

Metoda zapravování biouhlu do lesních a zemědělských půd za účelem zvýšení produktivity a rezistence, resilience a stability stanoviště

(Method of biochar incorporation into forest and agricultural soil to increase habitat productivity and resilience)

Certifikovaná metodika

Jiří Lehejček¹, Václav Tejnecký², Hana Johanis², Markéta Marečková³, Jan Kopecký⁴ Ondřej Drábek², Jakub Horák⁵, Lukáš Vlček⁶, Luděk Šefrna⁶, Karel Klem⁸, Jakub Houška⁷

¹ Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta logistiky a krizového řízení, Ústav environmentální bezpečnosti, Studentské nám. 1532, 686 01 Uherské Hradiště, ČR

² Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravin a přírodních zdrojů, Katedra pedologie a ochrany půd, Kamýcká 129, 165 21 Praha 6, ČR

³ Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravin a přírodních zdrojů, Katedra mikrobiologie, výživy a dietetiky, Kamýcká 129, 165 00 Praha 6, ČR

⁴ Výzkumný ústav rostlinné výroby, Drnovská 507/73, 161 06 Praha 6 – Ruzyně, ČR

⁵ Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, Katedra ochrany lesa a entomologie, Kamýcká 129, 165 00 Praha 6, ČR

⁶ Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie, Albertov 6, 128 43 Praha 2, ČR

⁷ Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, v. v. i., Odbor ekologie krajiny, Lidická 25/27, 602 00 Brno, ČR

⁸ Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i., Bělidla 986/4a, 603 00 Brno, ČR

2024

Metodika byla certifikována Ústředním kontrolním a zkušebním ústavem zemědělským v Brně vydáním osvědčení č. 110520/2024 jeho odsouhlasením Odborem vědy, výzkumu a vzdělání MZe ČR.

Metodika je poskytována bezplatně a je veřejně přístupná na adrese

<https://www.vukoz.cz/project/uloha-milirist-z-hlediska-kulturniho-dedictvi-a-ochrany-krajiny>

Metodika vznikla za finanční podpory projektu Technologické agentury České republiky ETA 2 (TL02000160) Úloha milířišť z hlediska kulturního dědictví a ochrany krajiny

Abstrakt

Naše lesnictví a zemědělství stále čelí mnoha výzvám. Jedna z těch současných je například příprava hospodářských lesů a zemědělské krajiny na poskytování tradičních produkčních, ale i čím dál více požadovaných mimoprodukčních funkcí v kontextu probíhající klimatické změny. Biouhel a jeho aplikace do půdy je jednou z příležitostí, která má potenciál lesům i zemědělské krajině pomoci v překonání nepříznivých podmínek s klimatickou změnou spojených. Předložená metodika shrnuje výsledky aplikace biouhlu do lesních a zemědělských půd z pohledu vlivu na fyzikálně-chemické vlastnosti půdy a půdní mikrobiom (v zemědělství i produkční charakteristiky). Zároveň přináší cenný pohled do ekologie růstu stromů na stanovištích dlouhodobě obohacených biouhlem (historická milířiště). Celkové výsledky indikují, že aplikace biouhlu do lesních půd může působit jako stimulant výše zmíněných produkčních i mimoprodukčních lesních funkcí. Využití biouhlu na zemědělských půdách je perspektivní v případě aktivace biouhlu např. kompostem, kdy se významně zvyšuje jeho pozitivní efekt již během krátké doby, a naopak některé dočasné negativní jevy se tímto eliminují. Určitým omezením není dostupnost biouhlu na trhu, ale komerční ceny a ekonomická efektivita s ohledem na přímý vliv biouhlu na rostlinnou produkci a kvalitu půdy. Jako smart řešení se jeví multiplikační využití biouhlu nejdříve v živočišné výrobě a sekundárně jako meliorační materiál na produkčních zemědělských plochách, zejména tam, kde je nutno zlepšit půdní úrodnost (především půdy s nízkým obsahem organického uhlíku).

Klíčová slova:

Lesní půdy, smrkový a bukový porost, biouhel, fyzikálně-chemické vlastnosti půd, půdní mikrobiom, aplikace biouhlu, zemědělské půdy.

Abstract

Czech forestry and agriculture face many challenges. In the context of climate change, one of the current ones is transformation of managed forest and agricultural landscape to play traditional productive and well as increasingly desired non-productive functions in the context of ongoing climate change. Biochar and its application into soils represents the potential in this respect. Presented methodology provides empirical results of biochar application into forest and agricultural soils regarding physical-chemical soil properties as well as soil microbiome (also production parameters for selected crops). We also report valuable insight into tree growth ecology at the long-term biochar enriched sites (i.e. charcoal kilns). Overall results indicate potential stimulating effect of biochar to above mentioned productive and non-productive forest functions. The use of biochar on agricultural land is promising in the case of activation of biochar with e.g. compost, when its positive effect increases within a short time and, on the contrary, some temporary negative phenomena are thereby eliminated. Certain constraints are not the availability of biochar on the market but the commercial prices and economical effectivity in respect to its impact on crop production and quality of soil. Multiplicative use of biochar appears to be a smart solution, firstly in livestock production and secondarily as a melioration material on productive agricultural fields, mainly in places where is necessary to increase soil fertility (soils with low content of organic matter).

Key words:

Forest soil, spruce and beech stand, biochar, physical-chemical soil properties, soil microbiome, biochar application, agricultural land.

Obsah

1	Obsah	
2	ÚVOD A CÍL METODIKY	6
3	VLASTNÍ POPIS METODIKY	6
3.1	Využití biouhlu na zemědělských půdách	6
3.1.1	Pokus - experimentální design a metodika	6
3.1.2	Výsledky.....	7
3.1.3	Praktické aspekty využívání biouhlu v zemědělství.....	18
3.2	Využití biouhlu v lesnictví.....	20
3.2.1	Úvod	20
3.2.2	Postup odvození hodnot v metodice.....	20
3.2.3	Postup výroby biouhlu.....	20
3.2.4	Vpravení biouhlu do lesní půdy	21
3.2.5	Design pokusu	21
3.2.6	Sledované charakteristiky lesních půd a metody sběru	21
3.2.7	Počáteční a první rok – výsledky	23
3.2.8	Dlouhodobé charakteristiky stanoviště na základě odběrů z historických milířů	28
3.2.9	Komentář k navrhované metodice a doporučení.....	30
4	SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ	30
5	POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY	31
6	EKONOMICKÉ ASPEKTY	31
7	SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY	31
8	SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE	32
9	KONTAKTNÍ ADRESY OPONENTŮ, AUTORA A OSVĚDČENÍ O CERTIFIKACI.....	32

2 ÚVOD A CÍL METODIKY

Biouhel nebo také biochar je biomasa zuhelnatělá za účelem aplikace do půdy. Lidově známý termín dřevěné uhlí neoznačuje totéž, i když mají společný původ. Dřevěné uhlí bylo a je vyráběno za účelem dalšího spalování, zatímco biouhel je drobnozrnnější a více obohacuje půdu.

Biouhel je produktem rozkladu biomasy vlivem dostatečně vysoké teploty (300-600 °C) za malého nebo žádného přístupu vzduchu – v případě anaerobního spalování se proces označuje jako pyrolýza. Biouhel má obsah živin (fosforu, alkálií) téměř stejný, jako původní biomasa, až na snížený obsah dusíku. Pro význam jeho aplikace je důležitý fakt, že živiny se z něj uvolňují pomalu a nevyplavují se. Navíc uhlík v něm vázaný má dobu setrvání v půdě v řádu staletí až tisíciletí.

Tvorbou a aplikací biouhlu do půd lze z dlouhodobého hlediska zlepšit jejich fyzikální a chemické vlastnosti, a také bezpečně uložit množství uhlíku zachyceného předtím fotosyntézou z ovzduší.

Cílem metodiky je popsat metodu zapravování biouhlu do zemědělských a nově i lesních půd. Metodika shrnuje dosavadní poznatky aplikace biouhlu do zemědělských půd, a především nově představuje možnosti využití biouhlu v lesním hospodaření, přičemž hodnotí environmentální přínosy, částečně ekonomické náklady a produkční potenciál tohoto přístupu (u vybraných zemědělských plodin).

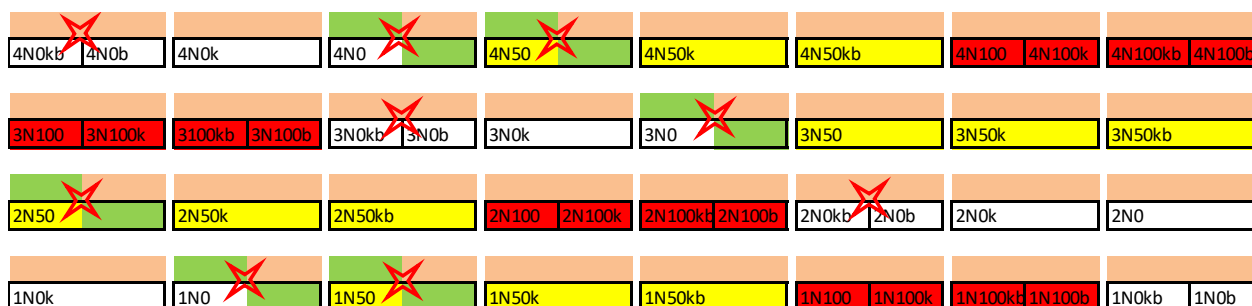
3 VLASTNÍ POPIS METODIKY

3.1 Využití biouhlu na zemědělských půdách

Pro zjištění efektu aplikace biouhlu do zemědělské půdy v podmínkách České republiky bylo využito probíhajícího polního pokusu v katastru obce Banín. Experimentální design je sestaven tak, aby porovnal vliv aplikace různých agrotechnických postupů na kvalitu půdy (oproti kontrole) a na výnosy u vybraných plodin. Část výsledků je vyhodnocena i v této metodice. Dále jsou v této části popsány jednotlivé metodické kroky postupu aplikace biouhlu na zemědělské půdy z pohledu farmáře (uživatele zem. pozemků).

3.1.1 Pokus - experimentální design a metodika

Lokality s místními názvy „Babička“ a „Větrolam“ v katastru obce Banín : jedná se o 2 pokusné plochy (Babička: 49.6735589N, 16.4593456E a Větrolam: 49.6645322N, 16.4729281E) každá s experimentálním designem znázorněným na Obrázku 1, na každé ploše odebráno 100 směsných vzorků půdy (celkem 200) z hloubkového profilu 0-20 cm. Experimentální design ploch je znázorněn na Obrázku 1.



Obrázek 1: : Schéma experimentálního designu polního pokusu na zemědělské půdě. Vysvětlivky: číslo - blok/opakování, 0 - kontrola, k - kompost, kb – kompostovaný biouhel (kompost v zakládce obohacený o biouhel), b - biouhel, N0, N50 nebo N100 značí dávku dusíku (0%% - bílá barva, 50% - žlutá barva, 100% - červená barva) pro danou plodinu aplikovanou v průmyslových hnojivech (ledek vápenatý) v termínech/fázích obvyklých pro danou plodinu. Zelená barva: stříšky (stres suchem), oranžová barva: bezorebný management (adaptační technologie s druhově bohatými meziplodinami). Hvězdičky značí umístění čidel vlhkosti půdy.

Převažujícím půdními typy jsou kambizem a pseudoglej (hlavní půdní jednotky dle mapování BPEJ : 19 a 47). Klimatický region mírně teplý, mírně vlhký (MT2) s průměrnou teplotou mezi 7 a 8 °C a průměrným úhrnem srážek od 550 do 650 mm.

Sledovány byly vlivy aplikace dusíku (dávka 0, 50 a 100 kg.ha⁻¹ pro ječmen; dále 0, 70 a 140 kg.ha⁻¹ pro pšenici), biouhlu (ve výsledcích varianta značena „B“, dávka 9 t.ha⁻¹), kompost („C“, dávka 90 t.ha⁻¹), kompostovaný biouhel („CB“, dávka 90 t.ha⁻¹). Aplikace biouhlu proběhla v dělené dávce s následným zapravením do půdy (15.3. a 26.9.2017 a 10.10.2018.). Biouhel pro aplikaci do půdy byl dodán firmou BIOUHEL.CZ s.r.o. (produkt označovaný jako agrouhel). Biouhel byl vyroben v rotorovém reaktoru s nepřímým ohřevem (KARBOTECH 250) z dřevní štěpky ze směsi odpadního měkkého a tvrdého dřeva. Výroba biouhlu probíhala při teplotě 450-650 °C a výsledný produkt byl separován a pro aplikaci použita frakce 3-20 mm. Biouhel byl aplikován rovnoměrně na povrch půdy a okamžitě po aplikaci zapraven radličkovým kypřičem (jarní aplikace) nebo orbou (podzimní aplikace). Část políček byla v období prodlužovacího růstu, metání a začátku zrání zakryta stříškami (simulace stresu suchem). V roce 2018 bylo pěstováno žito konvenčním způsobem a po sklizni (v roce 2019) založena na polovině parcel adaptační technologie (AT) výsevem druhově bohaté meziplodiny a následným bezorebným výsevem pšenice, zatímco na druhé polovině parcel proběhla orba, příprava půdy a setí – konvenční technologie (CT). V roce 2019 (výsev podzim 2018) byla na obou lokalitách pěstována ozimá pšenice (odrůda Matchball). V roce 2020 pak byl stejným způsobem pěstován ječmen jarní (odrůda Bojos).

Vzorkování půd proběhlo na podzim v roce 2020 (po sklizni jarního ječmene), sledované půdní vlastnosti: pH ve vodě a v CaCl₂; obsah živin ve výluhu Mehlich III (mg.kg⁻¹): Ca, K, Mg, Fe, Al, Mn, P; H⁺ a KVK (mmolchekv.kg⁻¹), Cox (%), N (%), koeficient Q4/6. Výsledky byly statisticky testovány pomocí faktoriální ANOVy (hlavní efekty a jejich kombinace), mnohonásobné porovnávání pak pomocí Tukeyho testu. Vedle (fyzikálně)chemických vlastností byly vzorky také analyzovány na zrnitostní složení pomocí laserové difrakce.

Z hlediska produkčních a kvalitativních parametrů zemědělských plodin byly sledovány: nadzemní biomasa (t.ha⁻¹), výnos zrna (t.ha⁻¹), obsah proteinů v zrně (%) a to pro 2 plodiny: ječmen jarní (2020) a pšenice ozimá (2019).

3.1.2 Výsledky

3.1.2.1 Půdní vlastnosti

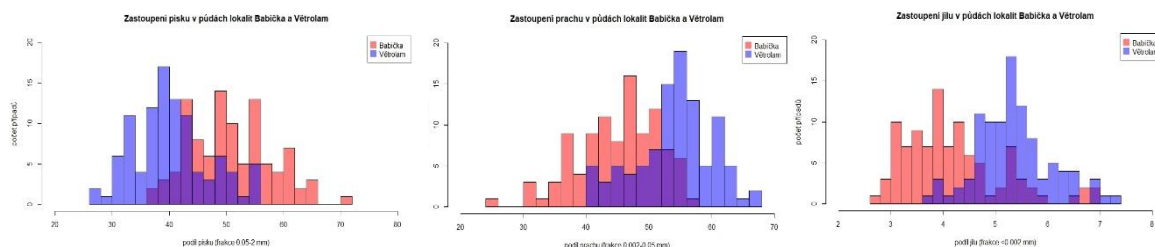
Výsledky statistického testování jsou pro názornost shrnuty v tabulce č. 1. Faktory (kategoriální proměnné) vstupující do analýzy: Lokalita (Babička, Větrolam), Hnojivá dávka N (žádná vs 100% dávky pro danou plodinu, tj. pšenice 140 kg.ha⁻¹, ječmen 100 kg.ha⁻¹), Aplikace do půdy (B...biouhel, C...kompost, BC...kompostovaný biouhel, K...kontrola bez aplikace). Výsledky Tukeyho testu ukazují na statisticky významné rozdíly mezi variantami aplikací různých materiálů do půdy (B, BC, C, K). Tabulka pro přehlednost neobsahuje půdní parametry, u nichž nebyly prokázány statisticky významné rozdíly ve variantách aplikací.

Tabulka 1: Přehled výsledků faktoriální ANOVy - testování jednotlivých efektů a jejich případných kombinací. Vysvětlivky: sign. = signifikantní faktor, BS...bazická saturace, B...biouhel, BC, kompostovaný biouhel, C...kompost, K...kontrola, AT...adaptační technologie, CT...konvenční technologie.

Půdní vlastnost	Intercept	Lokalita	Dávka N	Aplikace (B, BC, C, K)	Management (AT, CT)	Kombinace	Tukey test: neliší se
pH (H ₂ O)	sign.	sign.	---	sign.	---		B+K; C+BC
BS	sign.	sign.	---	sign.	---		B+K; C+BC
Cox	sign.	---	---	sign.	sign.		C+BC; B+all
N	sign.	---	---	sign.	---	N*amend.	B+K; C+BC

Mg	sign.	sign.	---	sign.	sign.		B+K; C+BC
K	sign.	---	sign.	sign.	---	N*amend.	B+K
P	sign.	sign.	sign.	sign.	---		B+K

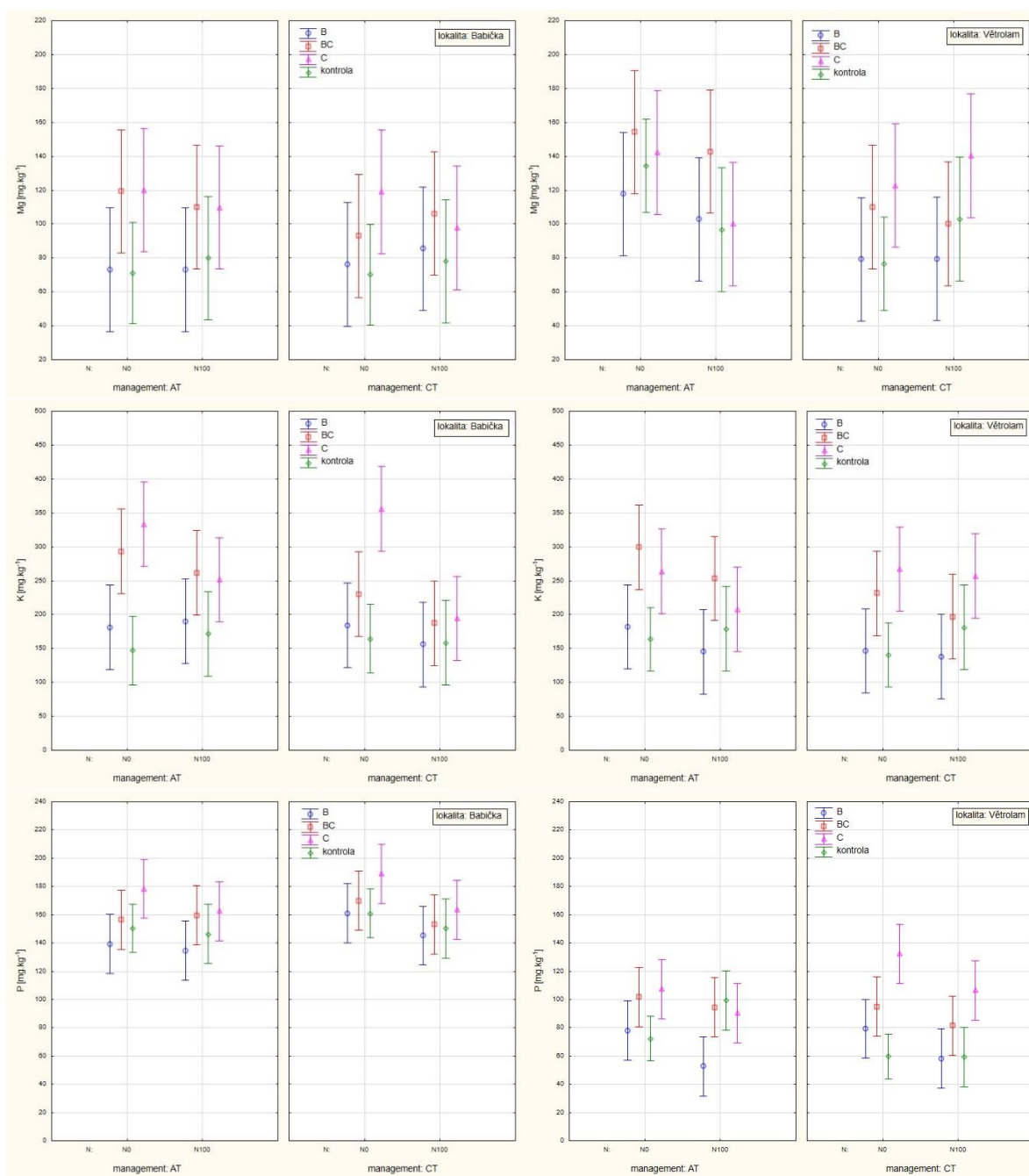
Analýza zrnitostí půd prokázala rozdíly mezi oběma lokalitami. Na obr. 2 je z histogramů patrný písčitéjší charakter lokality Větrolam, naopak lokalita Babička se vyznačuje vyšším zastoupením prachovité a jílovité frakce.



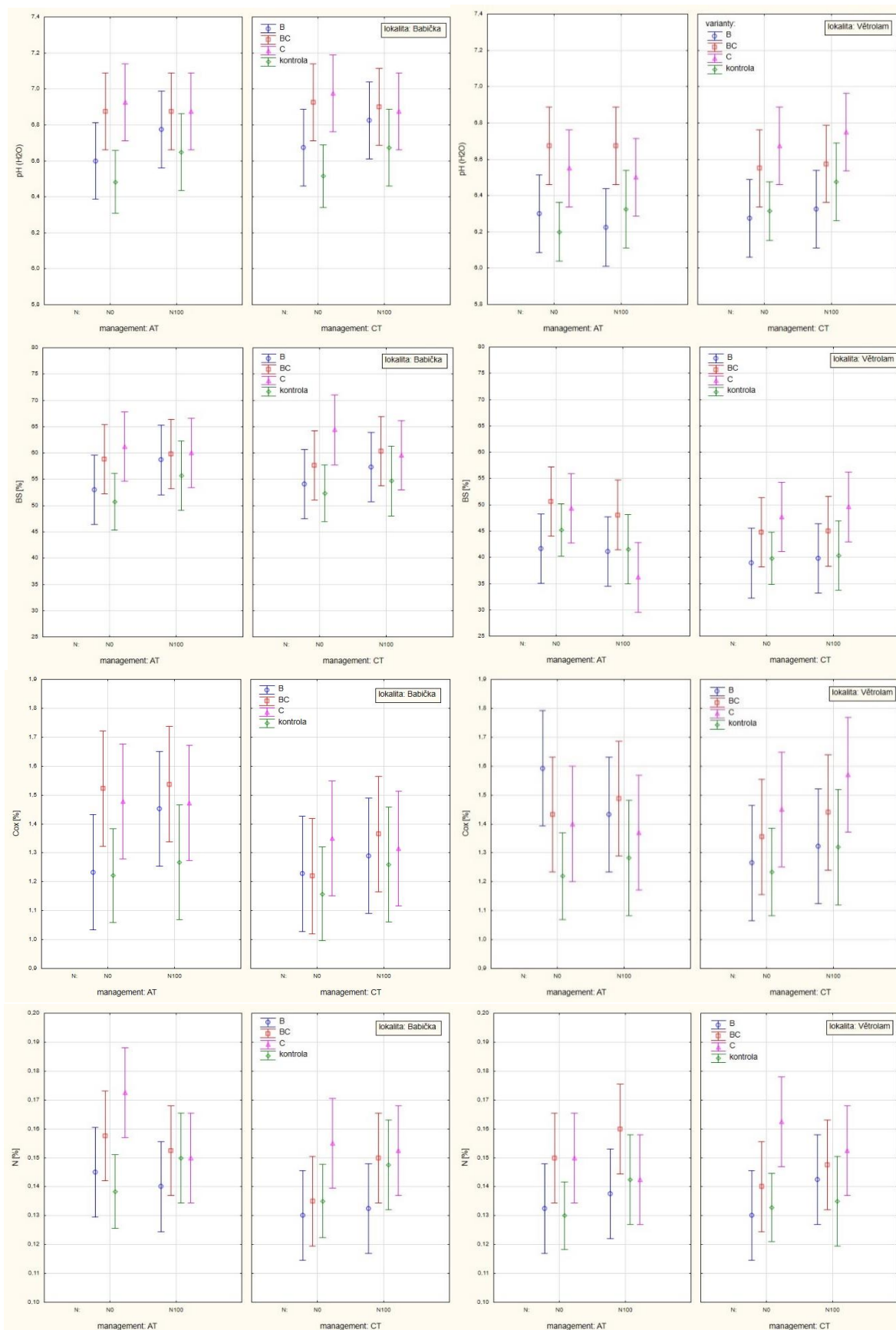
Obrázek 2: Histogramy zrnitostní frakcí (písek 0,05-2mm; prach 0,002-0,05 mm; jíl pod 0,002 mm) půdních vzorků. Srovnání lokalit Babička a Větrolam.

Rozdílné zrnitostní složení se promítá do nižších hodnot některých chemických parametrů, např. půdní reakce, bazické saturace či obsah fosforu (viz obr. 3 a 4).

Z výsledků půdních analýz vyplývá napříč všemi půdními valnostmi relativně častá podobnost (statisticky neprůkazné rozdíly mezi průměry) varianty (čistého) biouhlu s kontrolní variantou a varianty kompostu s kompostovaným biouhlem (viz tab. 1, sl. Tukeyho test a příslušné grafy na obr. 3 a 4). **Právě kompost, příp. kompostovaný biouhel výrazně zlepšuje půdní vlastnosti.** Tyto trendy jsou výraznější u půd nehnojených dusíkem. Jediným případem, kdy čistý biouhel měl lepší výsledek než ostatní varianty, je obsah Cox pro dusíkem nehnouanou půdu v režimu adaptační technologie (no-till s druhově bohatými meziplodinami) pro písčitéjší půdy lokality Větrolam – patrně pro stabilitu pyrolyzovaného uhlíku, který je hůře rozložitelný. Adaptační technologie v kombinaci s využitím kompostu má pozitivní efekt na obsah uhlíku v porovnání s konvenčním způsobem obhospodařování. Tyto výsledky potvrdily, že efekt biouhlu na změnu půdních vlastností je v krátké době po aplikaci v zásadě neutrální, tak jak to uvádí řada literárních zdrojů (např. Adhikari et al., 2022) což je způsobeno nízkou vazebnou schopností funkčních skupin na povrchu biouhlu, které získávají schopnost po jejich oxidaci na skupiny OH, CO, COOH vyšší vazby iontů. Nízká aktivace biouhlu je také dána vysokou hydrofobicitou biouhlu.



Obrázek 3: Půdní parametry Mg, K, P; porovnání variant aplikace v závislosti na lokalitě a dávce N. Aplikace: B...biouhel, BC... kompostovaný biouhel, C...kompost, K...kontrola. Dávka N 0 a 100%. Rozsah úseček značí 95% interval spolehlivosti.

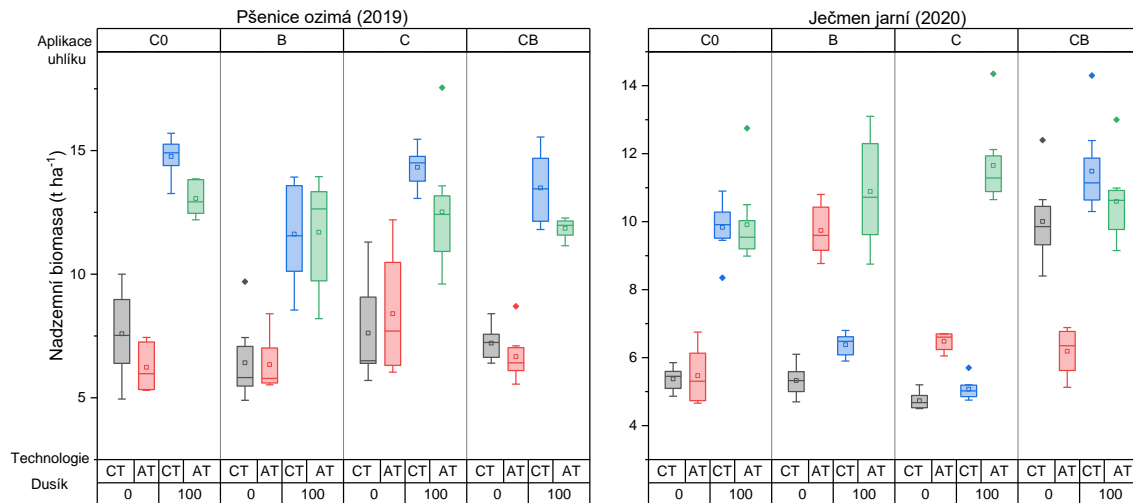


Obrázek 4: Půdní parametry pH(H₂O), bazická saturace, Cox, celkový N; porovnání variant aplikace v závislosti na lokalitě a dávce N. Aplikace: B...biouhel, BC... kompostovaný biouhel, C...kompost, K...kontrola. Dávka N 0 a 100%. Rozsah úseček značí 95% interval spolehlivosti.

3.1.2.2 Produkční parametry plodin

Výsledky analýz produkčních parametrů (nadzemní biomasa, výnos zrna a obsah proteinů v zrně) jsou přehledně znázorněny ve složených krabicových grafech pro plodiny pšenice ozimá a ječmen jarní. Pod každým grafem je stručné zhodnocení včetně vyplývajících doporučení. Shrnující komentář je v závěru kapitoly.

3.1.2.2.1 Nadzemní biomasa



Obrázek 5: Nadzemní biomasa pro jednotlivé varianty typy managementu, pšenice ozimá (vlevo) a ječmen jarní (vpravo). Aplikace uhlíku: C0...kontrola, B...biouhel, C...kompost, CB... kompostovaný biouhel; Technologie: CT...konvenční technologie, AT...adaptační technologie; Dusík: 0... bez hnojení dusíkem, 100...100% lokálně doporučené dávky dusíku, tj. 140 kg.ha⁻¹ pro pšenici, 100 kg.ha⁻¹ pro ječmen.

Pšenice ozimá

Základní hodnocení:

- Hnojení dusíkem obecně zvyšuje produkci biomasy;
- Efekt biouhlu: stejná, nebo nižší produkce biomasy jako u kontroly bez aplikace uhlíku;
- Efekt samotného kompostu: vyšší produkce biomasy napříč ostatními variantami aplikace uhlíku, kromě C0. Efekt na produkci biomasy je porovnatelný s kompostovaným biouhlem;
- Adaptační technologie u variant s aplikací dusíku snižuje mírně produkci nadzemní biomasy napříč variantami aplikace uhlíku vyjma aplikace samotného biouhlu;
- Nejlepší varianta: 1. kompost napříč technologiemi a N-hnojením, 2. C0 při N-hnojení, 3. B+CB.
- Nejhorší varianta: biouhel bez dusíku, kompostovaný biouhel bez dusíku

Doporučení: pro konvenční technologii pěstování je nevhodnější formou aplikace uhlíku kompost, nebo kompostovaný biouhel při současném hnojení dusíkem, pro adaptační technologii jsou možné všechny varianty aplikace uhlíku hnojené dusíkem.

Ječmen jarní

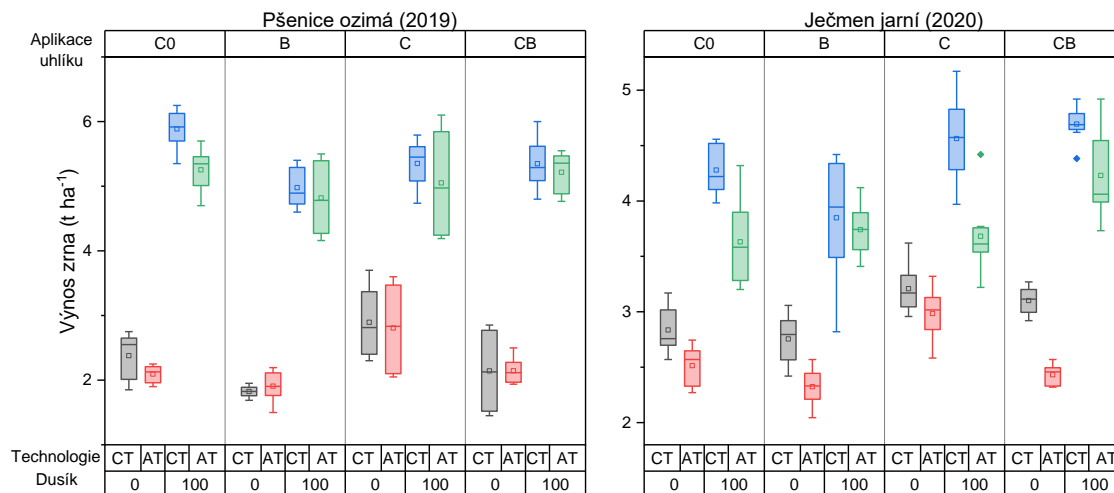
Základní hodnocení:

- Hnojení dusíkem obecně zvyšuje produkci biomasy, výjimkou je pouze konvenční technologie (CT) při současné aplikaci biouhlu nebo kompostu ;
- Efekt biouhlu: výrazně lepší výsledky jsou dosahovány u **adaptační technologie (AT** – bezorebné setí s meziplodinami), , pozitivní efekt biouhlu je lepší ještě podpořit dusíkem;

- Efekt samotného kompostu je u ječmene mírně horší než samotného biouhlu;
- Efekt kompostovaného biouhlu: zvyšuje biomasu u konvenční technologie, u adaptační technologie je dosahováno dobrého výsledku při přihnojení dusíkem;
- Nejlepší varianta:
 1. biouhel, kompost, kompostovaný biouhel s N-hnojením,
 2. kompostovaný biouhel v konvenční technologii (nejlepší s přihnojením dusíkem),
 3. biouhel v adaptační technologii bez dusíku, a v konvenční i adaptační technologii bez aplikace uhlíku, ale s přihnojením dusíkem.
- Nejhorší varianty: 1. konvenční technologie bez dusíku, kromě kompostovaného biouhlu, konvenční technologie s dusíkem (aplikace uhlíku: biouhel, kompost); 3. adaptační technologie bez dusíku (kromě biouhlu).

Doporučení: pro konvenční technologii je nevhodnější kompostovaný biouhel bez aplikace dusíku, ve variantě bez aplikace uhlíku je nevhodnější varianta hnojení dusíkem; pro adaptační technologii jsou možné všechny varianty aplikace uhlíku vždy hnojené dusíkem, nejlepší v pořadí: kompost, biouhel, kompostovaný biouhel.

3.1.2.2.2 Výnos zrna



Obrázek 6: Výnos zrna pšenice ozimé (vlevo) a ječmene jarního (vpravo) pro jednotlivé varianty managementu. Aplikace uhlíku: C0...kontrola, B...biouhel, C...kompost, CB... kompostovaný biouhel; Technologie: CT...konvenční technologie, AT...adaptační technologie; Dusík: 0... bez hnojení dusíkem, 100...100% lokálně doporučené dávky dusíku, tj. 140 kg.ha⁻¹ pro pšenici, 100 kg.ha⁻¹ pro ječmen.

Pšenice ozimá

Základní hodnocení:

- Hnojení dusíkem obecně zvyšuje výnos zrna, kompost mírně kompenzuje deficit dusíku;
- Biouhel, kompost i kompostovaný biouhel při hnojení dusíkem mají mírně negativní vliv na výnos zrna;
- Adaptační technologie nemá zásadní vliv na výnos při aplikacích uhlíku, bez aplikace uhlíku mírně snižuje výnos, zejména u varianty hnojené dusíkem;
- Nejhorší varianty: 1. konvenční i adaptační technologie bez dusíku, výnos mírně kompenzuje kompost (v konvenční i adaptační technologii).

Doporučení: pro konvenční technologii (bez aplikace uhlíku nebo s jakoukoli variantou aplikace uhlíku) vždy vyšší produktivita u variant hnojených dusíkem; pro adaptační technologii možné všechny varianty vždy hnojené dusíkem.

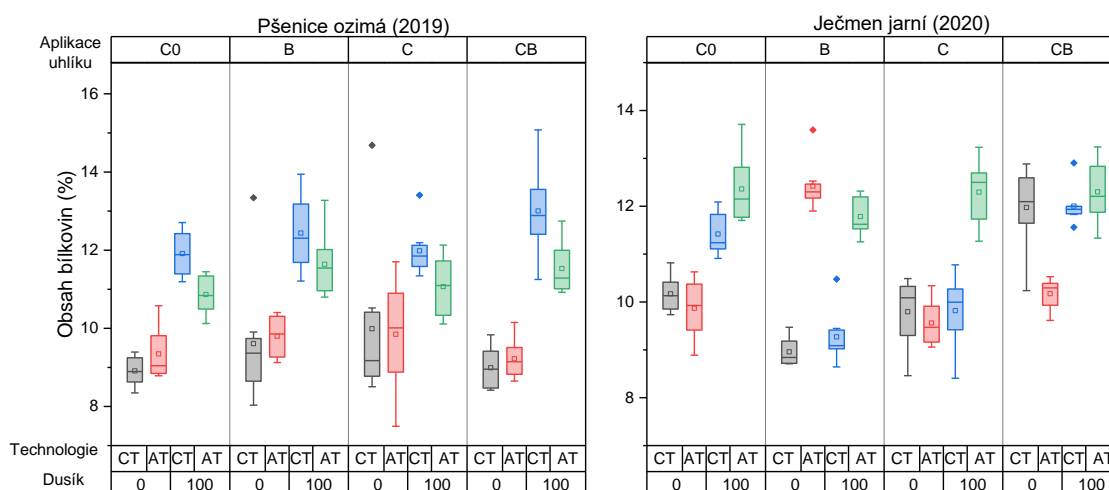
Ječmen jarní

Základní hodnocení:

- Hnojení dusíkem obecně zvyšuje výnos zrna, kompost mírně kompenzuje deficit dusíku, stejně jako kompostovaný biouhel v konvenční technologii;
- Biouhel samotný vychází v průměru hůř než kompost nebo kompostovaný biouhel;
- Adaptační technologie obecně snižuje mírně výnos zrna ječmene;
- Nejlepší varianta:
 1. Konvenční technologie s kompostem nebo kompostovaným biouhlem a hnojením dusíkem,
 2. Kompostovaný biouhel v adaptační technologii s hnojením dusíkem
- Nejhorší varianty: 1. adaptační technologie bez dusíku, mírně kompenzuje kompost (v konvenční i adaptační technologii).

Doporučení: pro konvenční technologii kompost, nebo kompostovaný biouhel v kombinaci s hnojením dusíkem, pro adaptační technologii kompostovaný biouhel s hnojením dusíkem.

3.1.2.2.3 Obsah bílkovin v zrně



Obrázek 7: Obsah bílkovin ve zrně pšenice ozimé (vlevo) a ječmene jarního (vpravo) pro jednotlivé varianty managementu. Aplikace uhlíku: C0...kontrola, B...biouhel, C...kompost, CB... kompostovaný biouhel; Technologie: CT...konvenční technologie, AT...adaptační technologie; Dusík: 0... bez hnojení dusíkem, 100...100% lokálně doporučené dávky, tj. 140 kg.ha⁻¹ pro pšenici, 100 kg.ha⁻¹ pro ječmen.

Pšenice ozimá

Základní hodnocení:

- Hnojení dusíkem obecně zvyšuje obsah bílkovin v zrně a toto zvýšení je vyšší v konvenční než adaptační technologii zejména po aplikaci biouhlu a kompostovaného biouhlu;
- Biouhel samotný vychází ve variantách s hnojením dusíkem velmi dobře, lépe pro konvenční než adaptační technologii, ca stejně jako kompostovaný biouhel, samotný kompost je mírně horší variantou zejména u variant hnojených dusíkem a v adaptační technologii;
- Nejlepší varianta:

1. konvenční technologie s hnojením dusíkem, zejména pak po aplikaci biouhlu či kompostovaného biouhlu
 2. adaptační technologie s hnojením dusíkem, opět zejména po aplikaci biouhlu či kompostovaného biouhlu,
 3. hnojení dusíkem v konvenční technologii (v adaptační mírně horší) pro kompost a variantu bez aplikace uhlíku,
- Nejhorší varianty: 1. konvenční technologie bez hnojení dusíkem, mírně kompenzuje kompost a adaptační technologie.

Doporučení: pro konvenční i adaptační technologii samotný biouhel, nebo kompostovaný biouhel při nojení dusíkem a v kombinaci s konvenční technologií.

Ječmen jarní

Základní hodnocení:

- Hnojení dusíkem obecně zvyšuje obsah bílkovin v zrně pouze v některých případech: i) v adaptační technologii bez aplikace uhlíku a u variant s aplikací kompostu a kompostovaného biouhlu, ii) v konvenční technologii jen varianty bez aplikace uhlíku a to méně než u adaptační technologie; Biouhel samotný má velký efekt v adaptační technologii bez dusíku (srovnatelný s hnojenými variantami);
- Kompost zvyšuje obsah bílkovin v zrně pouze u varianty hnojené dusíkem u adaptační technologie
- Nejlepší varianta:
 1. adaptační technologie s hnojením dusíkem, adaptační technologie s biouhlem bez dusíku,
 2. konvenční technologie s kompostovaným biouhlem bez dusíku,
 3. konvenční technologie s hnojením dusíkem bez aplikace uhlíku,
- Nejhorší varianty: 1. konvenční technologie se samotným biouhlem (bez dusíku mírně horší), 2. varianty s kompostem.

Doporučení: pro konvenční strategii kompostovaný biouhel (bez, příp. s dusíkem), pro adaptační technologii v pořadí: kompost nebo kompostovaný biouhel hnojené dusíkem, příp. biouhel bez dusíku.

Souhrn a doporučení

Výše popsané dílčí doporučení pro jednotlivé parametry půdních vlastností, kvantitativních i kvalitativních parametrů zemědělské produkce jsou shrnuty níže do přehledových tabulek Tabulka 2- Tabulka 4. Vhodnost kombinací jednotlivých aplikací a managementu byla vyhodnocena na škále od nevhodné (šedá), neutrální (bílá), vhodné (světle zelená) až po velmi vhodnou (zelená), podrobněji v Legendě.

Tabulka 2: Nadzemní biomasa - shrnutí vhodnosti variant aplikací do půdy a typu managementu.

Nadzemní biomasa	Bez aplikace (kontrola)		Biochar		Kompost		Kompostovaný biochar	
	0	100	0	100	0	100	0	100
Pšenice ozimá								
konvenční								
adaptační								
Ječmen jarní								
konvenční								

adaptační								
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--

Tabulka 3: Výnos obilí - shrnutí vhodnosti variant aplikací do půdy a typu managementu.

Grain yield (t.ha ⁻¹)	Bez aplikace		Biochar		Kompost		Kompostovaný biochar	
	0	100	0	100	0	100	0	100
dusík								
Pšenice ozimá								
konvenční								
adaptační								
Ječmen jarní								
konvenční								
adaptační								

Tabulka 4: Obsah proteinů - shrnutí vhodnosti variant aplikací do půdy a typu managementu.

Protein content (%)	Bez aplikace		Biochar		Kompost		Kompostovaný biochar	
	0	100	0	100	0	100	0	100
dusík								
Pšenice ozimá								
konvenční								
adaptační								
Ječmen jarní								
konvenční								
adaptační								

Legenda:

	Velmi nízké hodnoty, varianta se nedoporučuje
	Relativně vysoké hodnoty parametru – variantu lze dobře použít
	Velmi vysoké hodnoty parametru – varianta z hlediska parametru výhodná

Vyhodnocení vazby mezi testovanými variantami aplikace uhlíku a managementu a produkčními faktory pomocí analýzy hlavních komponent.

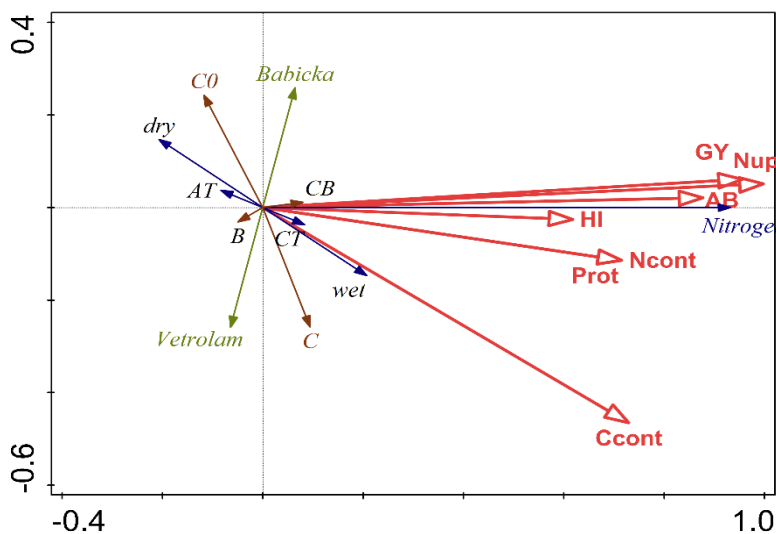
Pro vyhodnocení vztahů mezi produkčními parametry a testovanými variantami aplikace uhlíku byla použita metoda analýzy hlavních komponent (PCA) znázorněna v ordinačních diagramech na Obrázek 8. Dílčí komentáře pro obě testované plodiny (pšenice ozimá a ječmen jarní) uvádíme níže.

PCA: Pšenice ozimá - komentář:

- Produkční parametry jsou u pšenice obecně nejvíce korelovány s aplikací dusíku
- Produkční parametry jsou obecně pozitivně spojeny konvenční technologií, a variantami aplikace kompostu, příp. kompostovaného biouhlu;
- Aplikace biouhlu je s produkčními parametry asociována negativně ale efekt je velmi nízký.
- Negativně jsou s produkčními parametry spojeny adaptační technologie, vliv sucha a vartianta bez aplikace uhlíku;
- Závěry jsou relativně obecně platné pro obě lokality (Babička vs Větrolam) které ovšem mají odlišný produkční potenciál;
- Většina produkčních parametrů je navzájem korelována včetně obsahu bílkovin v zrně.

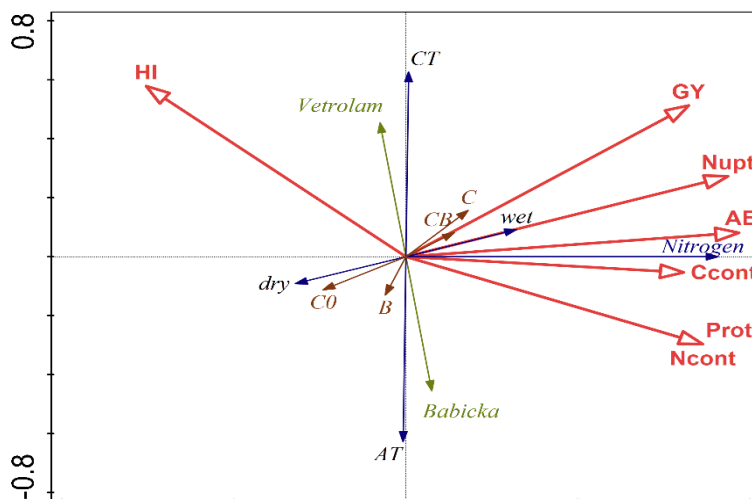
PCA: Ječmen jarní - komentář:

- Podobně jako u pšenice jsou produkční parametry ječmene nejsilněji korelovány s aplikací dusíku;
- Adaptační technologie vs. konvenční technologie, podobně jako lokalita modifikují úroveň výnosových parametrů ale zásadněji nepřispívají k vlivu aplikace uhlíku či managementu;
- Pozitivně je s produkčními parametry asociována aplikace kompostu a kompostovaného biouhlu, biouhel samotný má velmi malý (spíše nnegativní) vliv, varianta bez aplikace uhlíku je negativně asociována s produkčními parametry;
- Sucho je podobně jako u pšenice negativně spojeno s produkčními parametry;
- Produkční parametry jsou navzájem korelovány vyjma harvest indexu, který je na rozdíl od pšenice negativně asociován s ostatními produkčními parametry.



Vysvětlivky

HI... harvest index, sklizňový index (poměr výnosu zrna k celkové nadzemní biomase);
 GY ... výnos zrna ($t \cdot ha^{-1}$);
 Nupt.. množství sklizeného (přijátého) dusíku ve zrně ($kg \cdot ha^{-1}$);
 Ncont... obsah dusík v zrně (%);
 AB... produkce nadzemní biomasy ($t \cdot ha^{-1}$);
 Prot... obsah bílkovin v zrně (%);
 AT... adaptační technologie, CT ... konvenční technologie;
 Dry...stresováno suchem; wet... nestresováno suchem (ponecháno přirozené úrovni srážek);
 CO...bez aplikace uhlíku (kontrola), B...biouhel, C...kompost, CB... kompostovaný biouhel.



Obrázek 8: Analýza hlavních komponent - vztahy produkčních parametrů plodin k faktorům aplikací a managementu. Pšenice ozimá (nahore) a ječmen jarní (dole).

PCA: Souhrn a doporučení

V návaznosti na výsledky v tabulkách Hnojení dusíkem obecně zvyšuje obsah bílkovin v zrně pouze v některých případech: i) v adaptační technologii bez aplikace uhlíku a u variant s aplikací kompostu a kompostovaného biouhlu, ii) v konvenční technologii jen varianty bez aplikace uhlíku a to méně

než u adaptační technologie; Biouhel samotný má velký efekt v adaptační technologii bez dusíku (srovnatelný s hnojenými variantami);

- Kompost zvyšuje obsah bílkovin v zrně pouze u varianty hnojené dusíkem u adaptační technologie
- Nejlepší varianta:
 1. adaptační technologie s hnojením dusíkem, adaptační technologie s biouhlem bez dusíku,
 2. konvenční technologie s kompostovaným biouhlem bez dusíku,
 3. konvenční technologie s hnojením dusíkem bez aplikace uhlíku,
- Nejhorší varianty: 1. konvenční technologie se samotným biouhlem (bez dusíku mírně horší), 2. varianty s kompostem.

Doporučení: pro konvenční strategii kompostovaný biouhel (bez, příp. s dusíkem), pro adaptační technologii v pořadí: kompost nebo kompostovaný biouhel hnojené dusíkem, příp. biouhel bez dusíku.

Souhrn a doporučení

Výše popsané dílčí doporučení pro jednotlivé parametry půdních vlastností, kvantitativních i kvalitativních parametrů zemědělské produkce jsou shrnuty níže do přehledových tabulek Tabulka 2-Tabulka 4. Vhodnost kombinací jednotlivých aplikací a managementu byla vyhodnocena na škále od nevhodné (šedá), neutrální (bílá), vhodné (světle zelená) až po velmi vhodnou (zelená), podrobněji v Legendě.

Tabulka 2 až Tabulka 4 a také na obrázku Obrázek 8 lze a na dílčí závěry, lze shrnout pro obě plodiny tato doporučení:

Pšenice ozimá

Nadzemní biomasa ($t \cdot ha^{-1}$): pro konvenční technologii kompost, nebo kompostovaný biouhel v kombinaci s hnojením dusíkem, pro adaptační technologii možné všechny varianty vždy hnojené dusíkem.

Výnos zrna ($t \cdot ha^{-1}$): pro konvenční technologii (bez aplikace nebo s jakoukoli variantou aplikace uhlíku) vždy hnojené dusíkem; pro adaptační technologii možné všechny varianty aplikace uhlíku vždy hnojené dusíkem.

Obsah bílkovin (%): pro konvenční i adaptační technologii samotný biouhel, nebo kompostovaný biouhel obojí při hnojení dusíkem.

Konvenční technologie obecně vykazuje z produkčního hlediska lepší výsledky než adaptační. U biomasy a obsahu bílkovin jasně, u výnosu zrna není rozdíl tak markantní, vždy ve variantě s hnojením dusíkem. Obecné doporučení jak pro konvenční tak adaptační technologii: použití kompostu, nebo kompostovaného biouhlu s hnojením N.

Ječmen jarní

Z produkčního hlediska je pro nadzemní biomasu nejlepší varianta použití čistého nebo kompostovaného biouhlu nebo kompostu (mírně lepší je kompost) a to **v adaptační technologii** při hnojení dusíkem. Z konvenční technologie je srovnatelný kompost bez hnojení dusíkem. Podobně výsledky vyznívají pro adaptační technologii v *obsahu bílkovin*, které jsou konstantně vysoké pro varianty hnojené dusíkem (a aplikaci biouhlu bez dusíku) a také pro konvenční technologii u aplikace

kompostu. Naopak výnos zrna vychází jednoznačně pro konvenční technologie ve hnojených variantách následované stejnou variantou v adaptační technologii.

Obecně lze univerzálně doporučit pro jarní ječmen adaptační technologie (lze i konvenční) s čistým nebo kompostovaným biouhlem přihnojeným dusíkem, které mají pozitivní vliv zejména na obsah bílkovin (krmný ječmen), zatímco z pohledu výnosu lze spíše doporučit konvenční technologii hnojenou dusíkem s aplikací kompostu či kompostovaného biouhlu.

Shrnutí výsledků za obě plodiny

Výnosové hodnocení v prvních dvou letech po aplikaci biouhlu a porovnání s kompostem či kompostovaným biouhlem ukazují, že surový biouhel se chová z pohledu vlivu na výnos neutrálně nebo dokonce výnos mírně snižuje. Hlavním důvodem jsou pravděpodobně fyzikálně-chemické vlastnosti biouhlu, který se vyznačuje jednak vysokou hydrofobicitou a také velmi nízkou kapacitou výměny iontů. V podmínkách se sníženou dostupností vody tak může biouhel hrát v krátké době po aplikaci dokonce mírně negativní roli. Naopak aplikace kompostovaného biouhlu se projevuje pozitivním vlivem na výnos ať již na úrovni samotného kompostu nebo mírně nižší. Tyto výsledky indikují, že díky procesu kompostování došlo ke změně fyzikálně-chemických vlastností biouhlu či jeho biologické aktivaci, která zahrnuje rovněž osídlení struktur biouhlu mikroorganismy. Aplikace kompostovaného biouhlu se projevuje pozitivně na výnose zejména až ve druhém roce. To indikuje, že ani v případě biouhlu aktivovaného kompostováním, nemusí být pozitivní efekt okamžitý. Oproti surovému biouhlu je ovšem zřejmé, že aktivace biouhlu kompostováním může do značné míry urychlit nezbytné změny vlastností biouhlu, které jsou důležité pro růst a produktivitu zemědělských plodin.

3.1.3 Praktické aspekty využívání biouhlu v zemědělství

Praktické aspekty využívání biouhlu v zemědělství lze shrnout do několika bodů:

1. **Výběr vhodného biouhlu:** Existuje mnoho různých typů biouhlu, takže je důležité vybrat ten, který nejlépe vyhovuje konkrétním potřebám. Například je možné zvolit biouhel s vysokým obsahem uhlíku pro zlepšení struktury půdy a pro dlouhodobé ukládání uhlíku nebo biouhel s vyšším obsahem živin pro zvýšení kombinaci zlepšených fyzikálních vlastností půdy, dlouhodobého ukládání uhlíku a výživy rostlin. Aktuální je také prioritní využití biouhlu coby sorbenta půdní vody. Tyto parametry je třeba konzultovat s prodejcem, který by měl vlastnosti prodáváného produktu garantovat a také standardně chemické a fyzikální vlastnosti u výrobku uvádí. Biouhel vyráběný pyrolýzou při vyšších teplotách (nad 600 °C) vytváří velmi dobře strukturované vrstvy uhlíku převážně aromatické povahy s vysokým povrchem, nicméně v důsledku deoxygenace a dehydratace biouhel obsahuje na svých površích méně funkčních skupin obsahujících kyslík a vodík, a v důsledku toho je počáteční iontová výměnná kapacita poměrně nízká. Biouhel vyráběný pyrolýzou při nižších teplotách (350-450 °C) vykazuje naproti tomu vyšší rozmanitost z vyšším podílem vodíku, C=O vazeb společně s celulóзовými a alifatickými strukturami (Panwar and Pawar, 2022). Významnou negativní úlohu pro rychlé zajištění očekávaných funkcí biouhlu v půdě (především zvýšení polní vodní kapacity a kationtové výměnné kapacity) má jeho hydrofobita, která naopak může být významným problémem pomalé aktivace v případě biouhlu vyráběného při nižších teplotách (nejvyšší hydrofobita je dosahována při výrobních teplotách okolo 400 °C, Adhikari et al., 2022). Prakticky vždy biouhel nedosahuje okamžitě po výrobě optimálních vlastností pro účely, ke kterým je používán. Zatímco biouhel vyráběný při vysokých teplotách vyžaduje především chemickou aktivaci pro zlepšení iontové výměnné kapacity (Panwar and Pawar, 2022), v případě biouhlu vyráběného při nižších teplotách je nezbytné zajistit zvýšení množství hydrofilních skupin (OH, CO, COOH) na povrchových strukturách biouhlu díky oxygenaci v procesu stárnutí (ca 1

rok, Adhikari et al., 2022) nebo lépe prostřednictvím biologické aktivace, kdy vedle oxygenace povrchových funkčních skupin dochází také ke kolonizaci struktur biouhlu prospěšnými mikroorganismy. Biologická aktivace biouhlu kompostováním má rovněž další výhody z pohledu snadnější a rovnoměrnější aplikace, který je jinak vysoce prašný a jeho aplikace stroji čteně distribuce velikostních frakcí je velmi nerovnoměrná. Výhodou kompostování biouhlu může být rovněž skutečnost, že biouhel na sebe jak fyzikálně, tak i chemicky váže část živin, které jsou následně uvolňovány postupně a nedochází tak k rizikům jejich úniku vyplavováním nebo do atmosféry jako např. u dusíku N_2 či N_2O .

Obecně platí (i na základě zkušeností a závěrů této studie), že účinnost pozitivních efektů biouhlu lze významně zvýšit jeho aktivací, např. kompostem (což na druhou stranu může zvyšovat náklady).

2. Na jaké půdy? Pozitivní efekt biouhlu je větší na půdách lehčích, písčitých s malým obsahem organického uhlíku a nízkou nasyceností sorpčního komplexu bazemi. Na druhou stranu, biouhel však má potenciál vylepšit půdní strukturu těžších půd, i když může postupně dojít k zaplnění pórů biouhlu jílovitými částicemi a tím ke ztrátě některých pozitivních fyzikálních vlastností a schopnosti poutat vodu. Naopak, ekonomicky i z hlediska ekologických funkcí je méně efektivní aplikace biouhlu na půdách přirozeně úrodných.. Biouhel by měl být aplikován zapravením do půdy orbou nebo alespoň mělkým kypřením, protože bez zapravení může docházet k odnášení lehkých částic větrem.

3. Aplikace biouhlu: Biouhel můžete aplikovat různými způsoby. Biouhel by měl být aplikován zapravením do půdy orbou nebo alespoň mělkým kypřením, protože bez zapravení může docházet k odnášení lehkých částic větrem. Alternativu u bezorebných technologií představuje aplikace do mulče zbytků rostlin nebo do malého porostu meziplodiny, které následně chrání biouhel před odnosem větrem. V případě bezorebných technologií ale dochází k mísení biouhlu s půdou jen na povrchu půdy a tím může být zpomalena jeho aktivace.

Pro zahrádkářské využití je možné zalévání: Po aplikaci biouhlu je půda důkladně zavlažena, aby se biouhel dobře promíchal s půdou a začal působit.

4. Péče o půdu a monitoring: Po aplikaci biouhlu je vhodné pravidelně sledovat stav půdy a případně provádět další úpravy, jako je dodatečná aplikace biouhlu nebo hnojiva. To zpravidla vyžaduje pravidelné vzorkování půdy a laboratorní analýzy. Užitečné je současně sledovat zdravotní stav pěstovaných plodin a jejich produkční parametry.

5. Průběžné konzultace s odborníky a poradci. Lze využít např. služby poradců v zemědělství sdružených v Komoře zemědělských poradců České republiky (<https://www.kzpcr.cz/>). Lze také konzultovat zapojení do některých z projektů uhlíkového zemědělství (carbon farming), např. Carbonneg, které finančně zvýhodňují zemědělské praktiky vedoucí k navýšení stabilně uloženého uhlíku v půdě. Dalšími organizacemi, které poskytnou užitečné informace jsou: Český spolek pro regenerativní zemědělství (<https://www.regenerative.cz/>) a V4 Biochar Platform (<https://v4biochar.czu.cz/cs>).

6. jako perspektivní se jeví vícenásobné využití biouhlu v celém procesu farmy, tj. nejdříve využití jako podestýlka do stájí, či jako přísada do krmiva (např. drůbež, ale i skot), tímto se biouhel přirozenou cestou aktivuje a teprve v druhém kroku jej aplikujeme na produkční plochy polí. Multiplikační efekt využití biouhlu během celého procesu tak zvyšuje i jeho ekonomickou efektivitu.

3.2 Využití biouhlu v lesnictví

3.2.1 Úvod

Středoevropské lesy čelí mnoha výzvám. Jedna ze současných je příprava hospodářských lesů na očekávané změny klimatu. Biouhel a jeho aplikace do půdy je jednou z nemnoha příležitostí, jak lze lesům poměrně jednoduchým způsobem pomoci. Aplikace biouhlu není pro naše lesy navíc nic nového. Žďárění se zde provádělo již od samotného počátku existence moderního člověka. Pálení dřevěného uhlí v milířích bylo u nás také po velmi dlouhou dobu tradičním řemeslem – a z něj mj. naše poznatky vycházejí.

Tvorbou a aplikací biouhlu do půd lze nejen zlepšit jejich fyzikální a chemické vlastnosti, ale též bezpečně uložit množství uhlíku zachyceného předtím fotosyntézou z ovzduší.

Metodika aplikace biouhlu zkoumá a vychází z následujících předpokladů:

- Po těžbě zůstává v lese značné množství nehroubí, bez významnějšího produkčního užitku a s omezeným užitkem mimoprodukčním;
- V lesích, kde se nevyplatí těžba, zůstává tlející biomasy řádově více;
- Stabilita a tím i produkce lesních porostů je ovlivněna nejen dřevinnou skladbou, ale i probíhající klimatickou změnou;
- Lesy mají potenciál stát se významným úložištěm uhlíku v době nutné pro překlenutí a dosažení klimatické neutrality;
- Stabilní lesy mají potenciál stát se *hot-spot* biodiverzity v intenzivně obhospodařované kulturní krajině.

3.2.2 Postup odvození hodnot v metodice

Odvození potenciálního množství biouhlu vychází z empirických předpokladů lesnické praxe, které jsou shrnuty v Tab. 5. Na základě této úvahy je předpokládaná dávka, s níž pracuje i tato certifikovaná metodika, 10 t ha^{-1} (1 kg m^{-2}).

Tabulka 5: Výpočet aplikace biouhlu do lesních půd. Zdroj: Syrový et Kavka: Agronormativy, empirická data LS Hanušovice a Biouhel, s.r.o.

	smrk	dub
Množství zbytků po těžbě - nehroubí (m^3/ha)	600	400
Hustota dřeva (kg/m^3)	455	670
Hmotnost nehroubí (t/ha)	273	268
Výtěžnost biouhlu z nehroubí (%)	0,25	0,25
Potenciální množství biouhlu (t/ha)	68,25	67
Koeficient ztráty během procesu (%)	0,15	0,15
Aplikace biouhlu (t/ha)	10,24	10,05

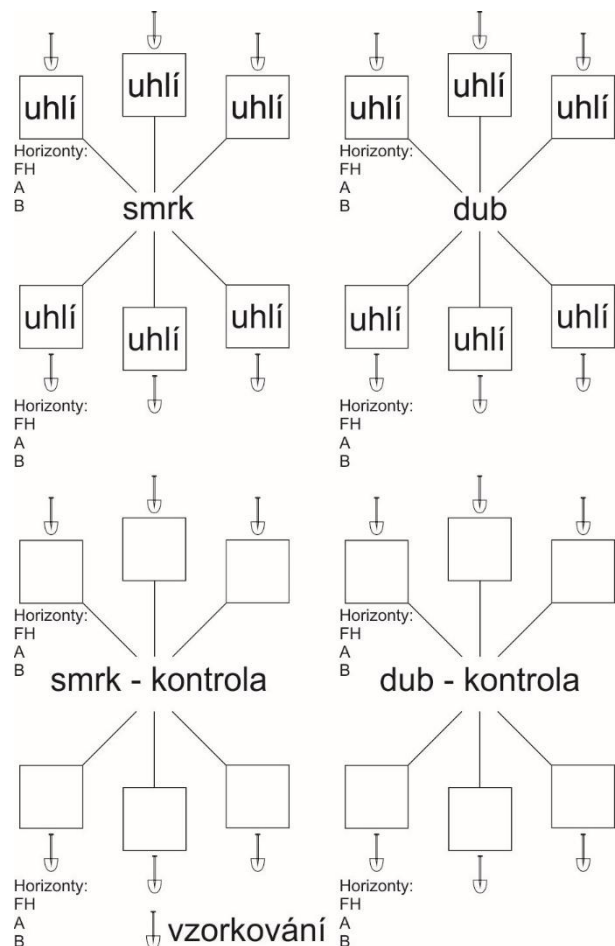
3.2.3 Postup výroby biouhlu

Pomocí dostupných sekaček na větve lze z nehroubí po lesní těžbě vytvořit polínka o délce 5-12 cm. Takto vzniklou dendromasu přeměníme v místě těžby na biouhel pomocí jednoduché přenosné pece (např. oregonská pec Kon-tiki). V peci je po většinu procesu teplota $450 - 750 \text{ }^\circ\text{C}$. Výsledná vlhkost biouhlu pak činí 5 – 15 %

3.2.4 Vpravení biouhlu do lesní půdy

Připravený biouhel není třeba homogenizovat ani rozdrtit a lze po vychladnutí rovnou aplikovat na povrch lesní půdy v množství 1 kg.m⁻².

3.2.5 Design pokusu

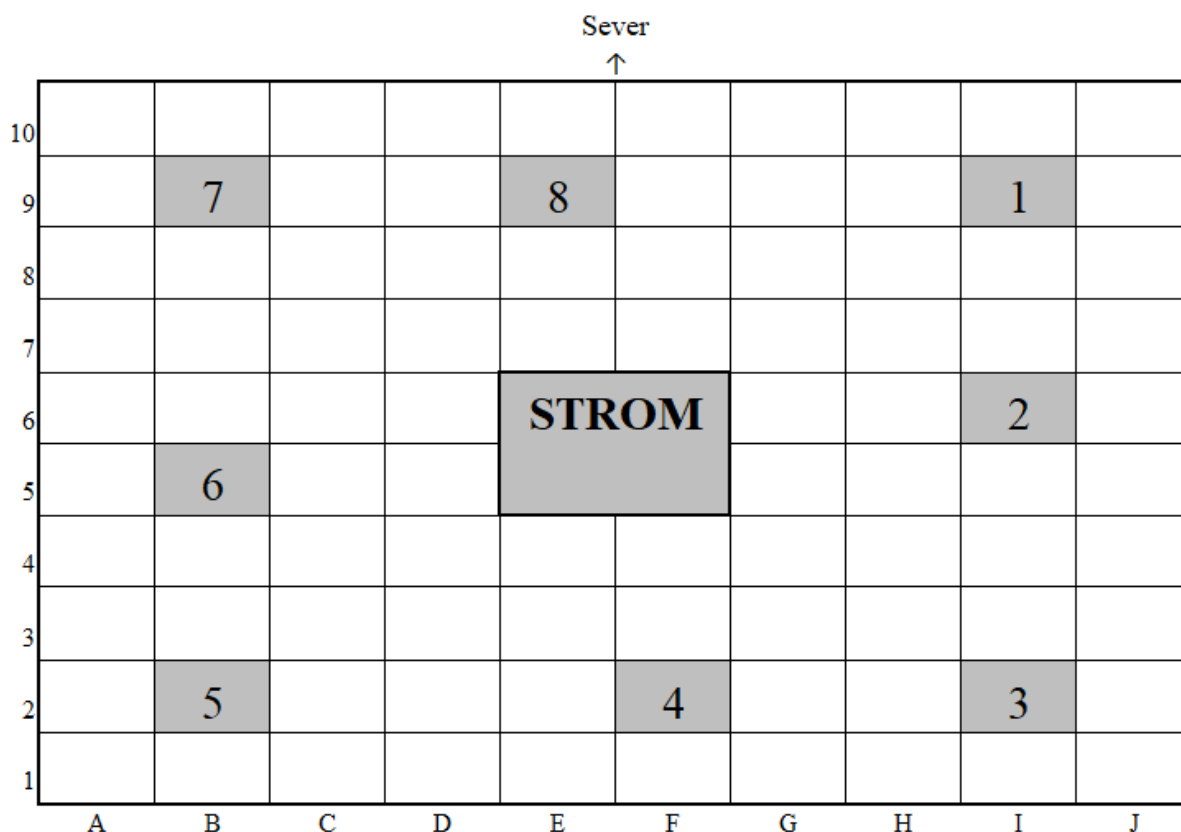


Pokusná lokalita experimentu implemetace biouhlu pro zjištění změn půdně-biologických vlastností (kap. 2.7.) v čase byla založena jako párová v Diecézních lesích Hradec Králové u obce Sruby (50.0070892N, 16.1720667E). V bukovém a smrkovém hospodářském stejnověkém porostu bylo zvoleno 12 párových míst o velikosti 10x10 m (pokusná plocha s uhlím a kontrolní stanoviště; obr. 1). Plochy byly vzorkovány před aplikací biouhlu (květen 2020) a následně proběhly odběry po třech, šesti a dvanácti měsících od založení experimentu (kap. 2.8.). Důležité pro metodiku je, že kontrolní a pokusné plochy v páru se přírodními poměry výrazně neliší. Vzhledem ke krátkému období sledování, byla pro stanovení dlouhodobého vývoje půdně-biologických podmínek hodnocena i historická míříšťě (kap. 2.9.)

Obrázek 9: Schéma zaležení experimentu pro aplikaci biouhlu do půdy v lesním prostředí

3.2.6 Sledované charakteristiky lesních půd a metody sběru

Na každém stanovišti podle schématu níže (obr. 2) byly odebrány půdní vzorky z půdní sondy, a to přítomné horizonty v čase 0 (FH, A, B), +3 (FH, A), +6 (FH, A) a +12 měsíců (FH, A, B). Změřeny byly mocnosti horizontů a sondy byly následně popsány.



Obrázek 10: Schéma vzorkování půdy v čase 1 - počáteční odběr, 2 - 3 měsíce, 3 - 6 měsíců, 4 - 12 měsíců a označení budoucích vzorkovacích míst.

3.2.6.1 Fyzikální a chemické vlastnosti půd

Odebrané půdní vzorky byly usušeny (40 °C) a přesáty přes síto s velikostí ok <2 mm. V takto předpřipravených půdních vzorcích bylo stanoveno aktivní a v 0,01 M roztoku CaCl₂ výměnné pH (pH_{H₂O} a pH_{CaCl₂}), dále byla provedena extrakce 0,1 M BaCl₂ a v tomto extraktu by stanoveny základní kationty (Al³⁺, Mn²⁺, Fe³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺) pomocí ICP-OES a H⁺ potenciometricky (Cools a Vos, 2016). Spočtena byla kationová výměnná kapacita jako suma stanovených kationtů. Půdní vzorky byly rovněž namlety na analytickou jemnost, následně byl stanoven oxidovatelný uhlík (Cox).

3.2.6.2 Mikrobiální enzymatické aktivity

Stanovení enzymové aktivity

Aktivita enzymů β-glukosidázy, fosfatázy, β-xylosidázy, chitinázy, celobiohydrolázy, β-galaktosidázy, α-glukosidázy, β-manosidázy, arylsulfatázy, a lipázy byla stanovena spektrofotometricky s využitím fluorescenčně značených substrátů. Jako fluorescenční molekula byl použit 4-methylumblyferol (MUF). Jednotlivé substráty MUF, které byly použity pro stanovení aktivit konkrétních enzymů, jsou následující:

β-glukosidáza: 2,75 mM 4-methylumbellyferyl-β-D- glukopyranosid (MUFG)

kyselá fosfatáza: 2,75 mM 4-methylumbellyferyl-fosfát (MUFP)

β-xylosidáza: 2,50 mM 4-methylumbellyferyl-β-D-xylopyranosid (MUFX)

chitináza:	1,00 mM 4-methylumbellyferyl-N-acetylglukosaminid (MUFN)
celobiohydroláza:	2,50 mM 4-methylumbellyferyl-N-cellobiopyranosis (MUFC)
β -galaktosidáza	2,50 mM 4-methylumbellyferyl-b-D-galaktopyranoside (MUFL)
α -glukosidáza	2,50 mM 4-methylumbellyferyl- α -D-glykosopyranoside (MUFaG)
lipáza	2,50 mM 4-methylumbellyferyl-kaprylát (MUFY)

Pro stanovení potenciálních aktivity enzymů byly použity suspenze tvořené 0,25 g lyofilizovaného vzorku v 50 ml 50 mM acetátového pufru s pH 5 (smícháme 2,78g octanu sodného + 1l destilované vody + 938 μ l kyseliny octové). Takto připravené vzorky byly po nezbytnou dobu uchovávány při teplotě do 4 °C. Do mikrotitrační destičky byly napipetovány jednotlivé MUF substráty a kalibrační roztoky MUF standardu v předem daném ředění. K substrátům do jamek bylo napipetovaláno 200 μ l homogenizované suspenze vzorku. Do pravé části destičky byly umístěny kalibrační řady, ve kterých postupně vzrůstala koncentrace MUF. Fluorescence byla měřena pomocí mikrodestičkového analyzátoru (Infinite F200, TECAN, Switzerland) s excitací 360 nm a emisí 465 nm (Baldrian, 2009; Pavková, 2020).

3.2.7 Počáteční a první rok – výsledky

3.2.7.1 Fyzikální a chemické vlastnosti půd

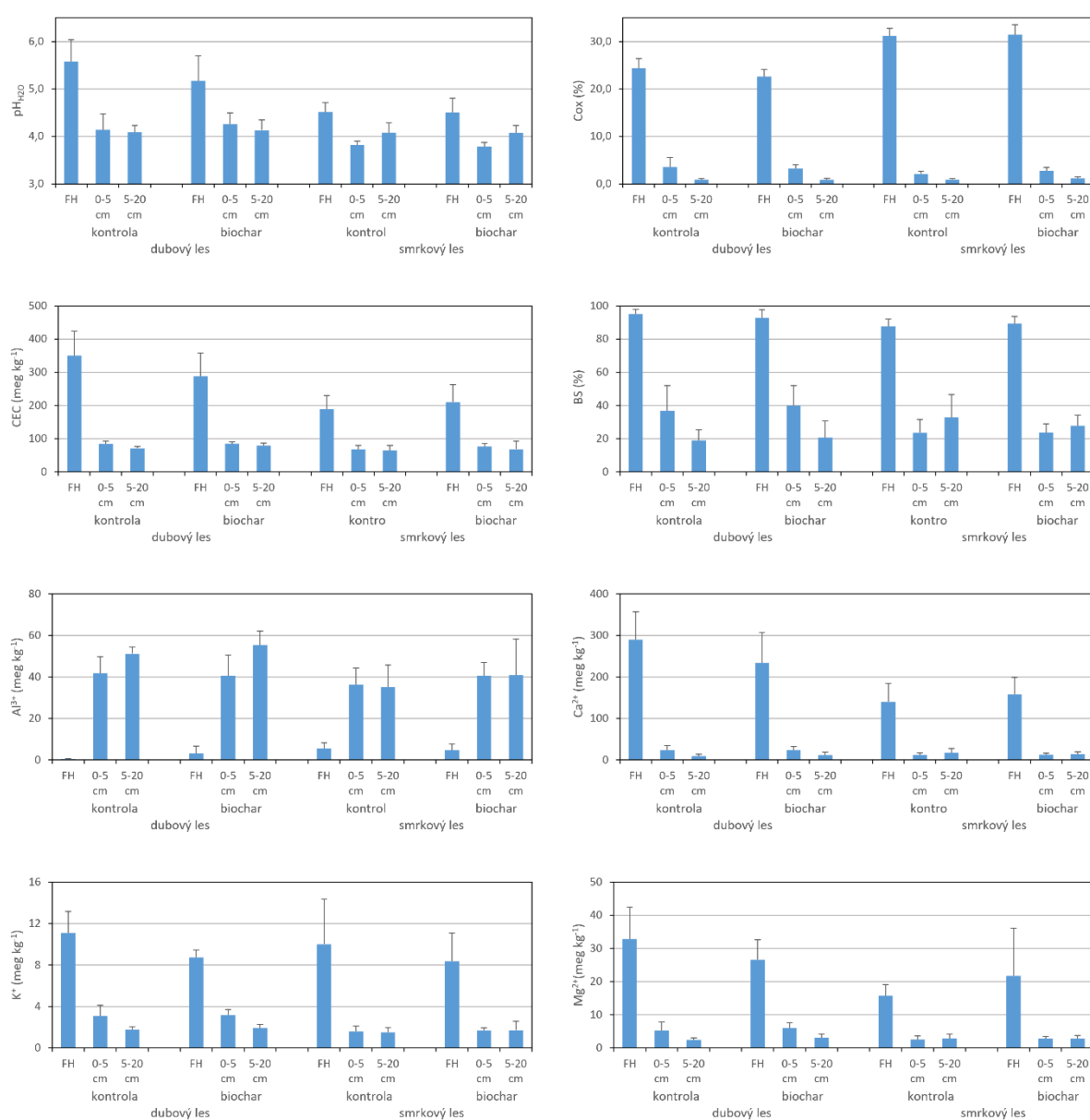
Provedené odběry půdních vzorků v čase 0 (před aplikací biouhlu) ukazují rozdíly mezi stanovišti. Půdy v dubovém porostu se vyznačují mulovými formami humusu oproti moderovým až morovým formám v půdách pod smrkovým porostem. Půdy se vyvinuly na křídovém silicifikovaném vápnitém jílovcu a slínovci a půdy byly klasifikovány jako luvizemně oglejené až pseudogleje luvické.

Vliv aplikace biouhlu na půdu byl sledován po 3, 6 a 12 měsících od aplikace. Vlastní biouhel měl výrazně alkalické aktivní pH (pH_{H_2O} ; $9,59 \pm 0,10$). V celém sledovaném období se neprokázal výrazný vliv na změnu chemických vlastností půd s aplikací biouhlu oproti půdám bez aplikace biouhlu (kontroly), a to pod smrkovým porostem. V případě dubového porostu byl pozorovatelný trend, poklesu aktivního pH a snížení množství oxidovatelného uhlíku (Cox), kationtové výměnné kapacity, výměnného K^+ a Ca^{2+} , zvýšení výměnného Al^{3+} v organických horizontech FH s aplikací biouhlu v čase +12 měsíců (Obrázek 11). Ostatní vrstvy (0-5 a 5-20 cm) nevykazovaly statisticky výrazné změny a trendy sledovaných půdních charakteristik.

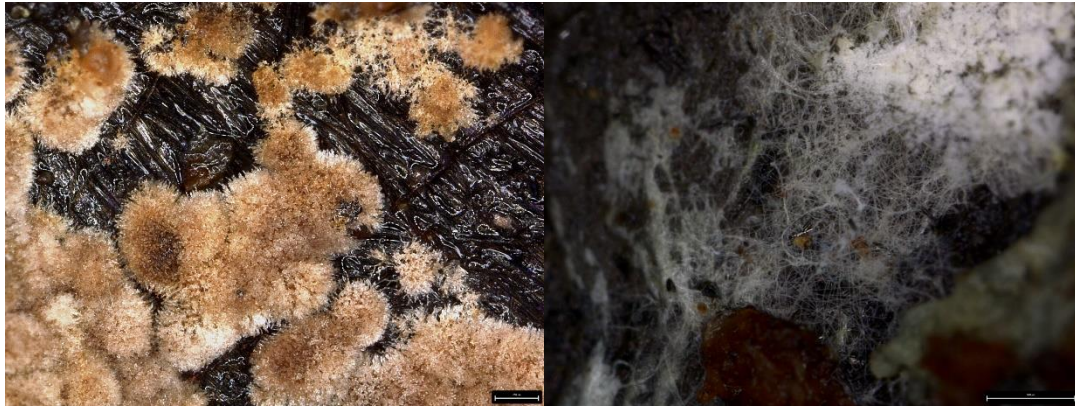
Mineralizace organické hmoty po přidání alkalického materiálu tak může krátkodobě způsobit pokles přístupných bazických kationtů a navýšení H^+ (pokles pH) a Al^{3+} v sorpčním komplexu.

Aplikovaný biouhel byl po 6 měsících po aplikaci kolonizován dobře viditelným povlakem hub pod oběma porosty (Obrázek 13). Po jednom roce došlo v dubovém porostu k překrytí biouhlu novým opadem, biouhel se dostává do většího kontaktu s půdou a je dále zapracováván do půdního prostředí.

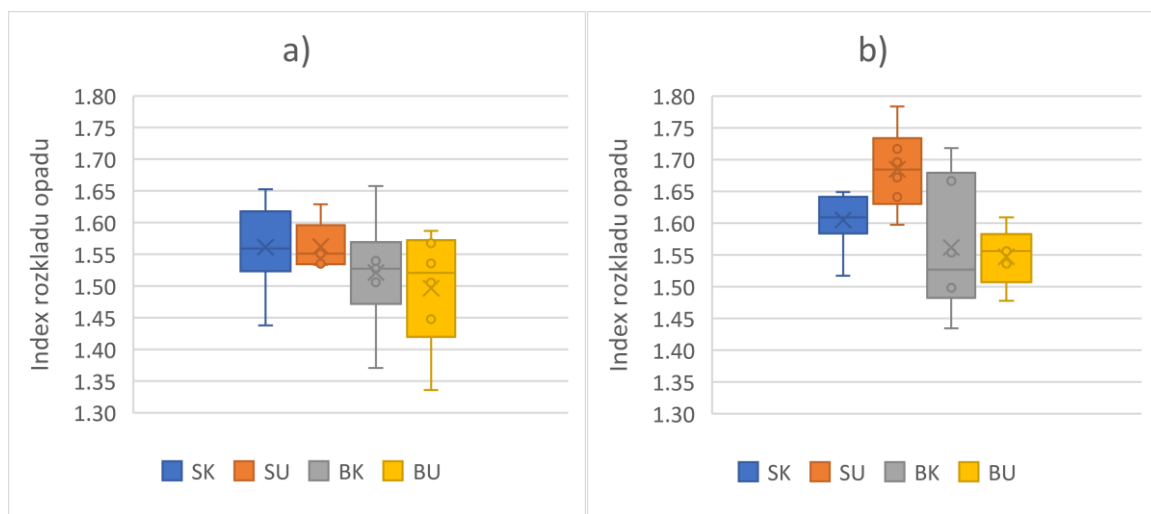
Pomocí infračervené spektrometrie (FTIR) bylo možné pozorovat změny aromaticity organických látek a stupeň rozkladu opadu. Index aromaticity demonstruje poměr stabilního organického uhlíku k labilnímu, s jeho nárůstem tedy stoupá stabilita organické hmoty v půdě. Ačkoli se v průběhu roku poměry měnily na všech stanovištích, změny byly pravděpodobně více ovlivněny ročním obdobím než přítomností biouhlu, protože statisticky významné rozdíly byly pozorovatelné jak mezi plochami s biouhlem, tak mezi samotnými kontrolami. Dále byl měřen index dekompozice lesního opadu pomocí poměru karboxylových a aromatických funkčních skupin k sekundárním amidům. V čase 0 měla všechna sledovaná stanoviště téměř totožné hodnoty, po 12 měsících od aplikace biouhlu už se projeví změny (Obrázek 12). Biouhlová stanoviště pod smrkovým porostem vykazovala statisticky významné urychlení dekompozice opadu, u dubových stanovišť došlo k urychlení také, to ovšem nebylo signifikantní. To odpovídá i řadě dřívějších výzkumů, podle kterých jsou změny po aplikaci biouhlu výraznější na kyselějších stanovištích. Mezi kontrolami v čase 0 a +12 měsíců k výrazným změnám nedošlo.



Obrázek 11: Aktivní pH (pH_{H2O}), obsah oxidovatelného C (Cox), kationtová výměnná kapacita, saturace bází (BS) a množství výměnného Al^{3+} , Ca^{2+} , K^+ a Mg^{2+} půd pod dubovým a smrkovým lesem s aplikací a bez aplikace biouhlu po 12 měsících od aplikace biouhlu (průměr a směrodatná odchylka; počet opakování pro každou variantu = 6).



Obrázek 13: Kolonizace biouhlu mycelií hub po 6 měsících od založení experimentu (biouhel v dubovém porostu vlevo a ve smrkovém porostu vpravo).



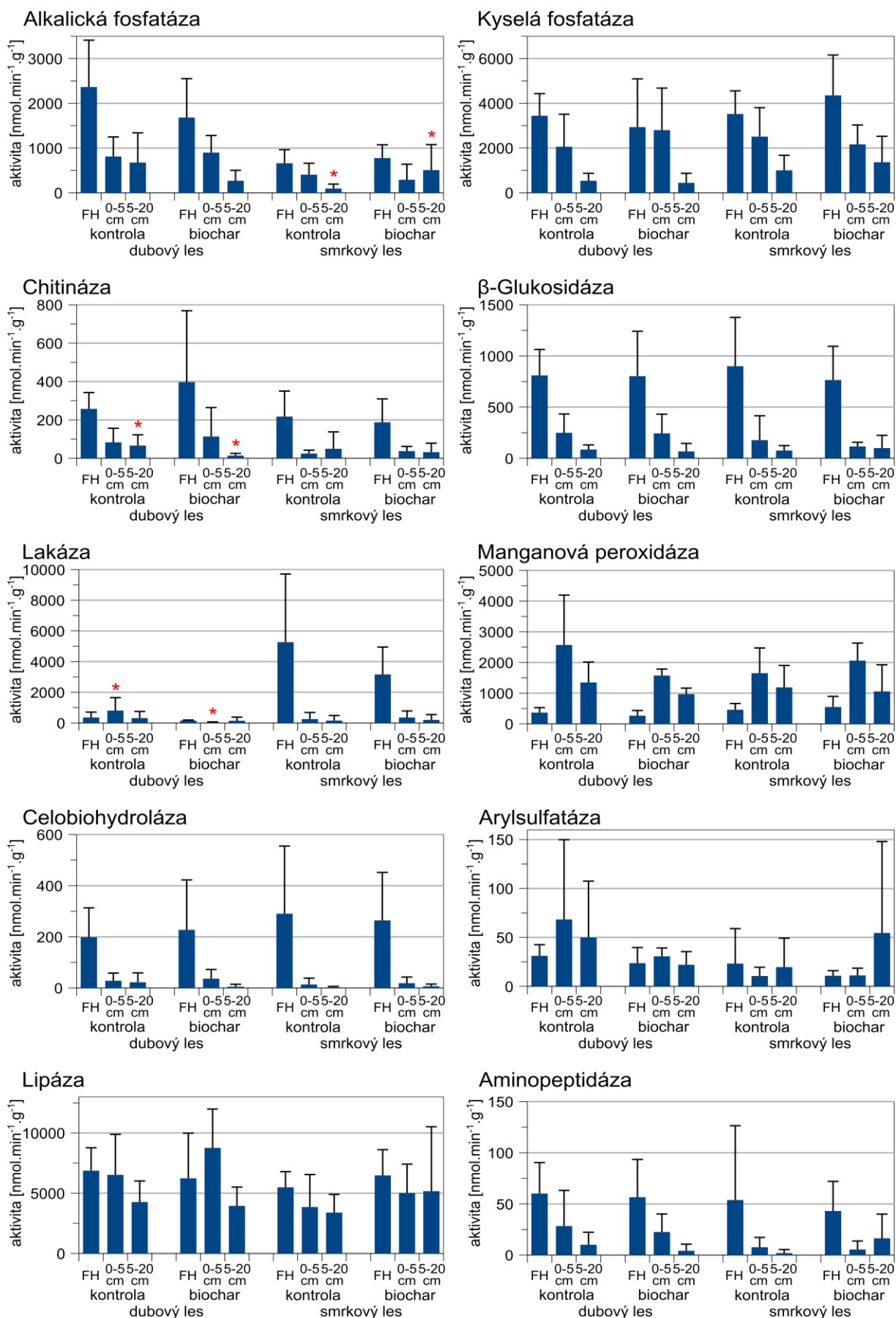
Obrázek 12: Index rozkladu opadu v horizontu FH a) v čase 0; b) v čase +12 měsíců; SU – smrkový les s biouhlem, SK – smrkový les kontrola, BU – dubový les s biouhlem, BK dubový les kontrola.

3.2.7.2 Mikrobiální enzymatické aktivity

Mikroorganismy, především bakterie a houby, se podílejí na zpracování organického uhlíku a zvýšení dostupnosti některých prvků pomocí extracelulárních enzymů. Na obou lesních lokalitách jsme porovnali enzymovou aktivitu na kontrolních plochách a plochách ošetřených biouhlem. Celkem jsme zhodnotili aktivitu 10 enzymů. Z toho bylo 8 hydrolytických, alkalická a kyselá fosfatáza, chitináza, beta-glukosidáza, cellobiohydroláza, arylsulfatáza, lipáza a aminopeptidáza, a 2 oxidativní, lakáza a manganová peroxidáza.

Po jednom roce se většina enzymových aktivit mezi kontrolou a plochami ošetřenými biouhlem nelišila (Obrázek 14). V dubovém lese byla ovšem na plochách ošetřených biouhlem signifikantně nižší aktivita lakázy v horizontu 0-5 cm a signifikantně nižší aktivita chitinázy v hlubším horizontu 5-20 cm. Ve smrkovém lese byla naopak na plochách s biouhlem signifikantně vyšší aktivita alkalické fosfatázy v hlubším horizontu 5-20 cm. Změny enzymatických aktivit mezi oběma lesními porosty ukazují, že se vliv biouhlu na půdní procesy mění podle typu lesního porostu, protože každá dřevina poskytuje odlišné zdroje organických substrátů. Snížená aktivita lakázy a chitinázy v dubovém lese naznačuje omezení růstu houbových společenstev a nespécifických rozkladných procesů větších organických molekul. To může souviset s rychlejším rozkladem hned po aplikaci biouhlu. Vyšší aktivita alkalické fosfatázy naznačuje přítomnost organicky vázaných fosfátů a jejich zvýšenou potřebu pro tvorbu

biomasy ve smrkovém porostu. Celkové se enzymatické aktivity mikroorganismů rok po aplikaci biouhlu příliš nezměnily.



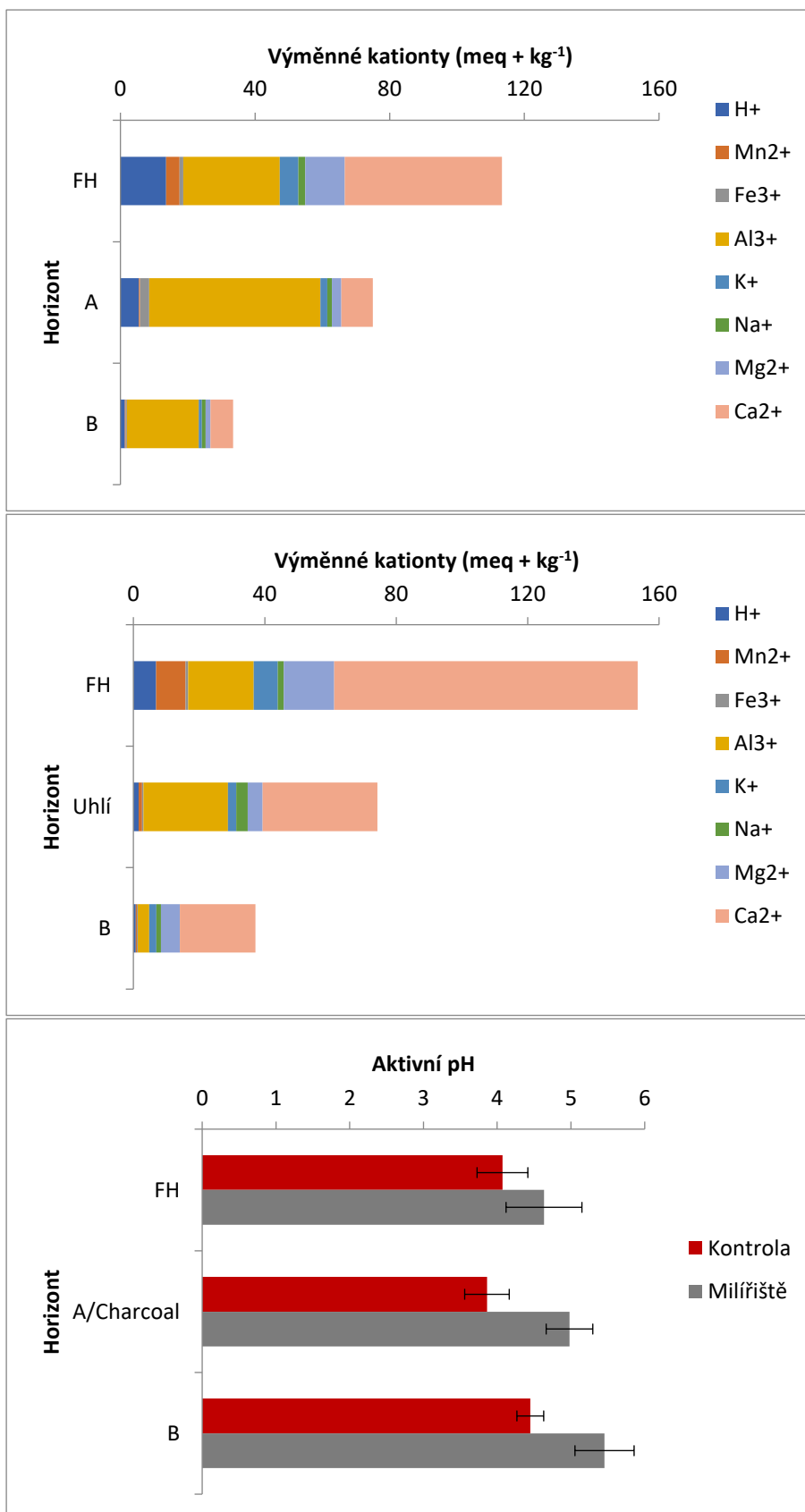
Obrázek 14: Enzymatická aktivita půd pod dubovým a smrkovým lesem s aplikací a bez aplikace biouhlu po 12 měsících od aplikace biouhlu (průměr a směrodatná odchylka; počet opakování pro každou variantu = 6)

3.2.8 *Dlouhodobé charakteristiky stanoviště na základě odběrů z historických milířů*

Studium dlouhodobého vývoje lesních půd a jeho vlivu na ekosystém bylo provedeno na lokalitě historických milířů (stáří 150+ let) v Českém lese v okolí Hamerského potoka (49.8921689N, 12.5847061E).

3.2.8.1 Fyzikální a chemické vlastnosti půd

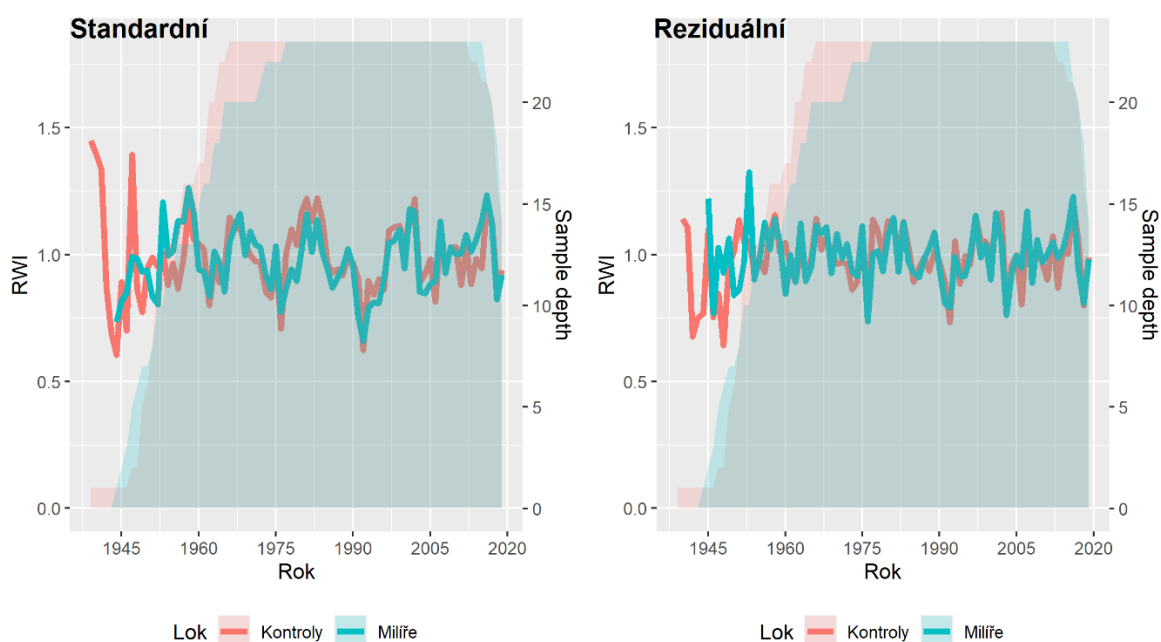
Půdy s obsahem biouhlu mají vyšší pH a vyšší dostupnost živin v sorpčním komplexu (obr. 7) oproti kontrolním půdám odebíraným poblíž milířů. Biouhel zde i po více než 150 letech zlepšuje půdní vlastnosti kyselých a sorpčně nenasycených půd. Je zde zároveň předpoklad, že tak bude činit v řádu dalších stovek let.



Obrázek 15: Fyzikálně chemické vlastnosti půd na historických milířištích a kontrolních lokalitách.

3.2.8.2 Dendrochronologická analýza přírůstu

Na základě 25 letokruhových sérií z historických milířišť a 25 z kontrolních stanovišť byla získána standardní a reziduální chronologie. Výsledky (obr. 8) dokládají statisticky průkazná posílení resilience smrku vůči klimatickým výkyvům na milířích v porovnání s kontrolními stanovišti, kde smrky reagovaly průkazně výrazněji na klimatické výkyvy oběma směry. Celkový přírůst se statisticky mezi stanovišti nelišil. To indikuje přínos aplikace biouhlu zejména na chudších stanovištích blízko klimaticko-environmentálních limitů dané dřeviny (srov. Mastrodonardo et al. 2019 a Buras et al. 2020). Tato analýza nebyla z důvodu dlouhé reakční doby dřevin aplikována na lokalitě ve Srubech.



Obr. 8. Standardní a reziduální chronologie smrků na milířích a kontrole

3.2.9 Komentář k navrhované metodice a doporučení

Zkusné plochy neprokázaly negativní vliv aplikace biouhlu na lesní půdy. Pro robustnější závěry, bude třeba založené trvalé plochy opakovaně navštěvovat i v budoucnu a realizovat metodicky obdobné laboratorní šetření. V kontextu výsledků z historických milířišť však lze učinit závěr o dlouhodobě neutrálním až pozitivním vlivu biouhlu na lesní půdu i dendromasu. Zároveň s tímto vlivem je aplikací biouhlu do lesních půd dosaženo výrazně delší fixace uhlíku v ekosystému oproti standardním postupům, resp. procesům, tedy zetlení, příp. dokonce pálení.

4 SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ

Ačkoli v České republice dosud k cílené aplikaci biouhlu do lesních půd nedochází, v zahraničí byla tato metoda již v minulosti úspěšně využita - borovice lesní (*Pinus sylvestris*) rostoucí na chudých půdách ve Finsku vykazovaly o 25 % vyšší přírůstek než stromy na kontrolních plochách (Palviainen et al. 2020) a podobné výsledky byly zaznamenány i ve Španělsku na sedmiletém pokusu s borovicí montereyskou (*Pinus radiata*) (Omil et al. 2013). Dlouhodobé působení biouhlu prokazatelně zvyšuje kationtovou výměnnou kapacitu ošetřených půd, zvyšuje obsah bazických kationtů a působí příznivě na pH půdy, zvláště na výrazně kyselých stanovištích (Faghieh et al. 2019, Mastrodonardo et al. 2019). Biouhel v lesních

půdách také snižuje objemovou hmotnost (Borchard et al. 2014) a pozitivně ovlivňuje vodní kapacitu půdy, především díky velkému specifickému povrchu (Baiamonte et al. 2019).

5 POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY

Uplatnění metodiky předpokládáme v běžném provozu lesních hospodářů, zejména státních a obecních lesů, v případě dotační podpory (resp. platby za ukládání uhlíku) i v lesích soukromých. Vzhledem k potenciálu podpory biodiverzity a cílových druhů lze uplatnění metodiky očekávat i ze strany orgánů ochrany přírody. Na tomto poli je nicméně nezbytný další výzkum. Metodika je využitelná i jako základní informační materiál pro využití biouhlu na zemědělských půdách. Dále, jako velmi relevantní se jeví zapojení zapravování biouhlu do národní klimatické koncepce, a to jak na straně mitigačních opatření, tak v oblasti adaptací na projevy klimatické změny.

6 EKONOMICKÉ ASPEKTY

Z hlediska využití v lesnictví charakter předložené metodiky neumožňuje objektivně posoudit ekonomické aspekty celého procesu, a to zejména ve vztahu k dlouhodobosti celé akce, jejíž dopad zatím z důvodu krátkého trvání pozorování nelze zodpovědně ekonomicky ocenit. Prvotní investice se však v kontextu lesního hospodářství jako celku nejeví příliš vysoké. V souhrnu jde o náklady na pořízení štěpkovačky, pece pro výrobu biouhlu a náklady na lesního dělníka, který celou operaci uskuteční.

Rámcová ekonomická rozvaha pro zemědělce: ze srovnání komerčních cen produkce biouhlu z těžebních zbytků po lesní těžbě (produkce biouhlu přímo na místě v „otevřené“ peci Kon-tiki) vyplývá, že průměrná cena v roce 2022 byla ca 5500 Kč na 1 m³. Doporučená dávka ÚKZÚZ je 3 t biouhlu na 1 ha zemědělské půdy, kterou lze aplikovat opakovaně. Při předpokladu, že jeden m³ biouhlu váží průměrně 300 kg, to je 10 m³ na jednu dávku, tj. přibližně 55000 Kč. V případě, že zemědělec cílí na celkovou dávku 9 t.ha⁻¹, dostáváme se na hodnotu 165 tis. Kč. Tato investice (bez započítaných nákladů na dopravu a zapravení do půdy) lze považovat za velmi limitující z hlediska finanční situace většiny farmářů. Na druhou stranu Brtnický et al. (2022) uvádí kalkulace výnosů a vícenákladů a celkovou bilanci, která dle jejich výsledků představuje zvýšení zisku o 2216 Kč.ha⁻¹.rok⁻¹ v případě aplikace biouhlu aktivovaného nativní mikroflórou z hnoje a 1868 Kč.ha⁻¹.rok⁻¹ v případě aplikace biouhlu aktivovaného nativní mikroflórou z kompostu. Ekonomická bilance čistého biouhlu bez aktivace vychází dle autorů negativní.

7 SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY

- Baiamonte G, Crescimanno G, Parrino F, De Pasquale C. 2019. Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil. *Catena* **175**:294–303.
- Baldrian, P. 2009. Microbial enzyme-catalyzed processes in soils and their analysis. *Plant Soil Environ.*, 55, 2009 (9): 370–378.
- Borchard N, Ladd B, Eschemann S, Hegenberg D, Möselers BM, Amelung W. 2014. Black carbon and soil properties at historical charcoal production sites in Germany. *Geoderma* **232-234**:236–242.
- Brtnický, M. et al. 2022. Metodika aktivace stabilní organické hmoty pomocí nativní mikroflóry. Uplatněná certifikovaná metodika č. 54/22. Zemědělský výzkum, spol. s r.o., Mendelova univerzita v Brně, 19 s.

- Buras A, Hirsch F, Schneider A, Scharnweber T, van der Maaten E, Cruz-García R, Raab T, Wilmking M. 2020. Reduced above-ground growth and wood density but increased wood chemical concentrations of Scots pine on relict charcoal hearths. *The Science of the total environment* **717**:137189. Elsevier.
- Cools N, De Vos B 2016. Part X: Sampling and Analysis of Soil. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany.
- Faghih F, Emadi M, Sadegh-Zadeh F, Bahmanyar MA. 2019. Long-term charcoal-induced changes to soil properties in temperate regions of northern Iran. *Research Journal of Forestry* **30**:1063–1071.
- Haberhauer, G., B. Rafferty, F. Strebl, and M. H. Gerzabek. 1998. "Comparison of the Composition of Forest Soil Litter Derived from Three Different Sites at Various Decompositional Stages Using FTIR Spectroscopy." *Geoderma* **83** (3): 331–42.
- Mastrolonardo G, Calderaro C, Coccozza C, Hardy B, Dufey J, Cornelis J-T. 2019. Long-Term Effect of Charcoal Accumulation in Hearth Soils on Tree Growth and Nutrient Cycling. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China* **7**:51. Available from <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fenvs.2019.00051>.
- Omil B, Piñeiro V, Merino A. 2013. Soil and tree responses to the application of wood ash containing charcoal in two soils with contrasting properties. *Forest ecology and management* **295**:199–212. Elsevier.
- Palviainen M, Aaltonen H, Laurén A, Köster K, Berninger F, Ojala A, Pumpanen J. 2020. Biochar amendment increases tree growth in nutrient-poor, young Scots pine stands in Finland. *Forest ecology and management* **474**:118362. Elsevier.

8 SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE

- Slapakova, B., J. Jerabkova, K. Vorisek, V. Tejnecky & O. Drabek (2018) The biochar effect on soil respiration and nitrification. *Plant Soil and Environment*, **64**, 114-119.
- Pavková, K. (2020) Charakteristika půdního mikrobiomu po provedené remediaci půdy kontaminované ropnými deriváty. Diplomová práce, FAPPZ ČZU, 25-26.

9 KONTAKTNÍ ADRESY OPONENTŮ, AUTORA A OSVĚDČENÍ O CERTIFIKACI

Oponent 1

Dr. Ing. Milan Sářka
 RECETOX
 Přírodovědecká fakulta
 Masarykova univerzita
 Kamenice 753/5, pavilon D29
 625 00 Brno
 Česká republika

Oponent 2

Ing. Jaroslav Hynšt, Ph.D.
 Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský
 Oddělení výživy rostlin
 Hroznová 2, 656 06 Brno