

Vplyv biouhlia na nasýtenú hydraulickú vodivosť hlinitej pôdy

Lucia Toková, Natália Botková, Lenka Botyanszká

Abstract

In our study, we focused on the influence of different particle sizes of biochar (>2mm; 125µm – 2mm and <125µm) produced from willow at temperatures of 300 and 520 °C on the saturated hydraulic conductivity of loam soil. Biochar was applied in the amount of 20 t.ha⁻¹ and the results were compared with clean loam soil. Measurements of saturated soil hydraulic conductivity were performed in laboratory conditions on a falling-head system, with each measurement repeated three times. Our observed results confirm that the application of biochar increases the saturated hydraulic conductivity in loam soil. In our results, we noticed a statistically significant increase of $p < 0.05$ in the saturated hydraulic conductivity of the soil only in the treatments, with lower pyrolysis temperature of applied biochar (300 °C) and with the finest particle sizes (<125 µm and 125 µm – 2 mm).

Keywords: willow biochar, loam soil, saturated hydraulic conductivity of the soil

Annotation

The aim of presented study was to assess the effect of biochar produced from willow at two pyrolysis temperatures (300 and 520 °C), sieved into different size fractions (<125µm; 125µm – 2mm and >2mm) on the values of saturated hydraulic conductivity of loam soil.

Abstrakt

V našom príspevku sme sa zaoberali vplyvom rôznych veľkostí častíc biouhlia (>2mm; 125µm – 2mm a <125µm) vyrobeného z vrby pri teplote 300 a 520 °C na nasýtenú hydraulickú vodivosť hlinitej pôdy. Biouhlie bolo aplikované v množstve 20 t.ha⁻¹ a výsledky sa porovnávali s čistou zemínou. Merania nasýtenej hydraulickej vodivosti pôdy sa uskutočňovali v laboratórnych podmienkach na zariadení s premenlivým hydraulickým sklonom, pričom každé meranie sa opakovalo trikrát. Nami pozorované výsledky potvrdzujú, že aplikácia biouhlia nasýtenú hydraulickú vodivosť zvyšuje v hlinitej pôde. Pri výsledkoch sme zaznamenali štatisticky významné zvýšenie $p < 0,05$ nasýtenej hydraulickej vodivosti pôdy iba na variantoch, kde bolo pridané biouhlie vyrobené pri nižšej teplote (300 °C) s najmenšími veľkosťami častíc (<125µm a 125µm – 2mm).

Kľúčové slová: biouhlie z vrby, hlinitá pôda, nasýtená hydraulická vodivosť pôdy

Anotácia

Cieľom predloženého príspevku bolo posúdiť vplyv biouhlia vyrobeného z vrby pri dvoch teplotách pyrolýzy (300 a 520 °C) preosiateho na rôzne veľkostné frakcie (<125µm; 125µm – 2mm a >2mm) na hodnoty nasýtenej hydraulickéj vodivosti hlinitej pôdy.

1 Úvod

Hlinité pôdy majú za priaznivých okolností optimálne fyzikálne, chemické a biologické vlastnosti a taktiež sú obrábatel'né bez ťažkostí. Toto však platí iba za predpokladu, že majú dobrú štruktúru a priaznivý vlhkosťný režim (Antal a kol., 2014). Z hľadiska meniacej sa klímy dôsledkom otepľovania podnebia je poľnohospodársky sektor vystavený viacerým problémom. Jedným z najzávažnejších problémov je zmena prerozdelenia zrážok a tým aj riziko sucha v krajine. V takomto prípade sa vlastnosti pôd ako aj ich vlhkosťný režim môžu závažným spôsobom meniť k horšiemu. Prejav sucha v krajine nastáva, keď rastliny nedokážu ďalej čerpať vodu z pôdneho profilu.

Vhodné, praxou akceptovateľné riešenia na zmiernenie prejavov sucha prináša aplikácia vhodných pôdnych aditív. Jedným z nich by mohla byť aplikácia biouhlia do pôdy. Biouhlie je čierny, na uhlík bohatý, porézny a pevný materiál (podobný drevenému uhliu), ktorý možno vyrobiť tepelným rozkladom (pyrolýzou) biomasy za prítomnosti malého množstva alebo žiadneho kyslíka (Ahmad a kol., 2014). Biouhlie má jedinečné chemické, fyzikálne a biologické vlastnosti, ktoré z neho robia zaujímavý materiál s rozmanitými aplikáciami. V posledných desaťročiach vzrástol záujem o štúdie a postupy v oblasti premeny biomasy na biouhlie, vzhľadom na jeho mnohonásobné výhody a rôznorodý aplikačný potenciál (Lehmann a Stephen, 2015).

Prioritne bola téma biouhlia riešená z pohľadu ukladania uhlíka do pôdy a potenciálu biouhlia znižovať emisie skleníkového aktívnych plynov do atmosféry (Rizhiya a kol., 2019). Záujmom vedeckej komunity však bolo podrobiť problematiku aplikácie biouhlia diskusii aj z hľadiska jeho vplyvu na ostatné agro–environmentálne parametre pôdy (Peng a kol., 2011; Šimanský a kol., 2020). V súčasnosti je veľmi diskutovanou témou zvýšenie retencie vody v krajine a zadržiavanie vody v rámci pôdneho profilu (Basso a kol., 2013). Niekoľko štúdií preukázalo, že biouhlie dokáže zlepšiť vlastnosti pôdy a tým aj samotný vodný režim (Mukherjee a Lal, 2013). Aplikácia biouhlia do pôdy by mohla zmeniť distribúciu pôdnej vody a zlepšiť efektivitu využívania poľnohospodárskej pôdy (Awasthi a kol., 2020).

Biouhlie má po aplikácii do pôdy poskytovať poľnohospodárske výhody napríklad aj prostredníctvom zmien nasýtenej hydraulickéj vodivosti pôdy (Gelardi a kol., 2021). Napriek tomu pretrvávajú neistoty týkajúce sa schopnosti biouhlia poskytovať tieto výhody v dôsledku rozdielov v vstupnej biomase, teploty pyrolýzy, pôdnej textúre, aplikačnej dávky či veľkosti frakcie aplikovaného biouhlia.

Hydraulická vodivosť pôdy je veľmi dôležitou hydro–fyzikálnou charakteristikou pri riešení problémov vodného režimu pôd, ktorá vyjadruje schopnosť pôdy viesť vodu. Táto schopnosť pôdy je predovšetkým ovplyvnená pôdnou textúrou. Podľa Lemanna a Stephena (2015) sa môže kombináciou rôznych veľkostí pôdných častíc a veľkostí častíc biouhlia výrazne meniť či ovplyvňovať aj hydraulická vodivosť pôdy. Niektoré štúdie (Lehmann a Stephen, 2015; Lim a kol., 2016) uvádzajú, že biouhlie s menšími časticami ako sú pôdne častice nachádzajúce sa v pôdnom profile môžu po aplikácii znížiť hydraulickú vodivosť pôdy, naopak biouhlia s väčšími časticami ako sú pôdne častice by mohli hydraulickú vodivosť zvýšiť. Liu a kol. (2017) uvádzajú, že veľkosť častíc biouhlia ovplyvňuje ukladanie vody v pôde zmenou priestoru pórov medzi pôdnymi časticami (medzi–póry) a pridaním pórov, ktoré boli súčasťou biouhlia (vnútro–póry). Esmaeelnejad a kol. (2017) zistili, že prídanie jemnejších častíc biouhlia vyplní priestory medzi časticami pôdy. Prídanie biouhlia by teda mohlo byť znížiť (upchať) alebo zväčšiť póry v zmesi na základe množstva jemných frakcií biouhlia, čo by zase mohlo znížiť alebo zvýšiť hydraulickú vodivosť zmesi (Trifunovic a kol., 2018). Hydraulická vodivosť zmesí biouhlia a pôdy sa teda môže meniť v závislosti od textúry pôdy a častíc biouhlia. Väčšina štúdií o vzťahu medzi veľkosťou častíc biouhlia a pôdnymi hydraulickými parametrami sa zameriava najmä na milimetrovú a mikro škálu (Alghamdi a kol., 2020; Rasa a kol., 2018).

2 Metodika práce

Popis laboratórneho experimentu

Hlinitá pôda použitá pri tomto experimente bola odobratá z lokality Dolná Malanta (Nitra, Slovensko). Pôda v priemere obsahuje $360,4 \text{ g.kg}^{-1}$ piesku, $488,3 \text{ g.kg}^{-1}$ prachu a $151,3 \text{ g.kg}^{-1}$ ílu. (Horák, 2017).

Biouhlie použité pri tomto experimente bolo vyrobené v reaktore UNYPIR, ktorý je súčasťou centra AgroBioTech patriaceho Slovenskej poľnohospodárskej univerzite v Nitre. Vstupným materiálom pri oboch typoch biouhlia bola vrba švédská, odroda Tordis ((*Salix schwerinii* x *S. viminalis*) x *S. viminalis*). Pri výrobe oboch biouhlí bol použitý rovnaký tlak (101 kPa), avšak rozdiel bol v teplote pyrolýzy. Pri prvom biouhli bola použitá teplota $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a pri druhom $520 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Vyrobené biouhlia boli dodané s veľkosťou častíc 0 – 10 mm, ktoré sa následne zomleli na elektrickom mlynčeku a preosiali na sítach s veľkosťou ôk 2 mm a $125 \mu\text{m}$.

Pôdne vzorky zmesí hlinitej pôdy a biouhlí boli pripravené v laboratórnych podmienkach s pomerom množstva biouhlia 20 t.ha^{-1} (podľa suchej hmotnosti) do Kopeckého valčekov (100 cm^3). Pre každé biouhlie boli pripravené 3 varianty (Obr. 1): zmes hlinitej pôdy a biouhlia s veľkosťou častíc $<125 \mu\text{m}$, zmes hlinitej pôdy a biouhlia s veľkosťou častíc $125 \mu\text{m} - 2 \text{ mm}$ a zmes hlinitej pôdy a biouhlia s veľkosťou častíc $>2 \text{ mm}$. Pre každý variant boli následne pripravené 3 opakovania. Tieto pripravené zmesi sa porovnali s referenčnou pôdou (čistá zemina), ktorá bola pripravená taktiež v 3 opakovaniach.



Obr. 1: Veľkostné frakcie použitého biouhlia a) $<125\mu\text{m}$, b) $125\mu\text{m} - 2\text{mm}$ a c) $>2\text{mm}$

Popis stanovenia nasýtenej hydraulickej vodivosti hlinitej pôdy

Nasýtená hydraulická vodivosť bola stanovená na vzorkách zmesí hlinitej pôdy a biouhlia v Kopeckého valčekoch (100 cm^3) na všetkých variantoch laboratórneho experimentu. Pre každý variant boli pripravené 3 pôdne vzorky, spolu bolo teda meranie robené na 21 vzorkách. Na každej pôdnej vzorke sa uskutočnili 3 merania nasýtenej hydraulickej vodivosti pôdy. To znamená, že pre každý variant sme mali spolu 9 nameraných hodnôt nasýtenej hydraulickej vodivosti pôdy.

Nasýtená hydraulická vodivosť hlinitej pôdy bola stanovená pomocou zariadenia s premenlivým hydraulickým sklonom (Igaz a kol., 2017) (Obr. 2). Hodnoty nasýtenej hydraulickej vodivosti pôdy sme získali podľa vzťahu (Antal a Igaz, 2012):

$$K = \frac{L}{t} \cdot \ln \frac{H_2}{H_1}$$

kde: L – výška valčeka s pôdou (cm), t – čas poklesu vody z výšky H_2 na H_1 (s), H_2 – počiatočná výška vody v nastavci (cm), H_1 – výška vody v nastavci po poklese



Obr. 2: Laboratórne meranie nasýtenej hydraulickej vodivosti na hlinitej pôde

Popis štatistickej analýzy

Vplyv aplikácie rôznych veľkostí biouhlia na nasýtenú hydraulickú vodivosť hlinitej pôdy bol vyhodnotený pomocou jednofaktorovej analýzy odchýlok (*One-Way ANOVA*). Štatisticky významné vplyvy pri $p < 0,05$ boli stanovené testom LSD. ANOVA test sa uskutočňoval v softvéri Statgraphics Centurion XV.I (Statpoint Technologies, Inc., Warrenton, VA, USA). Grafické vyhodnotenie sa robilo pomocou programu Microsoft Excel.

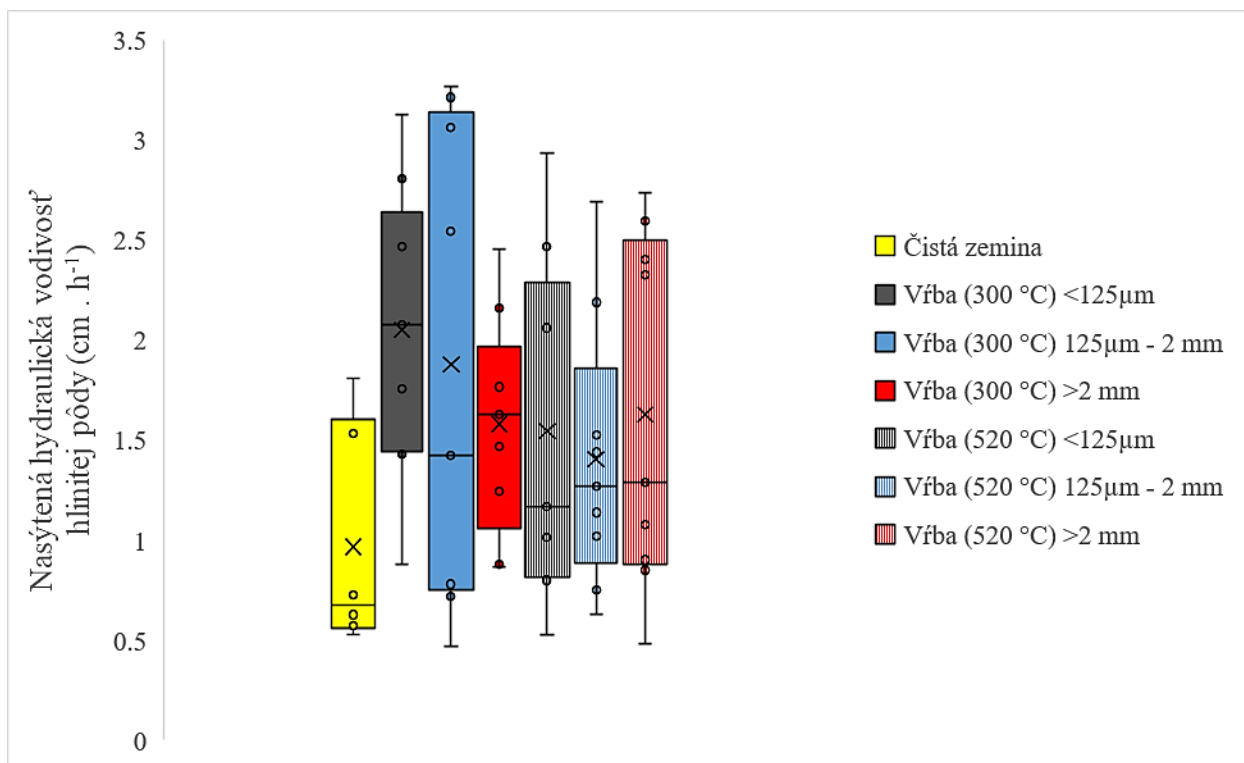
3 Výsledky práce a diskusia

Podľa doterajších výskumov sa predpokladá, že v hlinitých pôdach biouhlie zníži objemovú hmotnosť pôdy (Toková a kol., 2020), čo ďalej vedie k zvýšeniu pórovitosti a jej prevzdušňovaniu (Sun a Lu, 2014; Walters a White, 2018), k zvýšeniu vlhkosti pôdy (Novak a kol., 2012) a k následnému zvýšeniu hydraulickej vodivosti pôdy (Esmaeelnejad a kol., 2017).

Najdôležitejším pozorovaným výsledkom našej práce bolo zvýšenie nasýtenej hydraulickej vodivosti hlinitej pôdy pri všetkých variantoch s biouhlím v porovnaní s čistou zeminou (referenčná pôda) (Tab. 1, Obr. 3), pričom štatisticky významné zvýšenie $p < 0,05$ bolo pozorované iba v prípade variantov, kde bolo aplikované biouhlie z vŕby (300 °C) s časticami s veľkosťou $< 125\mu\text{m}$ a $125\mu\text{m} - 2\text{mm}$ (Tab. 1).

Tab. 1: Vplyv aplikácie rôznych veľkostí biouhlia (<125 μ m, 125 μ m – 2mm a >2mm) vyrobeného pri dvoch teplotách pyrolýzy (300 a 520 °C) na nasýtenú hydraulickú vodivosť hlinitej pôdy. Rozdielne písmená (a, b) naznačujú štatisticky významnú odlišnosť ($p < 0,05$) v hodnotách podľa testu LSD.

Variant	Priemer (cm.h ⁻¹) (n=9)	Štandardná odchýlka (n=9)
Čistá zemina	0,966 ^a	0,558
Vfba (300 °C) <125 μ m	2,052 ^b	0,732
Vfba (300 °C) 125 μ m – 2mm	1,878 ^b	1,146
Vfba (300 °C) >2mm	1,582 ^{ab}	0,537
Vfba (520 °C) <125 μ m	1,545 ^{ab}	0,857
Vfba (520 °C) 125 μ m – 2mm	1,406 ^{ab}	0,667
Vfba (520 °C) >2mm	1,630 ^{ab}	0,874



Obr. 3: Grafické znázornenie vplyvu aplikácie rôznych veľkostí biouhlia (<125 μ m, 125 μ m – 2mm a >2mm) vyrobeného pri dvoch teplotách pyrolýzy (300 a 520 °C) na nasýtenú hydraulickú vodivosť hlinitej pôdy. Krabicový graf uvádza: minimálnu a maximálnu hodnotu (okrajové čiary), horný a dolný kvartil (hrany obdĺžnika), medián (čiara v obdĺžniku) a priemernú hodnotu (križik v obdĺžniku).

Zaujímavým pozorovaným javom bolo aj postupné znižovanie nasýtenej hydraulickéj vodivosti hlinitej pôdy zväčšovaním veľkostných frakcií biouhlia, vidieť to najmä v prípade biouhlia vyrobenom pri nižšej teplote pyrolýzy: [Vfba (300 °C) <125µm] > [Vfba (300 °C) 125µm – 2mm] > [Vfba (300 °C) >2mm]. Ani v jednom z uvedených prípadov však nebol zaznamenaný štatisticky významný rozdiel. V prípade biouhlia vyrobenom pri vyššej teplote (520 °C) sa tento trend taktiež javí, i keď pri najväčšej frakcii biouhlia (>2mm) bol dosiahnutý najvyšší priemer v porovnaní s nižšími frakciami. Vysvetľujeme si to však veľkým rozptylom nameraných hodnôt v tomto variante, ktorý mohol ovplyvniť priemernú hodnotu (Obr. 3, Tab.1).

Naše výsledky jednoznačne preukazujú, že biouhlie efektívne zvyšuje hydraulickú vodivosť v hlinitej pôde. Aplikácia biouhlia sa však hodnotí pre širokú škálu pôd. Náš predchádzajúci výskum o vplyve tohoto istého biouhlia (vyrobeného z vrby pri teplote 300 a 520 °C) na piesočnatú pôdu (Toková a kol., 2022a; Toková a kol., 2022b) hovorí o znížení nasýtenej hydraulickéj vodivosti pôdy po jeho aplikácii v porovnaní s čistým pieskom a taktiež o jej postupnom znižovaní zmenšovaním veľkostných frakcií biouhlia. Je to z toho dôvodu, že biouhlie v piesočnatých pôdach spôsobuje pomalší odtok vody a tým aj efektívne potláča stratu vody (Dan a kol., 2015; Gelardi a kol., 2021). Niektoré štúdie uvádzajú, že biouhlie s menšími časticami ako sú pôdne častice nachádzajúce sa v pôdnom profile môžu po aplikácii znížiť hydraulickú vodivosť pôdy, naopak biouhlia s väčšími časticami ako sú pôdne častice by mohli hydraulickú vodivosť zvýšiť (Lehmann a Stephen, 2015; Lim a kol., 2016). V našom prípade všetky veľkosti použitého biouhlia (<125µm, 125µm – 2mm, >2mm) spôsobili zvýšenie nasýtenej hydraulickéj vodivosti v hlinitej pôde.

Z našich výsledkov bol ďalej pozorovaný mierny trend zvýšenia priemerných hodnôt nasýtenej hydraulickéj vodivosti pri biuholí s nižšou teplotou pyrolýzy (300 °C) v porovnaní s biouhlím s vyššou teplotou pyrolýzy (520 °C). Podobný výsledok bol zaznamenaný aj pri našich predchádzajúcich štúdiách v piesočnatej pôde (Toková a kol., 2022a). Wiersma a kol. (2020) uvádzajú, že biouhlie vyrobené pri rôznych teplotách pyrolýzy, ale z rovnakého vstupného materiálu poskytujú rovnaký výsledný materiál z hľadiska hydraulických vlastností piesočnatej pôdy. Predpokladáme teda, že zmena teploty pyrolýzy biouhlia vyrobeného z vrby nemala vplyv na hodnoty nasýtenej hydraulickéj vodivosti v nami skúmanej hlinitej pôde.

5 Záver

Naše zistenia potvrdzujú, že biouhlie v množstve 20 t.ha⁻¹ aplikované do hlinitej pôdy nasýtenú hydraulickú vodivosť zvyšuje v porovnaní s čistou zeminou. Ďalej sme zistili, že znižovaním častíc biouhlia sa nasýtená hydraulická vodivosť postupne zvyšuje. Predpokladáme, že jemnejšie frakcie biouhlia (<125µm) lepšie vyplnili medzi-póry v pôde a následne efektívnejšie zvýšili nasýtenú hydraulickú vodivosť pôdy. Pridanie biouhlia do pôdy môže napomôcť k zvýšeniu nasýtenej hydraulickéj vodivosti a tým aj prispieť k efektívnemu hospodáreniu s vodou v hlinitej pôde v podmienkach nastávajúcej klimatekovej zmeny.

Pod'akovanie

Tento príspevok bol vytvorený s finančnou podporou z projektu VEGA 2/0155/21 a APVV-21-0089.

Použitá literatúra

Ahmad, M. – Rajapaksha, A. U. – Lim, J. E. – Zhang, M. – Bolan, N. – Mohan, D. – Vithanage, M. – Lee, S. S. – Ok, Y. S. 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 2014, roč. 99, s 19–33. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>>.

Alghamdi, A. G. – Alkhasha, A. – Ibrahim, H. M. 2020. Effect of biochar particle size on water retention and availability in a sandy loam soil. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2020, roč. 24, s 1042–1050. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1016/j.jscs.2020.11.003>>.

Antal, J. – Igaz, D. 2012. *Aplikovaná agrohydrologia*. Nitra: SPU, 2012, 210 s. ISBN 978–80–552–0731–5.

Antal, J. – Bárek, V. – Čimo, J. – Halaj, P. – Halászová, K. – Horák, J. – Igaz, D. – Jurík, L. – Muchová, Z. – Novotná, B. – Šinka, K. 2014. *Hydrologia poľnohospodárskej krajiny*. Nitra: SPU, 2014, 371 s. ISBN 978–80–552–1257–9.

Awasthi, M. K. – Duan, Y. – Awasthi, S. K. – Liu, T. – Zhang, Z. 2021. Influence of bamboo biochar on mitigating greenhouse gas emissions and nitrogen loss during poultry manure composting. *Bioresource Technology*, 2021, roč. 303, s 122952. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122952>>.

Basso, A. S. – Miguez, F. E. – Laird, D. A. – Horton, R. – Westgate, M. 2013. Assessing potential of biochar for increasing water holding capacity of sandy soil. *Global Change Biology – Bioenergy*, 2013, roč. 5, s 132–143. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1111/gcbb.12026>>.

Dan, T. – Zhong–Yi, Q. – Mang–Mang, G. – Bo, L. – Yi–Jia, L. 2015. Experimental study of influence of biochar on different texture soil hydraulic characteristic parameters and moisture holding properties. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2015, roč. 24, s 1435–1442.

Esmaelnejad, L. – Shorafa, M. – Gorji, M. – Hosseini, S. M. 2017. Impacts of woody biochar particle size on porosity and hydraulic conductivity of biochar–soil mixtures: An incubation study. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2017, roč. 48, s 1710–1718. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1383414>>.

Gelardi, D. L. – Ainuddin, I. H. – Rippner, D. A. – Patiño, J. E. – Najm, M. A. – Parikh, S. J. 2021. Biochar alters hydraulic conductivity and impacts nutrient leaching in two agriculture soils. *Soil*, 2021, roč. 7, s 811–825. Dostupné na: <<https://doi.org/10.5194/soil-7-811-2021>>.

Horák, J. 2017. Vplyv biouhlia v kombinácií s rôznymi dávkami N hnojív na emisie oxidu dusného (N₂O) v podmienkach poľného experimentu: Effect of biochar in combination with different doses of N fertilizer on nitrus oxide (N₂O) emissions in condition of field experiment. *Ochrana Ovzdušia Air Protection*, 2017, 22–24. Bratislava: Konges STUDIO, s 147–156. ISBN 978–80–89565–30–6.

Igaz, D. – Kondrlová, E. – Horák, J. – Čimo, J. – Tárnik, A. – Bárek, V. 2017. *Základné merania v hydropedológii*. Nitra: SPU, 2017, 110 s. ISBN 978–80–552–1686–7.

Lehmann, J. – Stephen, J. 2015. *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation*. 2nd ed. London: Rountledge, Taylor and Francis Group, 2015, 928 s. ISBN 978–0–415–70415–1.

Lim, T. J. – Spokas, K. A. – Feyereisen, G. – Novak, J. M. 2016. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere*, 2016, roč. 142, s 136–144. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.069>>.

Liu, Z. – Dugan, B. – Masiello, C. A. – Gonnermann, H. M. 2017. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. *PLoS One*, 2017, roč. 12. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179079>>.

Mukherjee, A. – Lal, R. 2013. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy*, 2013, roč. 3, s 313–339. Dostupné na: <<https://doi.org/10.3390/agronomy3020313>>.

Novak, J. M. – Busscher, W. J. – Watts, D. W. – Amonette, J. E. – Ippolito, J. A. – Lima, I. M – Gaskin, J. – Das, K. C. – Steiner, C. – Ahmedna, M. – Rehrh, D. – Schomberg, H. 2012. Biochars impact on soil moisture storage in an ultisol and two ardisols. *Soil Science*, 2012, roč. 177, s 310–320. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31824e5593>>.

Peng, X. – Ye, L. L. – Wang, C. H. – Zhou, H. – Sun, B. 2011. Temperature and duration dependent rice straw–derived biochar: characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil and Tillage Research.*, 2011, roč. 112, s 159–166. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1016/j.still.2011.01.002>>.

Rasa, K. – Heikkinen, J. – Hannula, M. – Arstila, K. – Kulju, S. – Hyvaluoma, J. 2018. How and why does willow biochar increase a clay soil water retention capacity? *Biomass and Bioenergy*, 2018, roč. 119, s 346–353. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.10.004>>.

Rizhiya, E. Y. – Muchina, I. M. – Balashov, E. V. – Šimanský, V. – Buchkina, N. P. 2019. Effect of biochar on N₂O emission, crop yield and properties of Stagnic Luvisol in a field experiment. *Zemdirbyste–Agriculture*, 2019, roč. 106, s 297–306. Dostupné na: <[10.13080/z-a.2019.106.038](https://doi.org/10.13080/z-a.2019.106.038)>.

Sun, F. – Lu, S. 2014. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore–space properties of clayey soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, roč. 177, s 26–33. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1002/jpln.201200639>>.

Šimanský, V. – Igaz, D. – Juriga, M. – Aydin, E. – Lukac, M. 2020. Biochar: An important component ameliorating the productivity of intensively used soils. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, roč. 29, s 2995–3001. Dostupné na: <<https://doi.org/10.15244/pjoes/113128>>.

Toková, L. – Igaz, D. – Horák, J. – Aydin, E. 2020. Effect of biochar application and re–application on soil bulk density, saturated hydraulic conductivity, water content and soil water availability in a silty loam Haplic Luvisol. *Agronomy*, 2020, roč. 10, s 1005. Dostupné na: <<https://doi.org/10.3390/agronomy10071005>>.

Toková, L. – Vitková, J. – Botková, N. – Botyanszká, L. – Šurda, P. – Rončák, P. – Gaduš, J. 2022a. Vplyv veľkosti častíc biouhlia na nasýtenú hydraulickú vodivosť piesočnatej pôdy. *Water*

Regime of Natural Areas: book of peer-reviewed papers. Bratislava: Institute of Hydrology, Slovak Academy of Sciences, 2022, s 195–200. ISBN 978–80–89139–52–1.

Toková, L. – Botková, N. – Vitková, J. – Šurda, P. – Botyanszká, L. – Rončák, P. – Gaduš, J. 2022b. Saturated hydraulic conductivity of sandy soil under application of two different biochar types. *Veda mladých 2022 – Science of Youth 2022: proceedings of reviewed contributions.* Nitra: Faculty of Horticulture and Landscape Engineering, 2022, s 138–146. ISBN 978–80–552–2502–9. ISSN 2585–7398. Dostupné na: <<https://doi.org/doi.org/10.15414/2022.9788055225029>>.

Trifunovic, B. – Gonzales, H. B. – Ravi, S. – Sharratt, B. S. – Mohanty, S. K. 2018. Dynamic effects of biochar concentration and particle size on hydraulic properties of sand. *Land Degradation and Development*, roč. 29, s 884–893.

Walters, R.D. – White, J. G. 2018. Biochar in situ decreased bulk density and improved soil–water relations and indicators in Southeastern US Coastal Plain Ultisols. *Soil Science*, 2018, roč. 183, s 1–13.

Wiersma, W. – Ploeg, M. J. – Sauren, I. J. M. H. – Stoof, C. R. 2020. No effect of pyrolysis temperature and feedstock type on hydraulic properties of biochar and amended sandy soil. *Geoderma*, 2020, roč. 364, s 114209.