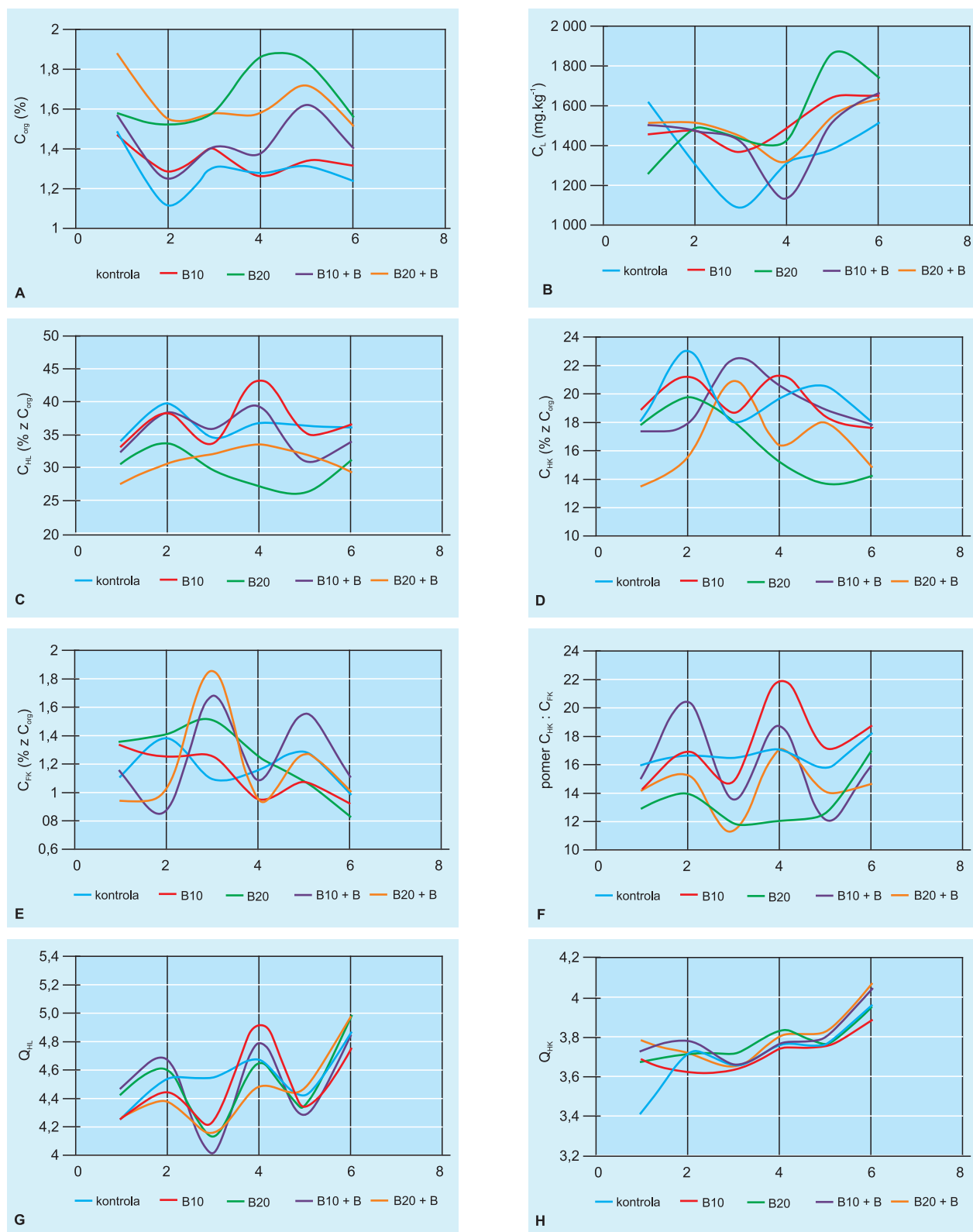
V priebehu vegetácie kukurice sietej sa významne menila dynamika hodnotených parametrov pôdnej štruktúry. Stabilita pôdných agregátov v priebehu roka prechádzala značnými zmenami. Biouhlie môže meniť dynamiku parametrov pôdnej štruktúry viacerými mechanizmami. Po-

stupná oxidácia, a s ňou súvisiace zmeny v počte a zložení funkčných skupín na povrchu aplikovaných častíc biouhľia, môže byť zodpovedná za zlepšenie stability pôdných agregátov (4). Biouhlie môže ďalej prispieť k zlepšeniu pôdnej štruktúry podporou pôdných mikroorganizmov (2, 12), ktorých aktivita by sa mohla zvýšiť kombinovanou aplikáciou biouhľia spolu s čerstvou organickou hmotou bohatou na labilné frakcie C (1). Naše výsledky zmien dynamiky však poukázali iba na štatisticky významné zmeny v parametroch ako: WSA<sub>ma</sub>, WSA<sub>mi</sub>, MWD<sub>w</sub> a S<sub>w</sub>, a aj to iba vo variante B20. Len v prípade MWD<sub>d</sub> boli pozorované významné zmeny vo variante B0. Vplyvom vyššej dávky biouhľia dochádzalo v priebehu sledovaného obdobia k zvyšovaniu podielu a stability makroagregátov a znižovaniu podielu mikroagregátov. Nárast WSA<sub>ma</sub>, S<sub>w</sub> a pokles WSA<sub>mi</sub> mal lineárny, polynomický a exponenciálny trend,



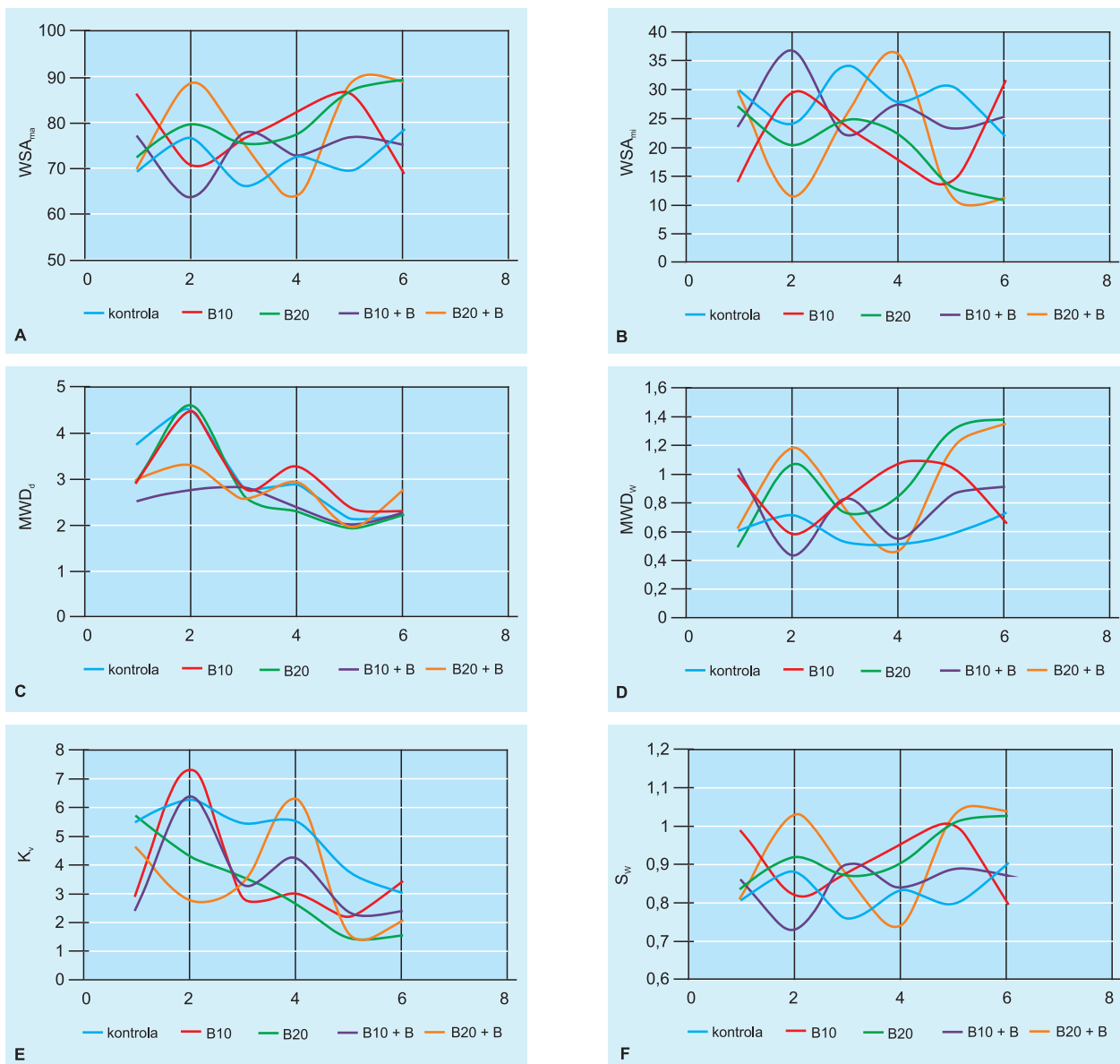
**Obrazok 8:** Dynamika zmien parametrov pôdnej organickej hmoty a humusu A) obsahu organického uhlíka, B) obsahu labilného uhlíka, C) extrahovateľnosti  $C_{HL}$ , D) extrahovateľnosti  $C_{HK}$ , E) extrahovateľnosti  $C_{FK}$ , F) pomeru  $C_{HK} : C_{FK}$ , G) farebného kvocientu humusových látok, H) farebného kvocientu humínových kyselín

**Figure 8:** Change dynamics of soil organic matter and humus parameters A) total organic carbon, B) labile carbon, C) extractability of humic substances carbon, D) extractability of humic acids carbon, E) extractability of fulvic acids carbon, F) humic acids carbon to fulvic acids carbon ratio, G) colour quotient of humic substances, H) colour quotient of humic acids



**Obrázok 9:** Dynamika zmien parametrov pôdnej štruktúry A) obsahu vodoodolných makroagregátov, B) obsahu vodoodolných mikroagregátov, C) stredného váženého priemeru agregátov získaného preosievaním za sucha, D) stredného váženého priemeru agregátov získaného preosievaním za mokra, E) koeficientu zraniteľnosti, F) indexu stability vodoodolných makroagregátov

**Figure 9:** Change dynamics of soil structure parameters A) content of water-stable macroaggregates, B) content of water-stable microaggregates, C) mean weight diameter of aggregates for dry sieving, D) mean weight diameter of water-stable aggregates, E) vulnerability coefficient, F) stability index of water-stable macroaggregates



príčom najspôhlivejšie podľa  $R^2$  tieto zmeny popisoval polynomický trend. Agro-klimatické podmienky hrajú významnú úlohu v dynamike pôdnych agregátov. Striedanie cyklov zmáčania a vysušania môže po pridaní organickej hmoty do pôdy zvýšiť i znížiť stabilitu pôdnych agregátov, v závislosti od stability C, ktorá je určená kvalitou organickej hmoty (20). Z vyššou dynamikou vody ako aj nárastom teploty sa stimuluje aktivita pôdnych mikroorganizmov, čím sa na jednu stranu urýchľuje rozklad organickej hmoty pričom sa môže zlepšiť stabilita pôdnych agregátov (2, 5). Keďže je biouhlie charakteristické vysokou stabilitou C jeho rozklad je pomalý (21). Stabilizujúci účinok biouhlia

pri jeho vyššej dávke prevýšil prípadné deštruktívne vplyvy iných faktorov a preto zmeny, ku ktorým došlo v priebehu vegetačnej sezóny kukurice boli pozitívneho charakteru.

#### Korelačné vzťahy medzi parametrami POH a pôdnej štruktúry

V tabuľke 6 sú uvedené vzájomné vzťahy medzi parametrami POH a pôdnej štruktúry. Organická hmoty sa považuje za kľúčový prvok pôsobiaci na stabilizáciu pôdnych agregátov. Pôdne agregáty môžu slúžiť ako fyzikálna ochrana organických látok voči mikrobiálnemu rozkladu (23). V poľných pokusoch bývajú často zistené

**Tabuľka 6:** Korelačné koeficienty medzi parametrami pôdnej organickej hmoty a pôdnej štruktúry  
**Table 6:** Correlation coefficients between soil organic matter and soil structure parameters

Parameter (1)	WSA <sub>ma</sub> (11)	WSA <sub>mi</sub> (12)	MWD <sub>d</sub> (13)	MWD <sub>w</sub> (14)	K <sub>v</sub> (15)	S <sub>w</sub> (16)
C <sub>org</sub> (2)	0,275	-0,275	-0,290	0,308	-0,356	0,281
C <sub>L</sub> (3)	0,384*	-0,384*	-0,286	0,427*	-0,466**	0,393*
C <sub>HL</sub> (4)	-0,166	0,166	0,357	-0,233	0,311	-0,170
C <sub>HK</sub> (5)	-0,302	0,302	0,530**	-0,317	0,492**	-0,303
C <sub>FK</sub> (6)	0,035	-0,035	0,033	-0,048	0,001	0,032
C <sub>HK</sub> : C <sub>FK</sub> (7)	-0,202	0,202	0,308	-0,127	0,289	-0,199
Q <sub>HL</sub> (8)	-0,099	0,099	-0,201	-0,002	-0,070	-0,103
Q <sub>HK</sub> (9)	0,336	-0,336	-0,576***	0,322	-0,559**	0,331
SH (10)	-0,302	0,302	0,530**	-0,317	0,492**	-0,303

n = 54, \*\*\* = P ≤ 0,001, \*\* = P ≤ 0,01, \* = P ≤ 0,05

C<sub>org</sub> – celkový organický uhlík, C<sub>L</sub> – labilný uhlík, C<sub>HL</sub> – uhlík humusových látok, C<sub>HK</sub> – uhlík humínových kyselín, C<sub>FK</sub> – uhlík fulvokyselín, C<sub>HK</sub> : C<sub>FK</sub> – pomer uhlíka humínových kyselín k uhlíku fulvokyselín, Q<sub>HL</sub> – farebný kvocient humusových látok, Q<sub>HK</sub> – farebný kvocient humínových kyselín, SH – stupeň humifikácie, WSA<sub>ma</sub> – obsah vodoodolných makro-agregátov, WSA<sub>mi</sub> – obsah vodoodolných mikro-agregátov, MWD<sub>d</sub> – stredný vážený priemer agregátov získaný presievaním za sucha, MWD<sub>w</sub> – stredný vážený priemer agregátov získaný presievaním za mokra, K<sub>v</sub> – koeficient zraniteľnosti, S<sub>w</sub> – index stability vodoodolných makro-agregátov

(1) parameter, (2) total organic carbon, (3) labile carbon, (4) humic substances carbon, (5) humic acids carbon, (6) fulvic acids carbon, (7) humic acids carbon to fulvic acids carbon ratio, (8) colour quotient of humic substances, (9) colour quotient of humic acids, (10) degree of humification, (11) water-stable macroaggregates, (12) water-stable microaggregates, (13) mean weight diameter of aggregates for dry sieving, (14) the mean weight diameter of water-stable aggregates, (15) coefficient of vulnerability, (16) stability index of water-stable macroaggregates

pozitívne vzťahy medzi stabilnými frakciami C a podielom makroagregátov v pôde (19). C<sub>org</sub> sa vyznačuje pomerne vysokou stabilitou, čo by mohlo byť dôvodom, prečo sme nezaznamenali štatisticky významné vzťahy medzi ním a parametrami pôdnej štruktúry za sledované obdobie. Zistili sme však, že obsah C<sub>L</sub> pozitívne koreloval s WSA<sub>ma</sub> (r = 0,384, P ≤ 0,05), MWD<sub>w</sub> (r = 0,427, P ≤ 0,05), a S<sub>w</sub> (r = 0,393, P ≤ 0,05) a negatívne s WSA<sub>mi</sub> (r = -0,384, P ≤ 0,05) a K<sub>v</sub> (r = -0,466, P ≤ 0,01). Na tvorbe a stabilite makroagregátov sa teda vo väčšej miere podieľal najmä C<sub>L</sub>. Labilné frakcie C môžu byť v pôde absorbované časticami biouhľia a v konečnom dôsledku sa môžu i podieľať na agregáčnom procese (13). Pozitívny účinok C<sub>L</sub> na tvorbu makroagregátov zistili tiež viacerí autori (19, 26). Zároveň sme pozorovali štatisticky významne pozitívne vzťahy medzi extrahovateľnosťou C<sub>HK</sub> a MWD<sub>d</sub> (r = 0,530, P ≤ 0,01), ale aj medzi C<sub>HK</sub> a K<sub>v</sub> (r = 0,492, P ≤ 0,01). Avšak optické vlastnosti humínových kyselín (Q<sub>HK</sub>) boli v negatívnom korelačnom vzťahu s MWD<sub>d</sub> (r = -0,576, P ≤ 0,001) a K<sub>v</sub> (r = -0,559, P ≤ 0,01), čo svedčí o tom, že viac kondenzovanejšie frakcie s vyššou aromatizáciou sa podieľali na tvorbe stabilnejších agregátov. Väčšia stabilita HK môže priaznivo pôsobiť na zastúpenie a stabilitu makroagregátov (19).

## Záver

Aplikácia biouhľia, a to najmä v dávke 20 t.ha<sup>-1</sup> prípadne jeho kombinácia s H hnojením, najvýznamnejšie ovplyvnila parametre pôdnej organickej hmoty a štruktúru pôdy. V priebehu vegetačného obdobia kukurice sa na základe hodnôt R<sup>2</sup> štatisticky významne menila dynamika väčšiny hodnotených parametrov pôdnej organickej hmoty a pôdnej štruktúry. Najlepšie dynamiku zmien týchto parametrov vyjadroval polynómický trend. Najmä labilná frakcia pôdnej organickej hmoty mala pozitívny vplyv na parametre pôdnej štruktúry. Aj výsledky získané v tejto štúdii poukazujú na to, že biouhlie má svoje opodstatnenie ako pôdne aditívum, ktoré môže potenciálne zlepšovať vlastnosti organickej hmoty a pôdnej štruktúry hnedozeme.

## Literatúra

- (1) BARRIGA, F. M. – DÍAZ, V. – ACOSTA, J. A. – MUÑOZ, M. Á. – FAZ, Á. – ZOMOZA, R. 2017. Organic matter dynamics, soil aggregation and microbial biomass and activity in Technosols created with metalliferous mine residues, biochar and marble waste. In Geoderma, vol. 301, 2017, pp. 19–29.
- (2) BRONICK, C. J. – LAL, R. 2005. The soil structure and land management: a review. In Geoderma, vol. 124, 2005, no. 1–2, pp. 3–22.
- (3) FONTE, S. J. – YEBOAH, E. – OFORI, P. – QUANSAH, Q. W. – VANLAUWE, B. – SIX, J. 2009. Fertilizer and Residue Quality Effects on Organic Matter Stabilization in Soil Aggregates. In Soil Science Society of America Journal, vol. 73, 2009, no. 3, pp. 961–966.
- (4) GLASER, B. – LEHMANN, J. – ZECH, W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. In Biol Fertil Soils, vol. 35, 2002, s. 219 – 230.
- (5) GRUNWALD, D. – KAISER, M. – LUDWIG, B. 2016. Effect of biochar and organic mineralisation and macro-aggregate dynamics under different incubation. In Soil and Tillage Research, vol. 164, 2016, pp. 11–17.
- (6) GUO, S. – WU, J. – COLEMAN, K. – ZHU, H. – LI, Y. – LIU, W. 2012. Soil organic carbon dynamics in a dry land areal cropping system of the Loess Plateau under long-term nitrogen fertilizer applications. In Plant and Soil, vol. 353, 2012, pp. 321–332.
- (7) HAMER, U. – MARSCHNER, B. – BRODOWSKI, S. – AMELUNG, W. 2004. Interactive priming of black carbon and glucose mineralisation. In Organic Geochemistry, vol. 35, 2004, pp. 823–830.
- (8) HRAŠKO, J. – ČERVENKA, L. – TACEK, Z. – KOMAR, J. – NĚMĚČEK, J. – POSPÍŠIL, J. – SIROVÝ, V. 1962. Rozbory pôd. Bratislava : Slovenské vydavateľstvo pôdohospodárskej literatúry, 1962, 334 s.
- (9) HUANG, R. – TIAN, D. – LIU, J. – LU, S. – HE, X. GAO, M. 2018. Responses of soil carbon pool and soil aggregates associated organic carbon to straw and straw-derived biochar addition in a dryland cropping mesocosms system. In Agriculture, Ecosystems and Environment, vol. 265, 2018, pp. 576–586.

- (10) JIANG, X. – HADDIX, M. L. – COTRUFO, M. F. 2016. Interactions between biochar and soil organic carbon decomposition. Effects of nitrogen and low molecular weight carbon compound addition. In *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 100, 2016, pp. 92–101.
- (11) KONONOVA, M.M. – BELČÍKOVÁ, N.P. 1962. Uskonnnyje metody opredelenija sostava gumusa minerálnych počv. In *Počvovedenje*, vol. 10, 1962, pp. 75–87.
- (12) LEHMANN, J. – RILLING, M. – THIES, J. – MASIELLO, C. A. – HOCKADAJ, W. C. – CROWLEY, D. 2011. Biochar effect on soil biota – A review. In *Biology and Biochemistry*, vol. 43, 2011, pp. 1812–1836.
- (13) LIANG, B. – LEHMANN, J. – SOHI, S. P. – THIES, J. E. – NEILL, B. O. – TRUJILLO, L. – GUANT, J. – SOLOMON, D. – GROSSMAN, J. – NEVES, E. G. – LUIZÃO, F. J. 2010. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. In *Organic Geochemistry*, vol. 41, 2010, pp. 206–213.
- (14) LIPCZYNSKA-KOCHANY, E. 2018. Humic substances, their microbial interactions and effects on biological transformations of organic pollutants in water and soil: A review. In *Chemosphere*, vol. 202, 2018, pp. 420–437.
- (15) LOGINOW, W. – WISNIEWSKI, W. – GONET, S.S. – CIESCINSKA, B. 1987. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation. In *Pol. J. Soil Sci.*, vol. 20, 1987, pp. 47–52.
- (16) MADARI, B. E. – MAIA, C. M. B. F. – NOVOTNY, E. H. 2012. Context and importance of biochar research. In *Pesq. Agropec. Bras.*, vol. 47, 2012, no. 5.
- (17) NGUYEN, B. – LEHMANN, J. 2009. Black carbon decomposition under varying water regimes. In *Organic Geochemistry*, vol. 40, 2012, pp. 846–853.
- (18) OLLNESS, A. – ARCHER, D. 2005. Effect of organic carbon on available water in soil. In *Soil Science*, vol. 170, 2005, pp. 90–101.
- (19) POLLÁKOVÁ N., ŠIMANSKÝ V., KRAVKA M. 2017. The influence of soil organic matter fractions in aggregates stabilization in agricultural and forest soils of selected Slovak and Czech hilly lands. In *Journal of Soils and Sediment*, vol. 18, 2017, no. 8, pp. 2790–2800.
- (20) RAHMAN, M. T. – GUO, Z. C. – ZHANG, Z. B. – ZHOU, H. PENG, X. H. 2018. Wetting and drying cycles improving aggregation and associated C stabilization differently after straw or biochar incorporated into a vertisol. In *Soil and Tillage Research*, vol. 175, 2018, pp. 28–36.
- (21) SHACKLEY, S. – RUYSSCHAERT, G. – ZWART, K. – GLASER, B. 2016. *Biochar in European soils and agriculture*. New York : Routledge, 301 p. ISBN 978-0-415-71166-1.
- (22) SIX, J. – CAUNT, R.T. – PAUSTIAN, K. – PAULIE, A. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. In *Plant and Soil*, vol. 241, 2002, pp. 155–176.
- (23) SIX, J. – BOSSUYT, H. – DEGRYZE, S. – DENEFF, K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. In *Soil and Tillage Research*, vol. 79, 2004, pp. 7–31.
- (24) SONG, Y. – LIU, S. – LIU, Q. – ZHANG, W. – HU, CH. 2014. Carbon sequestration in humic substances under long-term fertilization in a wheat-maize system from north China. In *Journal of Integrative Agriculture*, vol. 13, 2014, pp. 562–569.
- (25) SUI, Y. – JIAO, X. – LIU, X. – ZHANG, X. – DING, G. 2012. Water-stable aggregates and their organic carbon distribution after five years of chemical fertilizer and manure treatments on eroded farmland of Chinese Mollisol. In *Can. J. Soil Sci.*, vol. 92, 2012, pp. 551–557.
- (26) ŠIMANSKÝ, V. – HORÁK, J. – IGÁZ, D. – JONCZAK, J. – MARKIEWICZ, M. – FELBER, R. – RIZMIYA, E.Y. – LUKAC, M. 2016. How dose of biochar and biochar with nitrogen can improve the parameters of soil organic matter and soil structure? In *Biologia*, vol. 71, 2016, pp. 989–995.
- (27) ŤURIN, I. V. 1966. K metodike analiza deje sravnitel'nogo izučeniya sostava počvennoho peregrnoja ili gumusa. In *Voprosy genezisa i plodorodija počv*. Moskva : Nauka, 1966.
- (28) VALLA, M. – KOZÁK, J. – ONDÁČEK, V. 2000. Vulnerability of aggregates separated from selected anthrosols developed on reclaimed dumpsites. In *Rostlinná výroba*, vol. 46, 2000, pp. 563–568.
- (29) WANG, Z. – LI, Y. – CHANG, S. X. – ZHANG, J. – JIANG, P. – ZHOU, G. – SHEN, L. 2014. Contrasting effects of bamboo leaf and its biochar on soil CO<sub>2</sub> effect and labile organic carbon in an intensively management Chinese chestnut plantation. In *Biology and Fertility of Soil*, vol. 50, 2014, pp. 109–119.
- (30) WEIL, R. R. – ISLAM, K. R. – STINE, M. A. – GRUVER, J. B. 2003. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. In *American Journal of Alternative Agriculture*, vol. 18, 2003, pp. 3–17.
- (31) WU, W. – YANG, M. – FENG, Q. – GROUTHER, K. M. – WANG, H. – LU, H. – CHEN, Y. 2012. Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment. In *Biomass and Bioenergy*, vol. 47, 2012, pp. 268–276.
- (32) YAN, D. – WANG, D. – YANG, L. 2007. Long-term effect of chemical fertilizer, straw and manure on labile organic matter fractions in a paddy soil. In *Biology and Fertility of Soils*, vol. 44, 2007, pp. 93–101.
- (33) ZAUJEC, A. – ŠIMANSKÝ, V. 2006. Vplyv biostimulátorov rozkladu rastlinných zvyškov na pôdnu štruktúru a organickú hmotu pôdy. *Vedecká monografia*. Nitra : SPU, 112 s. ISBN 180-8069-779-5.
- (34) 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*, vol. 116, 2017, no. 2, pp. 399–409.

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

Pod'akovanie  
Práca bola riešená v rámci projektu VEGA 1/0136/17.



Ilustračné foto