

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí



Bakalářská práce

2023

Karel Košinár

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra pedologie a ochrany půd

Vliv aplikace biouhlu na lesní půdy

Bakalářská práce

Autor: Karel Košinár

Vedoucí práce: RNDr. Václav Tejnecký, Ph.D.

2023

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Karel Košinár

Územní technická a správní služba v životním prostředí

Název práce

Vliv aplikace biouhlu na lesní půdy

Název anglicky

The effect of biochar application on forest soils

Cíle práce

Hypotéza:

Aplikace alkalického biouhlu výrazně ovlivňuje půdní prostředí. Výraznější vliv na půdní vlastnosti (pH, dostupnost živin) lze očekávat u půd pod smrkovým porostem oproti půdám pod dubovým porostem.

Cíle práce:

Cílem této práce je analýza a následné vyhodnocení vlivu biouhlu na půdy pod dubovým a smrkovým porostem po 24 měsících od aplikace.

Metodika

Smrkový biouhel byl aplikován na lokalitě Sruby (Pardubický kraj) na půdy pod smrkový a dubový porost. Po 24 měsících od aplikace byly odebrány vzorky půdních horizontů (organické FH horizonty) a vrstev (0-5 a 5-20 cm) z každé ošetřené a biouhlem neošetřené plochy. Celkem bylo vzorkováno 6 ploch pod smrkem s aplikací a 6 ploch bez aplikace, pod dubovým porostem rovněž 6 ploch s aplikací a 6 bez aplikace. Stanoveny budou základní půdní vlastnosti a to zejména pH půd, dostupné živiny a množství organického uhlíku. Získaná data budou vyhodnocena, statisticky zpracována a diskutována.

Doporučený rozsah práce

40-50 stran

Klíčová slova

smrk, dub, půdní živiny, pH, organický uhlík

Doporučené zdroje informací

- Brtnický M, Datta R, Holatko J, Bielska L, Gusiatin ZM, Kucerik J, Hammerschmiedt T, Danish D, Radziemska M, Mravcova L, Fahad S, Kintl A, Sudoma M, Ahmed N, Pecina V. 2021. A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment. *Science of the Total Environment* 796:148756.
- Dai Z, Zhang X, Tang C, Muhammad N, Wu J, Brookes PC, Xu J. 2017. Potential role of biochars in decreasing soil acidification – A critical review. *Science of The Total Environment* 581-582:601-611.
- El-Naggar A, El-Naggar AH, Shaheen SM, Sarkar B, Chang SX, Tsang DCW, Rinklebe J, Ok YS. 2019. Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk: A review. *Journal of Environmental Management* 241:458-467.
- Johannis H, Lehejček J, Tejnecký V. 2022. An insight into long-term effects of biochar application on forest soils. *European Journal of Forest Research* 141:213-224.
- Li Y, Hu S, Chen J, Müller K, Li Y, Fu W, Lin Z, Wang H. 2018. Effects of biochar application in forest ecosystems on soil properties and greenhouse gas emissions: a review. *Journal of Soils and Sediments* 18:546-563.
- Maroušek J, Trakal L. 2022. Techno-economic analysis reveals the untapped potential of wood biochar. *Chemosphere* 291:133000.

Předběžný termín obhajoby

2022/23 ZS – FŽP

Vedoucí práce

RNDr. Václav Tejnecký, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra pedologie a ochrany půd

Elektronicky schváleno dne 2. 11. 2022

prof. Dr. Ing. Luboš Borůvka

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 20. 12. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 10. 02. 2023

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Vliv aplikace biouhlu na lesní půdy“ vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Václava Tejneckého Ph.D. a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V dne

.....

Podpis autora

Tímto vřele děkuji za veškerou pomoc, cenné rady, ochotu a obětovaný čas v rámci psaní této práce RNDr. Václavu Tejneckému, Ph.D. Rovněž chci vyjádřit vděk dalším lidem, kteří se podíleli na aplikaci a odebírání vzorků a na další práci s nimi. Rovněž děkuji za psychickou pomoc své rodině.

ABSTRAKT

Aplikace biouhlu do lesních půd je slibným nástrojem k zajištění lesní environmentální stability 21. století a zároveň ke zmírnění klimatické změny. Při výrobě biouhlu pyrolýzou dochází k účinné sekvestraci atmosférického uhlíku. K lepšímu pochopení všech vlastností, efektů a dopadů aplikace biouhlu je však zapotřebí získání kvantitativních údajů a také provádění dlouhodobějších a opakovaných experimentů. K posouzení vlivu biouhlu na lesní půdy byl proveden dvouletý experiment. Smrkový biouhel byl aplikován do lesní půdy pod smrkovou a dubovou vegetací a to v množství 1 kg m^{-2} (10 t ha^{-1}) na celkem 36 ploch a k tomu bylo vzorkováno 36 ploch kontrolních. Byly sledovány změny půdních chemických vlastností (pH a kationtová výměnná kapacita). Aplikovaný biouhel statisticky významně ($p < 0,05$) zvýšil pH půd pod smrkovou vegetací v organické FH vrstvě. Smrkový biouhel ovlivnil kationtovou výměnnou kapacitu půd pod smrkovou vegetací, kde došlo k navýšení průměrných hodnot o 23,73 jednotek ($\text{meq} + \text{kg}^{-1}$) v organické FH vrstvě. Nejvýrazněji došlo k navýšení kationtů Ca^{2+} ve vrstvě FH pro půdy pod smrkovou vegetací. Pro pochopení vlivu biouhlu je však nutné sledovat další parametry jako jsou fyzikální nebo biologické vlastnosti lesních půd.

Klíčová slova: smrk, dub, půdní živiny, pH

ABSTRACT:

The application of biochar to forest soils is a promising tool to ensure forest environmental stability in the 21st century and at the same time to mitigate climate change. During the production of biochar by pyrolysis, atmospheric carbon is effectively sequestered. However, to better understand all the properties, effects and impacts of biochar, it is necessary to obtain quantitative data as well as to carry out longer-term and repeated experiments. A two-year experiment was conducted to assess the effect of biochar on forest soils. Spruce biochar was applied to the forest soil under spruce and oak vegetation in the amount of 1 kg m^{-2} (10 t ha^{-1}) on a total of 36 plots, and 36 control plots were sampled for this. Changes in soil chemical properties (pH and cation exchange capacity) were monitored. Applied biochar statistically significantly ($p < 0,05$) increased the average soil pH under the spruce vegetation in the organic FH layer. Spruce biochar affected the cation exchange capacity of the soils under the spruce vegetation, where the average value increased by 23,73 units ($\text{meq} + \text{kg}^{-1}$) in the organic FH layer. The most significant increase took place in the organic FH horizon for soils of the spruce vegetation, namely for Ca^{2+}

cations. However, to understand the influence of biochar, it is necessary to monitor other parameters such as the physical or biological properties of forest soils.

Keywords: spruce, oak, soil nutrients, pH

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	0
1. ÚVOD.....	1
2. HYPOTÉZA	2
3. CÍLE.....	2
4. HISTORIE BIOUHLU.....	3
5. VYMEZENÍ POJMU BIOUHEL	6
5.1 BIOMASA.....	6
5.2 VLASTNOSTI BIOUHLU	6
5.3 APLIKACE BIUOHLU	8
5.4 LESNÍ PŮDA	10
5.5 OBOHACENÝ BIOUHEL	10
5.6 DALŠÍ VÝHODY BIOUHLU.....	10
5.7 VÝROBA BIOUHLU	11
6. PYROLÝZA	13
6.1 POMALÁ PYROLÝZA.....	13
6.2 BLESKOVÁ PYROLÝZA	13
6.3 ZPLYŇOVÁNÍ.....	14
6.4 RYCHLÁ PYROLÝZA	14
7. SEKVESTRACE UHLÍKU	15
8. VLIV BIOUHLU NA PŮDNÍ VLASTNOSTI	17
8.1 KATIONTOVÁ VÝMĚNNÁ KAPACITA	20
8.2 ELEKTRICKÁ VODIVOST	20
8.3 pH	20
8.4 BAKTERIÁLNÍ SPOLEČENSTVA A HOUBY	21
8.5 NEGATIVNÍ ÚČINKY BIOUHLU	22
9. METODIKA.....	23
9.1 CHARAKTERISTIKA STUDIJNÍHO ÚZEMÍ, METODY SBĚRU	23
9.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ	27
9.3 PRACOVNÍ POSTUPY	28
9.4 STANOVENÍ AKTIVNÍHO pH ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$)	28
9.5 STANOVENÍ VÝMĚNNÉHO pH ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$).....	28
9.6 SORPČNÍ KOMPLEX, MĚŘENÍ VÝMĚNNÉHO pH ($\text{pH}_{\text{BaCl}_2}$).....	29
9.7 VÝPOČTY.....	30
9.8 ZPRACOVÁNÍ DAT, STATISTIKA.....	31
10. VÝSLEDKY	32

10.1 AKTIVNÍ pH (pH_{H_2O})	32
10.2 VÝMĚNNÉ pH (pH_{CaCl_2})	34
10.3 KATIONTOVÁ VÝMĚNNÁ KAPACITA	36
11. DISKUZE	42
12. ZÁVĚR	45
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	46
SEZNAM TABULEK	54
SEZNAM OBRÁZKŮ	55
SEZNAM PŘÍLOH	57

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Ba^{2+} ; Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; K^{+} ; Na^{+} ; Al^{3+} ; Fe^{3+} ; Mn^{2+} , H^{+} - kationty uvedených prvků

$BaCl_2$ – chlorid barnatý

BC - bazické kationty

BCF – biouhel obohacený o další látky, např. hnojivo (biochar compound fertilizer)

BS - saturace bází - nasycenost sorpčního komplexu bazickými kationty

$CaCl_2$ – chlorid vápenatý

CH_4 – metan

CO_2 – oxid uhličitý

EA – výměnná acidita

EC – elektrická vodivost (electrical conductivity)

ECT – extracelulární tekutina

H_2O – voda

HNO_3 - kyselina dusičná

IE – iontový ekvivalent

KVK – kationtová výměnná kapacita (cation exchange capacity), anglická zkratka je CEC

N_2O – oxid dusný

PAHs – polycyklické aromatické uhlovodíky (polycyclic aromatic hydrocarbons)

pH – kyselost a zásaditost, tzv. vodíkový exponent

pH_{H_2O} – aktivní pH

pH_{CaCl_2} – výměnné pH

SOC – půdní organický uhlík (soil organic carbon)

SOM – půdní organická hmota (soil organic matter)

VOCs – těkavé organické látky (volatile organic compounds)

1. ÚVOD

O nejsvrchnější části zemské kůry na naší planetě lze hovořit jako o živoucím prvku. Mimo vzduch, vodu, živiny a další se v ní nachází nepřeborné množství mikroorganismů. Společně utváří příznivé podmínky pro život a prosperitu rostlin, jež jsou nezbytné pro život jako takový. Pokud je však půda dotčena negativními okolními vlivy, tak rostliny skomírají.

Dnešní doba pro půdy skýtá mnohá nebezpečství a blížící se změny. Teplota stoupá, lidská rasa se neustále rozmnožuje, zvyšuje se životní úroveň lidí a navyšuje se spotřeba potravin. V důsledku toho je vyvíjen čím dál tím větší tlak na půdu, která čelí zvyšující se kontaminací polutanty. To jsou jen vybrané z důvodů, proč jsou na ni kladeny čím dál tím větší nároky a proč na mnoha místech začíná degradovat.

Z výše uvedeného vyplývá, že půda potřebuje pomoci a jedním ze způsobů je obohacení půdy o živiny a změna půdních vlastností vedoucí k dosažení stability. Toho lze dosáhnout přidáním biocharu neboli biouhlí. Jedná se o produkt vytvořený z biomasy (rostlinná pletiva), který je často zaměňován širší společností za dřevěné uhlí.

Biouhel je produkt velice bohatý na uhlík a je mu věnována čím dál tím větší pozornost. Je tomu tak díky mnoha jeho funkcím v oblastech udržitelného zemědělství, zmírňování změn klimatu či kontroly životního prostředí. Rostliny za svého života poutají atmosférický uhlík v podobě CO_2 . Pokud je z biomasy vyroben biouhel, tak se uhlík nedostává nazpět do atmosféry, jako by tomu bylo, kdyby se rostlina po svém životě v půdě rozložila např. mineralizací na základní anorganické látky. Děje se tak pomocí výrobního procesu zvaného pyrolýza. V praxi to znamená pálení biomasy bohaté na uhlík, za nulového či minimálního přístupu vzduchu. Uhlík v podobě CO_2 se tak nedostává do atmosféry. Zůstává v poměrně stabilním výsledném produktu – biouhlu, který je možné dále využít pro zlepšení půdních vlastností.

Vlastnosti vyrobeného biouhlu se samozřejmě odvíjí od použitého druhu a kvality biomasy, jakožto od zvolení parametrů procesu samotné výroby. Stejně tak každá půda bude mít jiné nároky, neboť její fyzikálně-chemické vlastnosti jsou na různých místech rozdílné a rostou zde různé druhy rostlin. Biouhel je nadále zkoumán za účelem porozumění jeho variacím a zjištění, kde je jaký druh vhodný použít a jak se chová v půdním prostředí.

2. HYPOTÉZA

Aplikace alkalického biouhlu výrazně ovlivňuje půdní prostředí. Výraznější vliv na půdní vlastnosti (pH, dostupnost živin) lze očekávat u půd pod smrkovým porostem oproti půdám pod dubovým porostem.

3. CÍLE

Cílem této práce je analýza a následné vyhodnocení vlivu biouhlu na půdy pod dubovým a smrkovým porostem po 24 měsících od aplikace.

4. HISTORIE BIOUHLU

Používání biouhlu v půdě sahá až do doby komunit amerických indiánů v povodí Amazonky, přičemž ale nelze vyloučit, že jeho používání bylo aplikováno ještě mnohem dříve. Byly například nalezeny jeskynní malby z éry pravěku, které byly vytvořeny právě dřevěným uhlím. Římané pak zjistili, že dřevěným uhlím, skrze které proteče znečištěná voda, se tato přefiltruje a tím vyčistí. Dřevěné uhlí se samozřejmě od pradávna používalo také jako výborný zdroj energie pro hoření ohně. V Amazonii byla nalezena místa s extrémně vysokou koncentrací dusíku, fosforu a draslíku v půdě, což bývá právě v místech používání biouhlu. Tato místa byla pojmenována jako „Terra Pretta Indigo“, doslova v překladu „černé půdy indiánů“ a byla dle dosavadních studií vytvořena starobyrou domorodou kulturou, viz obrázek č. 1. Tato místa jsou dodnes i po více než 1.000 letech vysoce produktivní navzdory zde se vyskytujícím monzunovým deštům. Jsou také produktivnější, než je půda kolem nich, která je na uvedené látky chudší (Santana 2012).

V současnosti jsou stále k nalezení pozůstatky reliktních ohnišť na dřevěné uhlí, v ČR známé jako milířiště (obrázek č. 2). Dříve se tato místa hojně využívala zejména proto, že dřevěné uhlí mělo lepší výhřevnost, než-li pokácené a dále neupravené dříví. Rovněž se dřevěné uhlí využívalo pro výrobu železa (Johanis et al. 2022).

Biouhel se samozřejmě nachází i přirozeně vytvořený v přírodě, jedná se o místa, kde proběhly např. rozsáhlé požáry či severoamerické prerie, které vysoké podíly uhlíku obsahují standartně a jsou tak jednou z nejkvalitnějších a neproduktivnějších půd na naší planetě (Chen et al. 2019).

Např. v Asii se biouhel používá již velmi dlouhou dobu napříč všemi různými tamními státy jako je Čína, Japonsko či Korea a to v mnoha podobách. Např. v Číně v oblasti Hemudu bylo v relikviích nalezeno větší množství keramiky smíchané právě s dřevěným uhlím. Stáří této keramiky je datováno na více než 7.000 let (Chen et al. 2019; Kamarudin et al. 2022).

V roce 2007 se v Austrálii konalo první mezinárodní zasedání organizace propagující biouhel, anglicky „International Biochar Advocacy Organization,“ na základě kterého vznikly v řadě zemí národní společnosti pro výzkum biohulu. Od této doby se zájem o biouhel stále zvyšoval, až dodnes (Kamarudin et al. 2022).

Výzkumný zájem o biouhel se od začátku 21. století stále zvyšuje. To bylo zapříčiněno studiiemi půd „Terra Pretta“ v povodí Amazonky. Tyto studie totiž odhalily potenciál

biouhlu, který je schopen nejen zlepšit půdní vlastnosti, ale i zmírňovat klimatické změny tohoto století (Glaser et al. 2002; Lehmann et al. 2006).

Vyhledávání pojmu „biochar“ pro rok 2000 ve službě Google Scholar vedlo k 61 výsledkům. Pro rok 2015 to bylo již 6930 výsledků. Pro rok 2022 bylo zobrazeno přes 44000 publikací. Součet od roku 2000 do roku 2022 převýšil 100000 výsledků (Google 2023).



Obrázek 1: Půdy Amazonie. Porovnání půdy Terra Preta (vlevo) s normální/běžnou půdou (vpravo) v Amazonii. Hloubka výkopu přes 1 metr (www.allotment-garden.org).



Obrázek 2: *Pohled na pozůstatky historického mlýniště (Hirsch et al. 2017).*

5. VYMEZENÍ POJMU BIOUHEL

Biouhel je zuhelnatělá organická hmota. Jedná se o výsledný produkt pyrolýzy vzniklý z biomasy. Je to produkt velice bohatý na uhlík, který je vyráběn za účelem jeho následného vpravení do půdy pro jeho pozitivní účinky. Stejným způsobem se vyrábí také dřevěné uhlí, což ale není totožný produkt. Dřevěné uhlí není tak drobnozrnné a je určené k dalšímu spalování pro jeho výborné vlastnosti jako zdroj energie pro pálení. Liší se tedy ve způsobu použití (Sohi et al. 2010; Brown et al. 2011; Josseph et al. 2021).

5.1 BIOMASA

Pro výrobu biouhlu se používá biomasa. Biomasa je označení pro veškerý organický materiál. Tím mohou být celé rostliny, listy, hnůj, dřevo, sláma, štěpka, ale i takové materiály, jako je kal z čistíren odpadních vod či odpady z potravinářství (ovoce, rýže, chléb). Dále je to dřevo, rostlinný odpad, živočišný odpad, účelově pěstované stromy, rostliny a plodiny. Jedná se o rostliny, které během svého života přijímaly oxid uhličitý, vodu a světlo a tyto poté měnily na organickou hmotu (proces fotosyntézy). Jedná se tedy o obnovitelný materiál, který vznikl přímo či nepřímo růstem rostlin. Biomasa je v dnešní době využívána i jako primární zdroj energie (Demibras & Gönenc 2002; McKendry 2002; Josseph et al. 2021).

5.2 VLASTNOSTI BIOUHLU

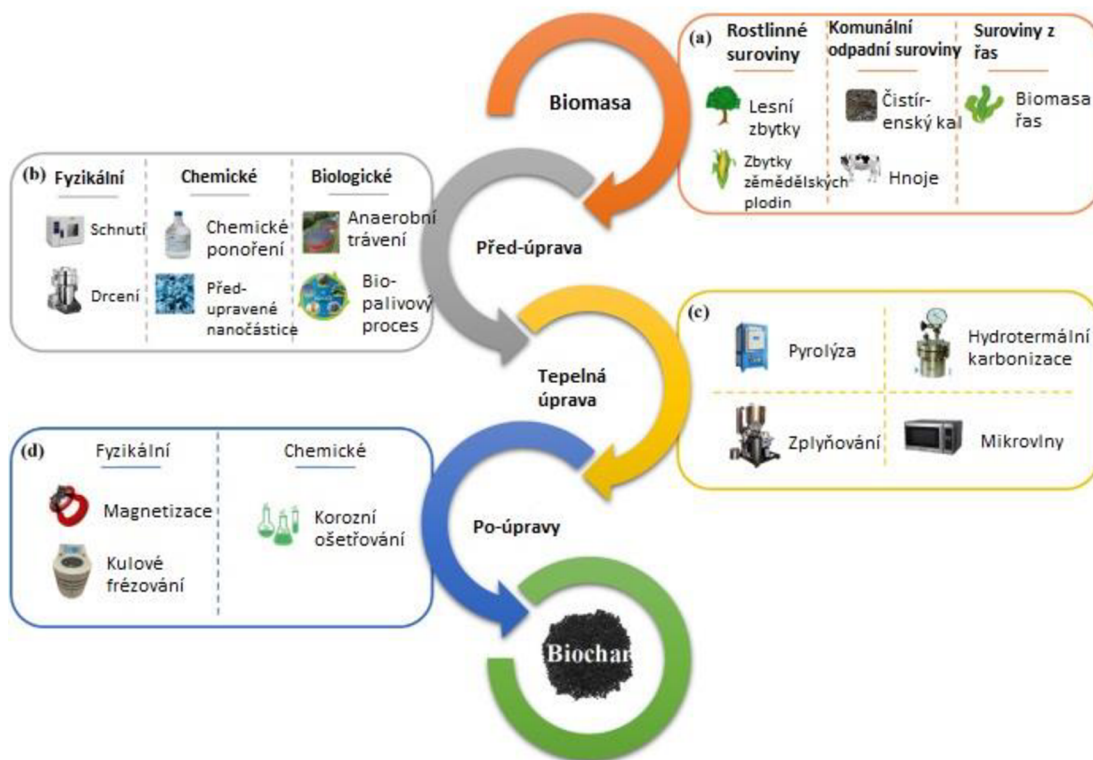
Biouhel je po chemické a biologické stránce velice stabilní (Lehmann 2007). Jeho vlastností je mimo další vysoká kationtová výměnná kapacita (KVK). Je vysoce porézní a má velký specifický povrch s adsorpční schopností. Může adsorbovat vodu, labilní uhlík, a minerální živiny z okolní půdy. Porézní struktura zase chrání mikroorganismy před okolními predátory, a tak v něm mohou vytvářet stanoviště a dále v něm růst a rozmnožovat se. Přitom nezáleží na tom, z jaké biomasy byl biouhel vyroben ani do jaké půdy byl aplikován – na mikroorganismy to nemá vliv (Lehmann et al. 2011; Saquing et al. 2016; Dai et al. 2019). Obecně platí, že čím je při pyrolýze užitá vyšší teplota, tím se zvyšuje pórovitost biouhlu a tak se zlepšují i podmínky pro další možnosti kolonizace mikroorganismů (Quilliam et al. 2013; Dai et al. 2021). Po elementární stránce je biouhel složen ve většině případů z více než 60 % C, N, H, O, ostatní živiny včetně K, Ca, Na a Mg jsou na nižší úrovni (Gul et al. 2015). V tabulce č. 1 jsou uvedeny vybrané vlastnosti biouhlu vyrobeného z různé biomasy.

Tabulka 1: Fyzikálně-chemické vlastnosti biouhlů získaných z různých druhů biomasy (upraveno z různých zdrojů).

Surovina biomasy	Teplota užitá při výrobě biocharu (°C)	pH	C (%)	O (%)	N (%)	P (g kg ⁻¹)	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Reference
Kukuřičné stvolý	600	-	79,0	-	0,92	-	0,67	0,31	Nguyen & Lehmann (2009)
Kravský hnůj	550	8,94	16,5	-	1,1	4,93	23,08	18,81	Singh & Cowie (2010)
Štěpka z borovice	500	-	87,2	-	0,43	0,28	2,70	0,05	Novak et al. (2013)
Borovicové dřevo	750	10,4	92,5	-	-	-	-	-	Ronsse et al. (2013)
Kukuřičný klas	693	-	89,4	5,6	0,9	-	-	-	Budai et al. (2014)
Čajový odpad	700	11,05	85,11	8,88	3,92	-	-	-	Rajapaksha et al. (2014)
Drůbeží trus	700	10,3	45,91	-	2,07	32,1	74,0	40,2	Cantrell et al. (2012)
Drůbeží stelivo	550	10,2	41,3	-	3,8	6,04	22,98	39,85	Singh & Cowie (2010)

Vlastnosti a kvalita výsledných produktů biouhlí se liší. Záleží na použitém vstupním materiálu, teplotě užitě při výrobě, jakožto i na době, po kterou je materiál v takové teplotě ponechán. Dalším faktorem je např. ošetření materiálu před či po pyrolýze (Schimmelpfennig & Glaser 2012). Takovou před-úpravou může být např. sušení biomasy a po-úpravou např. proces magnetizace výstupní suroviny (Xiang et al. 2020). Přehled způsobů zobrazuje obrázek č. 3.

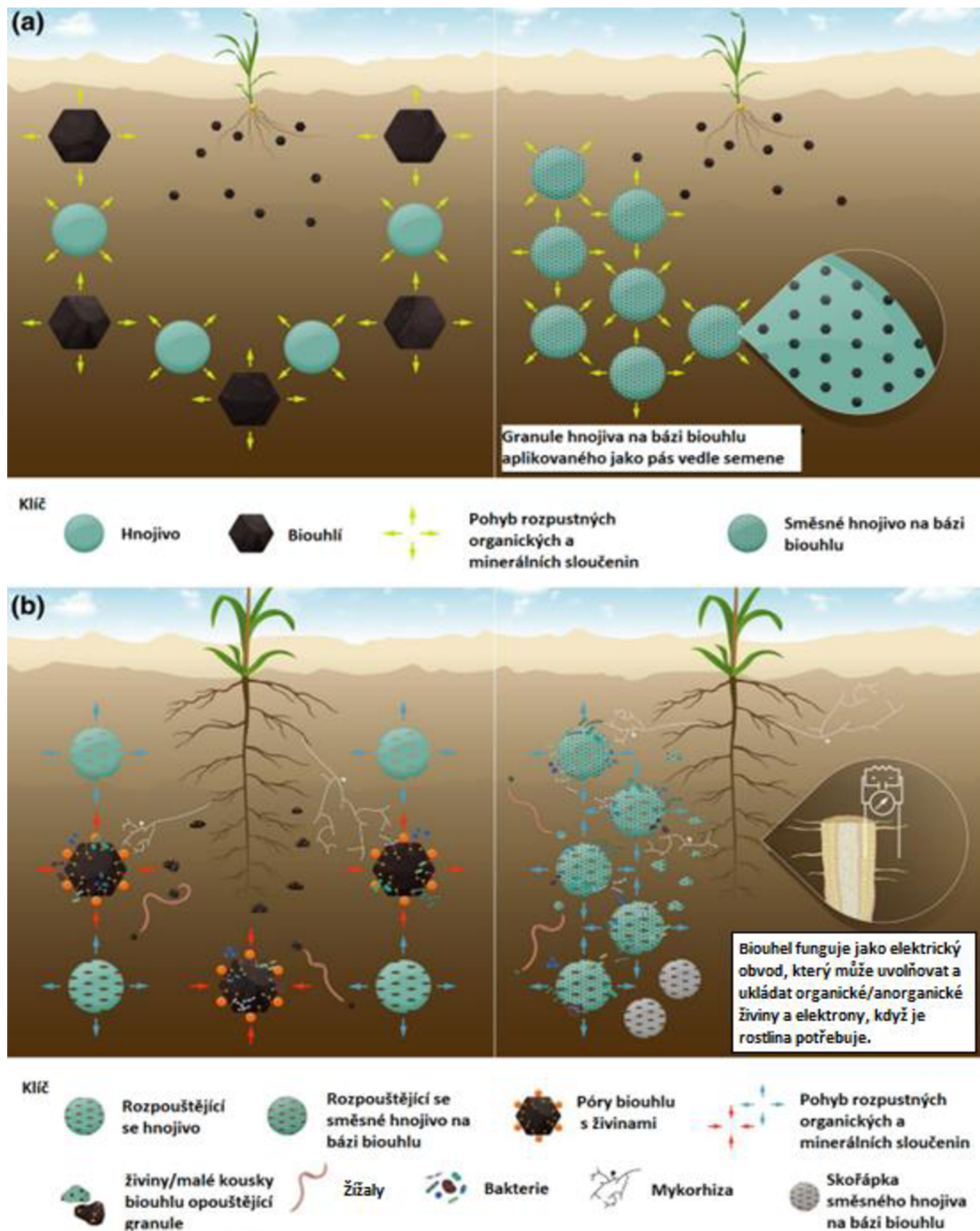
Pokud je vstupní surovinou dřevo, tak je biouhel co do plochy největší, pokud je vstupní surovinou sláma, tak má biouhel nejvyšší kationtovou výměnnou kapacitu (KVK). Zvířecí hnůj jako vstupní surovina pak zaručuje nejvyšší podíl dusíku (N) a fosforu (P). Při pálení o teplotách nad 500°C vzniká biouhel, který v prostředí vydrží déle a má vyšší obsah popela (Ippolito et al. 2020).



Obrázek 3: Technologie výroby biohlu. Vysvětlivky: a) biomasa, b) technologie před-úprav, c) tepelné procesy výroby, d) technologie po-úprav (Xiang et al. 2020, přeloženo).

5.3 APLIKACE BIOHLU

Do lesních půd se biohuel vpravuje v praxi podle potřeby. Buď to může být po těžbě či před sadbou nových semenáčků, např. do jamek. Do zemědělské půdy se biohuel vpravuje běžně při výsevu, případně 1 – 3 týdny před výsevem. Po vpravení biohlu do lesní či jiné půdy můžeme sledovat dle doby jeho působení celkem 3 fáze a to krátkodobou, střednědobou a dlouhodobou (Josseph et al. 2021). Na obrázku č. 4 jsou tyto fáze znázorněny spolu s dalšími procesy, ke kterým po zapravení biohlu do půdy dochází.



Obrázek 4: Fáze působení biouhlu. Krátkodobá a střednědobá fáze biouhlu v půdě se schématem souhmu procesů, ke kterým po zapravení do půdy dochází a to podle dvou způsobů – přidání biouhlu společně s hnojivem před setím (vlevo) a přidání biouhlu s hnojivem spolu s dalšími vhodnými přísadami jako např. minerály a pojivem a to v granulích, které byly do půdy aplikovány jako pás blízko semen (vpravo). Na obrázku (a) je pak vidět krátkodobá fáze, tedy jeho rozpouštění a interakce s okolím a na obrázku (b) je vidět jeho střednědobá fáze – interakce s rostlinami a změny na vpraveném biouhlu (Jossep et al. 2021, přeloženo).

Počáteční fází je krátkodobá fáze, která trvá 1 – 3 týdny. V této fázi biouhel začíná reagovat s půdou. Do biouhlu se dostává voda, která v něm rozpouští organické i minerální sloučeniny, v důsledku čehož tyto látky putují do půdy a zvyšují v ní obsah rozpustného uhlíku, kationtů a aniontů, to dále zvyšuje elektrickou vodivost (EC) a

zvyšuje pH půd. Nejrychlejší výměna látek je v prvním týdnu, ve zbývajících dvou je výrazně pomalejší (Silber et al. 2010; Joseph et al. 2021).

Střednědobá fáze navazuje na fázi první a trvá 1 – 6 měsíců. V této fázi kořeny rostlin interagují s biouhlem – kořenové vlásky se zachytávají do biouhlu a takto se s ním spojují, doslova se jej snaží obalit. To přímo souvisí se zdravím a prosperitou rostlin (Chew et al. 2020; Joseph et al. 2021).

Poslední fází je fáze dlouhodobá, která trvá od 6 měsíců dále a v této fázi biouhel stárne za současných reakcí s půdou, a to až do vyčerpání svých možností. Tato fáze může trvat i tisíce let (Wang et al. 2020; Joseph et al. 2021).

5.4 LESNÍ PŮDA

Biouhel vpravený do lesní půdy zvyšuje půdní pórovitost, agregátovou strukturu a půdní vlhkost, přičemž snižuje objemovou hustotu půdy. Kromě toho zlepšuje chemické vlastnosti půdy, jako je navýšení pH půdy, zásobu organického uhlíku, koncentraci dostupného fosforu a draslíku, jakožto KVK. Dále snižuje emise N_2O a zvyšuje příjem CH_4 půdy. Jedná se o tytéž efekty, které má biouhel na zemědělskou/luční půdu a je tak vhodný pro podporu živin pro růst a produktivitu stromů (Li et al. 2018).

5.5 OBOHACENÝ BIOUHEL

Spolu s biouhlem je možné do půdy vložit i hnojivo. Ovlivňuje to totiž pozitivně výsledné procesy, ke kterým v půdě dochází (Joseph et al. 2021). Jedna z forem takto obohaceného biouhlu je BCF (biochar compound fertilizer). Ta navíc obsahuje dusík, minerály a sloučeniny fosforu (např. síran amonný či fosforečnan amonný). Fyzikální a chemické reakce, ke kterým dochází při výrobě BCF, mají za účinek zpomalení rychlosti rozpouštění sloučenin dusíku oproti minerálním hnojivům (Chen et al. 2017; Shi et al. 2020).

5.6 DALŠÍ VÝHODY BIOUHLU

Biouhel vložený do půdy zlepšuje půdní vlastnosti a podporuje tak produktivitu půdy. Nesporným benefitem biouhlu vpraveného do půdy je to, že se z něj živiny v něm obsažené vylučují velice pomalu, mohou to být tisíce let (Hardy et al. 2017; Kern et al. 2019).

Biouhel přidáný do půdy je schopen vyčistit znečištěnou půdu a vodu v ní díky vysokému podílu organického uhlíku, který působí jako sorbent. Mění biologické a fyzikálně-chemické složení půdy. V půdě po přidání biouhlu dochází k retenci vody. Díky tomu dochází k menšímu vyplavování živin (fosforu a jiných). Děje se tak proto, protože biouhel v půdě zvyšuje její organické a minerální složky, to má za následek navýšení půdní organické hmoty (SOM). Půdní organická hmota ovlivňuje zadržování vody a zvyšují její kapacitu. V půdách Terra Pretta byla zjištěna vyšší retence vody o 18 %, než tomu bylo v přilehlých „normálních“ půdách (Glaser et al. 2002; Sohi et al. 2010).

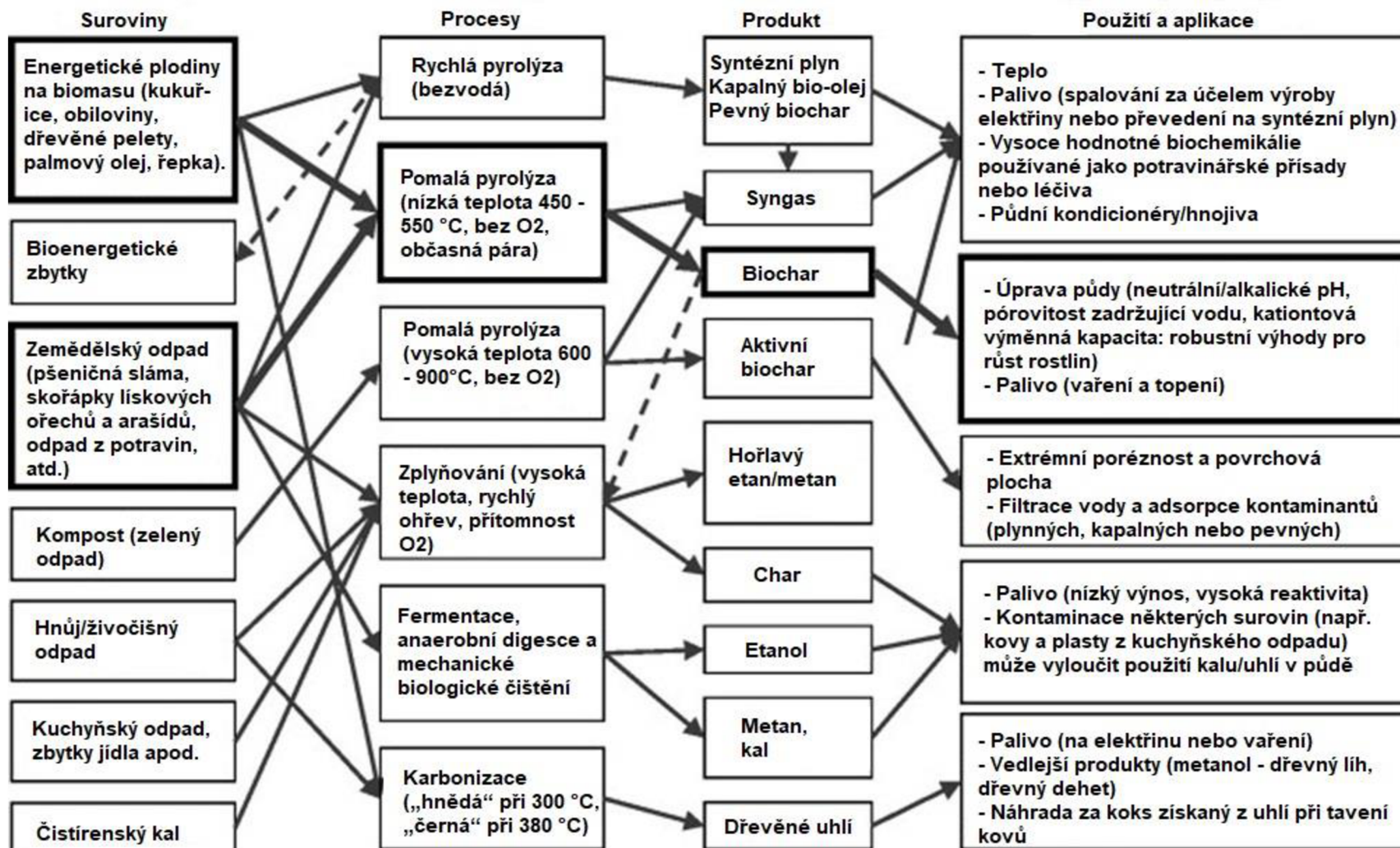
Další výhodou je likvidace řady odpadních materiálů, které budou použity jako biomasa pro výrobu biouhlu. Jedná se např. o kaly z čistíren odpadních vod, stelivo (zvířecí odpad). Patogenní látky z těchto materiálů budou navíc při výrobě zabezpečeny tak, aby neunikali do ovzduší a vedlejší produkty jako nebezpečné plyny a těkavé látky budou přeměněny na bioolej, který se následně využije jako obnovitelný zdroj energie (Racek et al. 2020).

Biouhel aplikovaný do půdy zde setrvá až tisíce let. Po dobu jeho životnosti se uhlík tímto způsobem účinně ukládá a dochází tak k jeho sekvestraci. Tím je dosaženo zmírňování klimatu, neboť se uhlík v podobě emisí nedostává do ovzduší. Místo toho se oxid uhličitý v podobě C bezpečně a účinně ukládá (Kammann et al. 2015; Wang et al. 2016). V konečném důsledku se snižují i emise dalších skleníkových plynů jako je oxid dusný (N_2O) a metan (CH_4). Je to proto, že odpadní produkty jsou obvykle bohaté na dusičnany. Amoniak je zase běžným odpadním produktem metabolismu živočichů. Pokud jsou však uvedené odpadní materiály využity jako surovina pro výrobu biouhlu, tak se jejich uvolňování do ovzduší předchází. Další příčiny snižování N_2O jsou chemického rázu (Bruun et al. 2011). Více o sekvestraci uhlíku pojednává samostatná kapitola č. 7.

5.7 VÝROBA BIOUHLU

Výroba biouhlí probíhá nejčastěji pálením biomasy v uzavřené nádobě s omezeným či nulovým přístupem vzduchu při relativně ne úplně vysokých teplotách od přibližně 400°C do 700°C (pyrolýza). Uhlík se zahříváním neuvolňuje a nedostává se zpátky do atmosféry a tak ji neznečišťuje, což má za následek čistější atmosféru (Brown et al. 2011). Více o procesu pyrolýzy pojednává samostatná kapitola č. 6. Níže v tabulce č. 2 lze vidět i další postupy pro výrobu biouhlí a další informace spojené s pyrolýzou.

Tabulka 2: Biouhel a další produkty tepelné přeměny biomasy vyrobené dle dostupných technologií a surovin (Sohi et al. 2010, přeloženo).



6. PYROLÝZA

Pyrolýzou se rozumí chemický proces, při kterém působí teplo na materiál, nebo dokonce i na vzduch a tím dochází k chemickým změnám. K ohřívání materiálu dochází za částečného či nulového přístupu vzduchu (v případě absence vzduchu se jedná o anaerobní spalování). Pyrolýza dřeva byla pravděpodobně první chemický proces, který se člověk naučil používat (Goldstein et al. 1981). Níže popsané procesy pyrolýzy jsou uvedeny také v tabulce č. 3, ve které jsou také uvedeny výtěžky jednotlivých pyrolýz, kterých lze dosáhnout.

Jedná se o relativně jednoduchý, levný a efektivní termochemický proces výroby biouhlí – pevné látky s vysokou energetickou hustotou ($\sim 18 \text{ MJ kg}^{-1}$). Energetický obsah biouhlu však záleží na použité surovině a může dosahovat hodnot 30 – 35 MJ kg^{-1} (Ryu et al. 2007).

Dalším produktem procesu pyrolýzy jsou topné plyny (syngas) a kapalný bioolej, které mají své využití v jiných oblastech (Demibras & Gönenc 2002). Jak uvádí Sohi et al. (2010), separace plynů může být surovinou pro důležité chemické konverzní procesy, např. Fischer-Tropsch (CO jako prekurzor nafty) či Haber-Bosch (H_2 jako prekurzor pro atmosférickou fixaci dusíku).

Pyrolýzu lze rozdělit na čtyři různé varianty. Jedná se o pomalou pyrolýzu, bleskovou pyrolýzu, zplyňování a rychlou pyrolýzu (Demibras & Gönenc 2002).

6.1 POMALÁ PYROLÝZA

Pomalá pyrolýza probíhá v pecích na dřevěné uhlí nebo v kontinuálních systémech pomalu ohřívajících biomasu a to za teplot nad $400 \text{ }^\circ\text{C}$ a za absence kyslíku. Pro pečení není důležitá velikost částí biomasy ani jejich vlhkost. Kontinuální systémy však vyžadují pro optimální výsledky zmenšení částec biomasy a její vysušení na určené hodnoty. V průměru z pomalé pyrolýzy vzniknou produkty v těchto procentech: 35 % biouhlí, 30 % bioolej a 35 % syngasu. Moderní pyrolyzéry již mají zadní hořáky, které kontrolují emisní látky a nevypouští je do ovzduší (Demibras & Gönenc 2002).

6.2 BLESKOVÁ PYROLÝZA

Produkty u bleskové pyrolýzy se pohybují v průměru v těchto procentech: 60 % biouhlí a zbytek (40 %) bioolej a syngas. Tento typ pyrolýzy je koncipován k maximální produkci biouhlu. Funguje na principu ohřívání biomasy v retortě pod mírným až vysokým tlakem (Laird et al. 2009).

6.3 ZPLYŇOVÁNÍ

U zplyňování hraje svou roli kyslík, a je navrženo tak, aby jako výsledný produkt převažoval plyn (syngas). Malé množství kyslíku je řízeně navedeno do zplyňovače, který vstupuje do reakční komory a způsobuje pomalé spalování biomasy. Děje se tak za vysokých teplotách od 800 do 1200 °C. V procentech je u této metody biouhlí a biooleje jako výsledných produktů v průměru 5 -15 % (Laird et al. 2009).

6.4 RYCHLÁ PYROLÝZA

Rychlé pyrolyzéry jsou určeny k maximálnímu výtěžku biooleje, kdy výtěžek biooleje zde dosahuje až 70 %. U této metody je potřeba biomasu rozemlít na malé částičky nepřesahující velikost 2 mm a také musí být vysušeny. Poté je v pyrolyzérovi biomasa ohřívána během 1 sekundy za teploty nad 400 °C. Následují další procesy jako oddělování a ochlazování plynů (Laird et al. 2009).

Tabulka 3: Výtěžky výchozí hmoty jako produkty pyrolyzních procesů (www.ieabioenergy.com, přeloženo)

Proces pyrolýzy	Kapalný bioolej	Pevný bochar (%)	Syngas (%)
Rychlá pyrolýza: středně vysoká teplota (~500°C.), nízký čas přítomnosti horké páry (< 2 s)	75% (25% voda)	12	13
Blesková pyrolýza: nízká-středně vysoká teplota, středně dlouhý čas přítomnosti horké páry	50% (50% voda)	25	25
Pomalá pyrolýza: nízká-středně vysoká teplota, dlouhý čas přítomnosti horké páry	30% (70% voda)	35	35
Zplyňování: vysoká teplota (> 800°C), dlouhý čas přítomnosti horké páry	5% dehet (5% voda)	10	85

7. SEKVESTRACE UHLÍKU

Důležitou otázkou 21. století je vývoj technologií pro snížení rychlosti nárůstu atmosférické koncentrace oxidu uhličitého (CO₂). Hlavními cíli v této oblasti je snaha o snížení globální spotřeby energie, vyvinout palivo s nízkým nebo žádným obsahem CO₂ a sekvestrovat emise (Rattan 2007).

Mezi lety 1980 až 2000 se zvýšila míra emisí ze spalování fosilních paliv o 40 %. Přesto se množství oxidu uhličitého v atmosféře nenavyšovalo, a to díky přirozené funkci lesů, oceánů, půdy a dalších ekosystémů. Ovšem navyšování CO₂ bylo a je od roku 2000 do současnosti trendem, viz obrázek č. 5 (Wofsy 2001; Global Carbon Budget 2021).

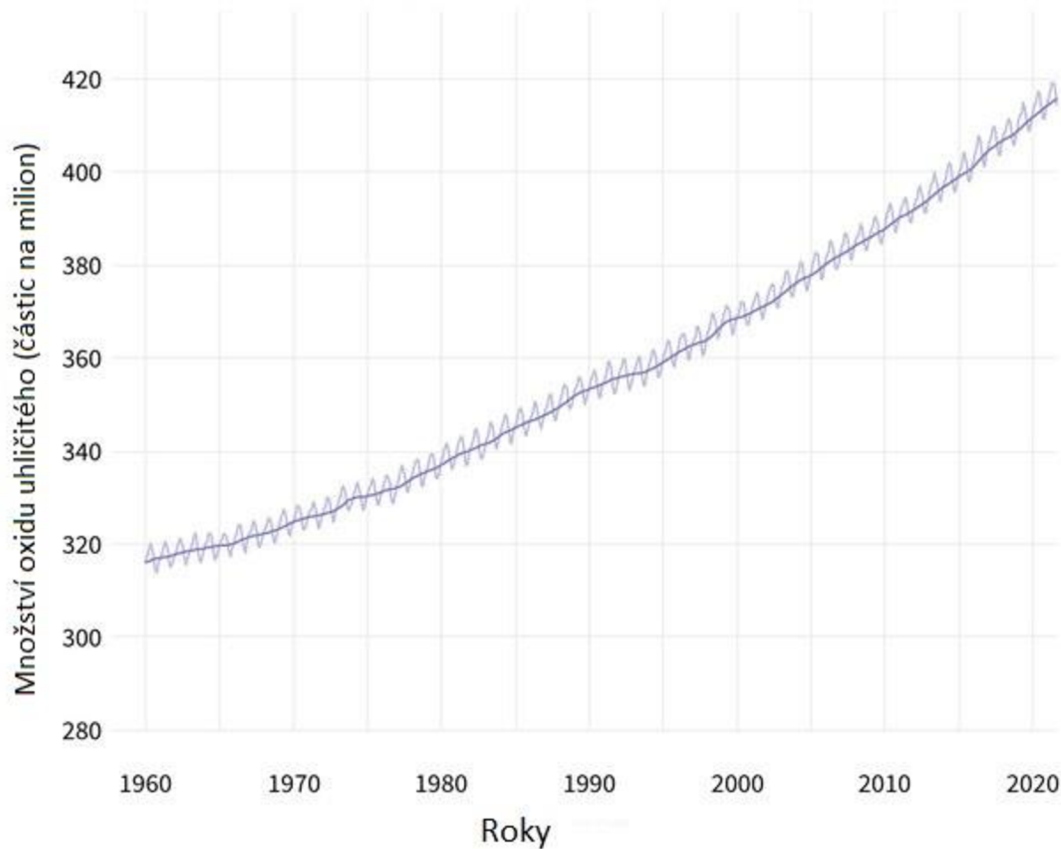
Přenos CO₂ do globálních zásob Země (půdních; oceánských; biotických; geologických), to je proces sekvestrace uhlíku.

Abiotické techniky sekvestrace uhlíku jsou např. vstřikování CO₂ do hlubokých míst v oceánech či geologických vrstev, ropných vrtů či bývalých uhelných dolů. Dále existuje tzv. vstřikování uhlíku do slaných akviferů spolu s minerální karbonizací oxidu uhličitého. To znamená vstřikování do podzemních vrstev vysoké sedimentární poréznosti, které jsou naplněné slanou (braktickou) vodou. Abiotické techniky jsou velice finančně náročné, přesto mají potenciál sekvestrovat tisíce Pg uhlíku. Také je zde nutné počítat s tím, že zde vždy hrozí nebezpečí úniku sekvestrovaného uhlíku. Tyto techniky mají být dostupné pro běžné používání od roku 2025. Do současnosti je dosahováno velkého pokroku, co se týče technologií a technik, díky kterým je možné oxid uhličitý účinně zachycovat a přepravovat na určené místo, kde je následně vstříknut do předem naplánovaného místa. Abiotická sekvestrace funguje bez zásahu živých organismů pouze na základě fyzikálně-chemických reakcí (O'Connor et al. 2001; Tsang et al. 2002; Fan & Park 2004; Favero et al. 2020).

Biotické techniky jsou ve srovnání s abiotickými finančně efektivnější, přirozenější (je u nich přítomnost rostlin či mikroorganismů) a mají i jiné vedlejší výhody. K tomu je lze používat ihned. Mají ovšem omezenou kapacitu sekvestrace. Příkladem abiotické techniky je např. sekvestrace uhlíku, ke které dochází při pyrolýze biomasy při výrobě biouhlí. Významná část oxidu uhličitého, který biomasa obsahuje, je při pálení v prostoru s omezeným přístupem vzduchu ukládána do zde vznikajících uhlíků. Oxid uhličitý se při pálení biomasy není schopen dostat z nádoby ven a dále do atmosféry. Dalším příkladem biotického procesu je sekvestrace uhlíku v oceánech díky jevu známému pod pojmem fotosyntéza (Rivkin & Legendre 2001; Lal et al. 2003).

Z uvedeného vyplývá, že sekvestrace uhlíku může být jak přirozenou, tak antropogenní činností, přičemž každá má své výhody i nevýhody (Rattan 2007).

Atmosférický oxid uhličitý (1960 - 2021)



Obrázek 5: Atmosférický CO₂ vývoj od roku 1960 do roku 2021 vyobrazující CO₂ v jednotkách ppm, (Global Carbon Budget 2021, Author(s) 2022, přeloženo).

8. VLIV BIOUHLU NA PŮDNÍ VLASTNOSTI

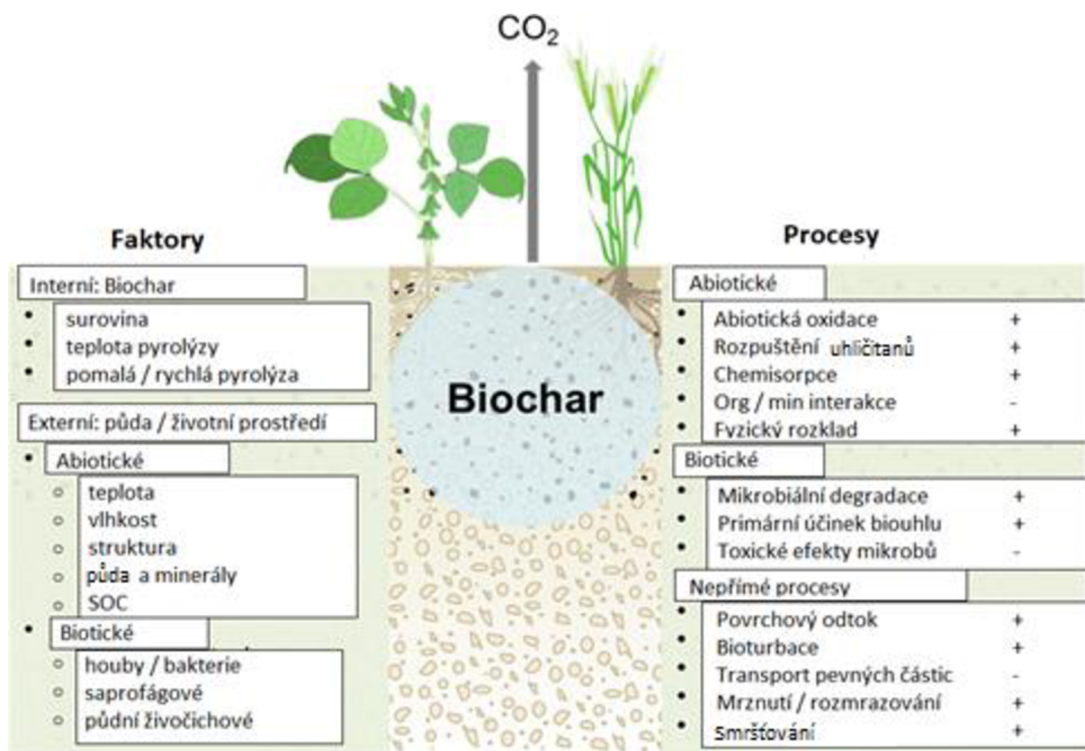
Každá půda má jiné fyzikální vlastnosti. Záleží to na organické hmotě v půdě, na obsahu minerálních látek v ní obsažených, na jejich množství i na jejich vzájemném propojení. Všechny tyto věci pak utvářejí půdu jako takovou. Liší se tím například její hustota, poréznost, retenční schopnosti apod. V místech, kde proběhlo obohacení půdy biouhlem, závisí také na výchozí látce použité pro výrobu tohoto produktu, ale také na dávce, která byla v místě do půdy aplikována (Lasota et al. 2021). Tabulka č. 4. zobrazuje pozitivní dopady biouhlu přidaného do půd písčitých a hlinitých/jílových.

Tabulka 4: Půdní oblasti (faktory) ovlivněné přítomností biouhlu v půdě písčitého a hlinitého/jílovitého typu. Pro oba typy půd jsou uvedeny nepřímé i přímé účinky (Atkinson 2018, přeloženo). Anotace prověřování hodnocení je následující: velmi omezené důkazy o vlivu (-), některé důkazy (+), přiměřené důkazy (++); a spoustu důkazů (+++). Kategorie jsou přiřazeny na základě odhadu počtu publikovaných prací, které vykazují vhodné důkazy, a pohybují se v rozmezí 0–1, 2–5, 6–10 a >10 pro každou z kategorií – až +++.

Předpokládaná významná zvýšená dostupnost vody pro rostliny	Přítomnost důkazů o dopadu v půdě písčitého typu	Faktor ovlivněný přítomností biouhlu v půdě	Přítomnost důkazů o dopadu v půdě jílovitého a hlinitého typu
Převážně nepřímé účinky		Fyzikální vlastnosti půdy	
	+++	Zvýšení ukládání uhlíku (pravda u většiny půd kromě rašelinových půd)	+
	+++	Zvýšený obsah organické hmoty (za předpokladu určitého rozkladu biouhlu)	–
	++	Snížení objemové hmotnosti (kvůli nízké hustotě biouhlu)	+
	+	Zvýšené provzdušnění/snížená anoxie půdy (v důsledku míchání půdního agregátu)	++
		Mikrobiální vlastnosti půdy	
	+++	Poskytnutí mikrobiálního útočiště (díky porozitě biouhlu)	++
	++	Zvýšení mikrobiální diverzity (v souvislosti s vytvářením biotopů a pórovitostí biouhlu)	+
	++	Zvýšení mikrobiální funkce	+
		Vlastnosti rostlin/plodin	
+	Zvýšený objem příjmu kořeny (v důsledku strukturálních změn půdy)	–	
Především přímé účinky		Fyzikální vlastnosti půdy	
	+	Zvýšená infiltrace vody (díky zvýšené hydraulické vodivosti půdy)	+++
	+++	Zvýšený obsah vody v půdě při nasycení (v důsledku absorpce vody půdou/biouhelem)	+
	++	Zvýšený obsah vody v půdě při kapacitě pole (v důsledku absorpce vody biouhlem)	+
		Chemické vlastnosti půdy	
	+++	Zvýšené množství živin pocházejících z rozkladu biouhlu (díky přirozené chemii biouhlu)	+
	++	Zvýšená adsorpce živin na biouhel (díky CEC biouhlu)	++
	++	Zvýšená dostupnost živin (díky výměnným vlastnostem biouhlu)	+
	+++	Snížené vyplavování živin z půdy (díky vlastnostem biouhlu zadržovat živiny)	++
		Vlastnosti rostlin/plodin	
	++	Zvýšená proliferace kořenů (díky fyzikálně chemickým vlastnostem biouhlu)	–
	+	Snížený oxidační stres rostlin (díky absorpčním vlastnostem biouhlu)	+
	++	Zachování půdní vody (díky prodloužené dostupnosti vody pro přežití rostlin biouhlu)	+
	+	Zvýšená účinnost využití vody plodín (díky kapacitě biouhlu déle uchovávat vodu)	+
	++	Zvýšené výnosy plodin (díky některým nebo všem výše uvedeným)	+

Obohacením půdy o biouhel se změjí fyzikálně-chemické vlastnosti půd. Degradovaná půda, která není obohacená o biouhel vykazuje obecně jednozrnnou strukturu. Naopak je tomu na biouhel bohatou půdu, která vykazuje strukturu agregátovou, což je obecným předpokladem půd k jejich příznivé pórovitosti, vyrovnávání vzdušných i vodních podílů a celkově lepší úrodnosti. Příčinou spojování půdních částic v agregáty je právě přidání složky biouhlu, protože tento v půdě díky svým vlastnostem, zejména vysokému specifickému povrchu, zvyšuje počty půdních mikroorganismů (v konečném důsledku tedy přidání biouhlu mění i mikrobiální vlastnosti půdy). Tím jsou změněny faktory půdy jako objemová hustota, rychlost infiltrace, poréznost a další a je dosaženo žádanějšího stavu (Lasota et al. 2021).

V následujícím obrázku č. 6 Wang et al. (2016) uvádí přehled faktorů působících na biouhel v půdě.



Obrázek 6: Přehled faktorů a procesů ovlivňujících rozklad biouhlu v půdě. Vnitřní (biouhel) a vnější (prostředí/půda) faktory jsou zahrnuty (vlevo). Jsou uvedeny abiotické, biotické a nepřímé procesy (vpravo). Znaménka plus (+) a minus (-) označují pozitivní a negativní účinky různých procesů na rozklad biouhlu. SOC = soil organic carbon, tedy organický půdní uhlík (Wang et al. 2016, přeloženo).

8.1 KATIONTOVÁ VÝMĚNNÁ KAPACITA

Biouhel obecně zvyšuje kationtovou výměnnou kapacitu. To zlepšuje dostupnost živin pro rostliny a je tak prospěšné pro jejich růst. (Atkinson et al. 2010; Lorenz & Lal 2014). Aplikace biouhlo-kompostových substrátů o hmotnosti 30 t ha⁻¹ na plantážích topolů, olší a vrb vedla k významnému zvýšení půdní kationtové výměnné kapacity (Glisczynski et al. 2016). Jak dále uvedl Cheng et al. (2008), tak inkubace vody při 30°C a 60% kapacity zadržování vody dubového biouhlu během 12-ti měsíců zvýšila půdní KVK z 1,7 na 71,0 mmol kg⁻¹. Zvýšení KVK je dáno navýšením hustoty organického materiálu na jednotku povrchu, což se rovná vyššímu stupni oxidace nebo zvýšení plochy pro adsorpci kationtů (Liang et al. 2006). Dalším faktorem pro navýšení KVK je chemické složení a struktura biouhlu (Mao et al. 2012). Lee et al. (2010) zjistili, že poměr O/C biouhlu souvisí s kapacitou KVK půdy. Vyšší hodnoty O/C indikují vyšší obsah hydroxylových skupin, kde karboxylové a karbonylové skupiny biouhlů zlepšují půdní KVK. Fyzikální a chemické vlastnosti biouhlů úzce souvisí s teplotami užitými při pyrolýzních procesech. Například vyšší teploty pyrolýzy (např. 600 °C) vedly k většímu povrchu a poté ke snížení hustoty náboje, což vedlo k nižší KVK. Mimo výše uvedené je KVK závislé také na půdním typu. Aplikace biouhlu vedla k většímu nárůstu KVK v kyselých půdách než ve vápenatých půdách (Liang et al. 2006; Gul et al. 2015).

8.2 ELEKTRICKÁ VODIVOST

Elektrická vodivost půdy je způsob měření korelující s vlastnostmi půdy, jež ovlivňují mimo jiné produktivitu plodin, úroveň organické hmoty, slanost apod. Elektrická konduktivita je schopnost materiálu vést elektrický proud a je běžně udávána v jednotkách (mS/m), pro půdu se obvykle používá jednotka (dS/m). (Grisso et al. 2005). Přidání biouhlu do půdy prokazatelně zvyšuje její EC. Je to dáno tím, že biouhel obsahuje vodou rozpustné soli a jeho přidání do půdy tak obsah solí v dané půdě zvýší. Elektrická vodivost je pak úměrná množství a povaze solí, které biouhel obsahuje. Jako u pH je EC závislá na teplotě pyrolýzy a vstupní surovině. (Singh et al. 2017.)

8.3 pH

Biouhel je obvykle alkalický. Po jeho přidání do půdy tak dochází ke zvýšení půdního pH, zejména pak u půd kyselých. Čím je při pyrolýze užitá vyšší teplota, tím zásaditější je také výsledný vyrobený biouhel. To má pak další vliv na půdní

mikrobiální společenstva (Dai et al. 2013). Záleží také na použité biomase. Biomasa na bázi dřeva má tendenci mít vyšší pH oproti biouhlu vyrobenému z hnoje nebo zemědělských plodin (Glaser et al. 2002).

Další příčinou zvýšení půdního pH po přidání biouhlu je přítomnost záporně nabitých fenolových, karboxylových a hydroxylových skupin na povrchu biouhlu (Brewer a Brown 2012), které vážou H^+ ionty z půdního roztoku a tím snižují koncentrace iontů H^+ v půdním roztoku a tím se zvyšuje hodnota půdního pH. Dále křemičitany, uhličitany a hydrogenuhličitany pocházející z biouhlu na sebe mohou vázat H^+ ionty a tím je odstraňovat z půdního roztoku, což také přispívá ke zvýšení pH půdy (Stewart et al. 2013).

8.4 BAKTERIÁLNÍ SPOLEČENSTVA A HOUBY

Pro půdní celky jsou přínosná bakteriální společenstva, která jsou velmi ovlivněna abiotickými faktory a to např. půdní vlhkostí, poměrem uhlíku C a dusíku (N) a pH. Společenstva hub jsou pro půdní systémy přínosná taktéž a jsou ovlivňována zejména faktory biotickými. Biouhel shora uvedené abiotické faktory přímo ovlivňuje a zlepšuje. Složení půdních bakteriálních společenstev silně koreluje s pH půdy. (Frac et al. 2018; Lasota et al. 2021).

Společenstva hub v půdách působí jako saprofágové, symbionti a patotrofní organismy. Ovlivňují zásoby uhlíku, retenci i dostupnost jiných živin. Do půd uvolňují extracelulární (mimobuněčné) enzymy (ECT), díky kterým jsou schopné podílet se na procesech jako je přenos živiny, přeměna organických látek v půdě a další. Houby jsou díky jejich schopnostem nejvíce prozkoumanými mikroby, které byly doposud v půdách studovány. Naprostá většina hub v půdách patří k rodu Ascomycota a Basidiomycota (Lasota et al. 2021). V souvislosti s tímto je nutné zmínit vliv hub na biouhel. Existují důkazy, že saprofytické houby dokáží biouhel rozkládat. (Wiednera & Glaser 2013). Biouhel je schopen snížit onemocnění rostlin tím, že potlačuje půdní patogeny (Dai et al. 2021). Dai et al. 2018 zjistili, že biouhel upřednostňuje růst saprofágů před půdními houbovými patogeny. Poskytuje totiž labilní uhlík pro jejich růst a zvyšuje jejich konkurenceschopnost vůči patogenům. Biouhel v půdě po dobu 3 let snížil hodnotu relativní abundance potenciálních půdních patogenů rostlin (např. *Fusarium*) a potlačil choroby plodin v černoze. Dalším příkladem je potlačení infekce *Fusarium* na kořenech chřestu biouhlem vyrobeným z kokosu a tvrdého dřeva (Dai et al. 2021).

8.5 NEGATIVNÍ ÚČINKY BIOUHLU

Jak je tomu téměř u všeho, tak ani biouhel nemá jen samá pozitiva. Jak již bylo zmíněno, tak jednou z výhod biouhlu je zvyšování elektrické konduktivity. To ovšem úzce souvisí s koncentrací solí rozpuštěných v biouhlu aplikovaném do půdy. Platí, že čím vyšší koncentrace solí, tím je lepší elektrická vodivost. Ta může negativně ovlivňovat rostliny, které jsou na zasolení citlivé. Proto je nutné porozumět koncentraci rozpustných solí v biouhlu (Singh et al. 2017). Zasolení je pro půdu ohrožujícím stavem a může vést k její degradaci (Daliakopoulos et al. 2016). Je však třeba rozlišovat zasolení půd jako přirozený půdotvorný proces (Chari et al. 2012) a zasolení vyvolané člověkem způsobené zejména nesprávným zavlažováním, používáním zimních posypů či nadměrným užíváním minerálních hnojiv (Fan et al. 2012).

Dalším negativem je vznik polycyklických aromatických uhlovodíků (PAH), jež vznikají pálením jakékoliv organické hmoty a při výrobě fosilních paliv. Tyto environmentální polutanty se po svém uvolnění z organické hmoty pomalu přesouvají do složek životního prostředí včetně půdy. Mají na půdu škodlivý vliv. Pro lidský organismus jsou nebezpečné. Jedná se o karcinogeny. Jsou to o perzistentní látky, které jsou v životním prostředí všudypřítomné. Dalšími podobnými látky jsou těkavé organické sloučeniny (VOC). Polycyklické aromatické uhlovodíky a VOC vytvořené tepelnou úpravou při pyrolýze se zachycují uvnitř pórů biouhlu nebo se na něj ukládají při procesu chlazení. V půdě se z biouhlu uvolňují a negativně ovlivňují produktivitu rostlin a mikrobiální reakce. Lidé pak mohou být negativním vlivům uvedených látek vystaveni tak, že pozřou ovoce/zeleninu vyrobenou v půdě, do které se tyto látky prostřednictvím biouhlu dostaly (Dutta et al. 2016).

9. METODIKA

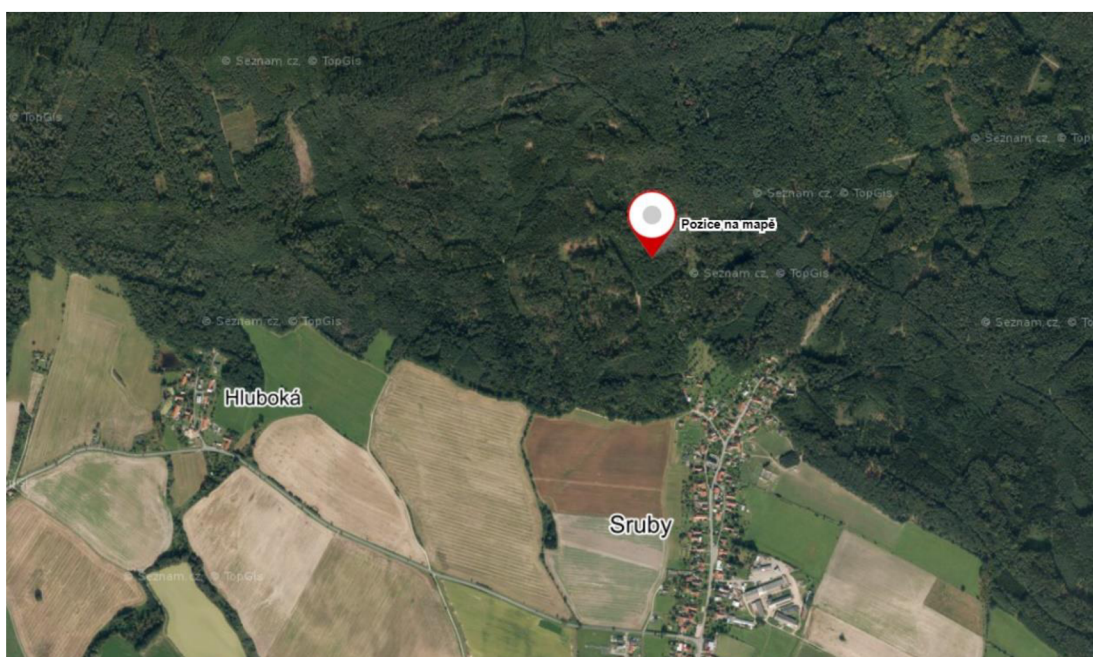
Smrkový biouhel byl aplikován v květnu 2020 na lokalitě Sruby na půdy pod smrkový a dubový porost. Po 24 měsících od aplikace byly odebrány vzorky půdních horizontů (organické FH horizonty) a vrstev (0 - 5 a 5 - 20 cm) z každé ošetřené a biouhlem neošetřené plochy. Celkem bylo vzorkováno 6 ploch pod smrkem s aplikací a 6 ploch bez aplikace, pod dubovým porostem rovněž 6 ploch s aplikací a 6 bez aplikace. Celkem tak bylo odebráno 72 půdních vzorků. Stanoveny byly základní půdní vlastnosti, a to zejména pH půd a sorpční komplex. Aplikována byla dávka 1 kg m^{-2} (10 t ha^{-1}) biouhlu vždy na 6 ploch o velikosti $10 \times 10 \text{ m}$ (100 m^2) v každém porostu. Aplikován byl biouhel vyrobený ze smrkového dřeva, který vyrobila firma Biochar Foundation, nadační fond (pH 9,59 +/- 0,1; n = 3).

9.1 CHARAKTERISTIKA STUDIJNÍHO ÚZEMÍ, METODY SBĚRU

Lokalita odběru vzorků a aplikace biouhlí se nachází u obce Sruby v okrese Ústí nad Orlicí v Pardubickém kraji České republiky (obrázky č. 7 - 9). GPS souřadnice jsou (50.0070892N, 16.1720667E). Biouhel byl aplikován párově do půd Diecézních lesů zde se vyskytujících stejnověkých smrkových a dubových porostů. Pro smrkový i dubový porost bylo vybráno po 6 místech (celkem 72 stanovišť) o velikosti $10 \times 10 \text{ m}$ pro aplikaci biouhlu (pokusná plocha s uhlím a kontrolní stanoviště, viz obr. č. 10). Kontrolní a pokusné plochy v páru se po vegetační a půdní stránce výrazně nelišily. Na každém stanovišti byly odebrány půdní vzorky z půdní sondy - viz obrázek č. 11 a to přítomné horizonty v čase +24 měsíců (FH, 0 - 5, 5 - 20 cm). Změřeny byly mocnosti horizontů a sondy byly následně popsány.



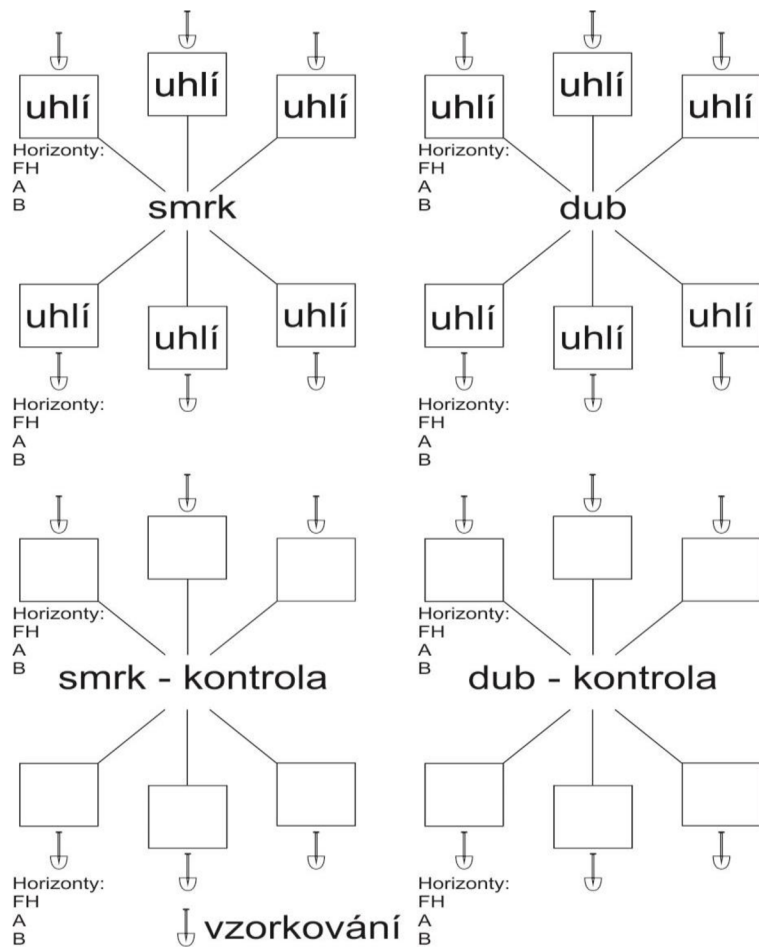
Obrázek 7: Lokalita pokusu - Sruby (www.mapy.cz).



Obrázek 8: Bližší pohled na lokalitu pokusu - Sruby (www.mapy.cz).



Obrázek 9: Lesní smrkový porost (lokalita pokusu) – Sruby (Tejnecký V. 2022).



Obrázek 10: Schéma založení experimentu pro aplikaci biouhlu do půd v lesním prostředí (Tejnecký V., nepublikováno)



Obrázek 11: Porovnání půdních sond na předmětné lokalitě, zákopek 5SU (smrk-uhlí) a 5SK (smrk-kontrola) – Sruby (Tejnecký V. 2022).

9.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Získané půdní vzorky prošly sušícím procesem v sušárně značky Memmert při teplotě 40°C, poté byly rozmělněny a následně byly sítem přesáty na frakci o velikosti < 2 mm. U takto předpřipravených vzorků bylo stanoveno aktivní a v 0,01 M roztoku CaCl_2 výměnné pH ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ a $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$). Byla rovněž provedena extrakce pomocí 0,1 M roztoku BaCl_2 , ze kterého byly stanoven sorpční komplex pro jednotlivé vzorky.

9.3 PRACOVNÍ POSTUPY

Práce s odebranými vzorky probíhala dle metodiky International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests 2020). Kalibrace pH metru (Multi 3620 IDS, WTW, Germany) byla provedena v den měření.

9.4 STANOVENÍ AKTIVNÍHO pH ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$)

pH půdy je měřeno v suspenzi supertanantu v poměru objemové frakce 1:5. Roztok je připravován přidáním deionizované vody (H_2O). Odebírá se vždy vysušený vzorek půdy minimálně o objemu 5 ml o frakci < 2 mm. Poté je k dosažení potřebného poměru přidán pětinásobek jeho objemu deionizované vody (H_2O). Následuje třepání 60 min \pm 10 min a poté čekání alespoň 1 hodinu, nejdéle však 3 hodiny. Během čekání jsou vzorky uzavřeny, aby bylo zabráněno pronikání vzduchu (Cools & De Vos 2020).

Postup: Nejprve byly připraveny/odměřeny všechny půdní vzorky (celkem 72 vzorků) a to pomocí zarovnané plastové odměrky o objemu 5 ml. Vzorky půdy byly vkládány do plastových lahviček o objemu 50 ml značky Labcon. Poté bylo do každého vzorku dávkovačem značky Dispensette přidáno 25 ml deionizované vody. Následovalo třepání vzorků po dobu jedné hodiny (125 kmitů za min) na třepače značky LT2. Po třepání byly vzorky ponechány 1 h v klidu. Poté byly zkalibrovaným přístrojem - pH metrem značky Multi 3620 IDS, WTW, Germany a elektrodou značky WTW měřeny hodnoty všech 72 půdních vzorků. Měření bylo prováděno s aretací (Cools & De Vos 2020).

9.5 STANOVENÍ VÝMĚNNÉHO pH ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$)

pH půdy je měřeno v suspenzi supertanantu v poměru objemové frakce 1:5. Roztok je připravován přidáním chloridu vápenatého (1 mol/l). Odebírá se vždy vysušený vzorek půdy minimálně o objemu 5 ml o frakci < 2 mm. Poté je k dosažení potřebného poměru přidán pětinásobek jeho objemu chloridu vápenatého. Následuje třepání 60 min \pm 10 min a poté čekání alespoň 1 hodinu, nejdéle však 3 hodiny. Během čekání jsou vzorky uzavřeny, aby bylo zabráněno pronikání vzduchu (Cools & De Vos 2020).

Postup: První krok byl totožný jako u metody měření aktivního pH, tedy příprava/odměření půdních vzorků (celkem 72 vzorků) pomocí zarovnané plastové odměrky o objemu 5 ml do plastových lahviček o objemu 50 ml značky Labcon. Druhým krokem byla příprava roztoku 0,01 M CaCl_2 .

Postup přípravy roztoku byl následovný. Do kádinky bylo naváženo 1,47 g čisté chemikálie CaCl_2 na 1 litr tekutiny (celkem tedy 2,94 g). Dále bylo do každého vzorku (celkem 72 kusů) přidáno dávkovačem značky Dispensette celkem 25 ml roztoku. Poté byly vzorky třepány na třepačce značky LT2 po dobu 60 minut při 125 kmitech za hodinu. Následovalo ponechání vzorků v klidu po dobu 60 minut. Poté následovalo měření pH, které bylo provedeno zkalibrovaným pH metrem značky Multi 3620 IDS, WTW, Germany a elektrodou značky WTW a to u všech 72 připravených roztoků (Cools & De Vos 2020).

9.6 SORPČNÍ KOMPLEX, MĚŘENÍ VÝMĚNNÉHO pH ($\text{pH}_{\text{BaCl}_2}$)

Tato metoda spočívá v ošetření půdy (půdních vzorků) chloridem barnatým (1 mol/l). Roztok půdy nasytí kationty Ba^{2+} , kterých je přebytek a tyto jsou absorbovány půdou. Tím dochází k tomu, že jsou bazické kationty sodíku (Na^+), draslíku (K^+), hořčíku (Mg^{2+}) a vápníku (Ca^{2+}) a kyselé kationty manganu (Mn^{2+}), hliníku (Al^{3+}) a železa (Fe^{3+}) vytlačeny do roztoku. V roztoku pak probíhá měření výměnného pH. Dále se z roztoku provádí určení prvkové analýzy a to pomocí optické emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES). Množství 0,1 M BaCl_2 extrahovaných prvků (Mg, Na, K, Ca, Mn, Fe, Al) bylo stanoveno pomocí optického spektrometru (iCAP 7000, DUO iCap 7000, Thermo Scientific, Waltham, MA, USA) za standardních analytických podmínek.

Vzorky byly 2 hodiny třepány a poté vloženy do centrifugy při minimálně 3000 otáčkách na dobu 10 minut. Poté byly vzorky přefiltrovány filtračním papírem (Cools & De Vos 2020).

Postup: Nejprve byly naváženy všechny půdní vzorky (72 kusů) a to vždy po 2,5 g půdy (povolená odchylka +/- 0,005 g). Poté následovala příprava roztoku 0,1 M BaCl_2 .

Do kádinky bylo naváženo 24,428 g čisté chemikálie BaCl_2 na 1 litr roztoku (celkem tedy 73,284 g). Dále bylo do každého vzorku (celkem 72 kusů) přidáno dávkovačem značky Dispensette celkem 30 ml roztoku. Poté byly vzorky třepány třepačkou značky LT2 po dobu 120 minut (125 kmitů za min). Po třepání byly vzorky vloženy do centrifugy značky EPPENDORF Centrifuge 5810, která byla nastavena na 4000 otáček min^{-1} a centrifugace probíhala po dobu 10 minut. Poté byly půdní vzorky pomocí skleněné nálevky a filtračního papíru typu KA 3 (rychlý) přefiltrovány, čímž se kapalina zcela oddělila od pevných částic půdy. Kapalina byla filtrována do nových 50 ml plastových lahvíček značky Labcon. Takto vytvořený roztok byl následně využit pro prvkovou analýzu pomocí ICP-OES a změření pH pro výpočet výměnného H^+ .

Následovalo měření pH, které bylo provedeno zkalibrovaným pH metrem značky Multi 3620 IDS, WTW, Germany a elektrodou značky WTW a to u všech 72 roztoků (Cools & De Vos 2020).

Pro změření prvkového složení (sorpčního komplexu) bylo u všech 72 vzorků provedeno naředění (celkem 11x). Nejprve bylo pomocí pipety (Eppendorf) z každého vzorku pipetován 1 ml roztoku přefiltrovaného chloridu barnatého, tento vložen do kádinky. Do kádinky bylo dále prostřednictvím dávkovače značky Dispensette přidáno 10 ml roztoku 2 % HNO₃. 10 ml roztoky byly dále přefiltrovány skrze jednorázový nylonový membránový filtr značky VWR, 0,45 μm (Cools & De Vos 2020).

9.7 VÝPOČTY

Určení výměnných kationtů (Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn), tzv. iontový ekvivalent se provádí následujícím výpočtem:

$$IE = \frac{c * V}{m * EQ * 10}$$

Kde:

IE = iontový ekvivalent v cmol/kg

c = koncentrace prvků v extraktu v mg/l – veškeré hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 2.

V = objem přidaného roztoku chloridu barnatého v ml (30ml)

m = hmotnost vzorku půdy v g (2,5 g)

EQ = ekvivalentní hmotnost prvku v g/mol

EQ jednotlivých prvků: Na⁺ = 22,99; Ca²⁺ = 20,04; Fe³⁺ = 18,62; Al³⁺ = 8,99; K⁺ = 39,10; Mg²⁺ = 12,16; Mn²⁺ = 27,47; H⁺ = 1,0

Určení volných H⁺. tzv. protonový ekvivalent na gram půdy se provádí na základě výpočtu:

$$H^+ (cmol / kg) = 10^{-1} * \frac{(10^{-pH_p} - 10^{-pH_0}) * V * 1000}{m * 0,88} - \frac{c(Al) * V}{m * M(Al) * \left(1 + \frac{10^{-pH_p}}{10^{-5,85}}\right)}$$

Kde:

H^+ = volný H^+ v cmol/kg

10^{-1} = konverzní faktor mezi jednotkami ($\mu\text{mol/g}$ na cmol/kg)

Ph_P = hodnota pH extraktu $BaCl_2$ po vyluhování – hodnoty jsou uvedené v příloze č. 1

Ph_0 = hodnota pH čistého extraktu $BaCl_2$ (5,47 pH)

V = konečný objem extraktu v ml (30 ml)

m = hmotnost laboratorního vzorku v g (2,5 g)

$c(Al)$ = koncentrace hliníku v extraktu $BaCl_2$ v mg/l

$M(Al)$ = Molární hmotnost hliníku v g/mol (26,98 g/mol)

Kationtová výměnná kapacita (KVK), saturace bází a výměnná acidita jsou pak spočítány následovně:

$$KVK \text{ (cmol + kg}^{-1}\text{)} = BC + EA$$

$$KVK \text{ (cmol + kg}^{-1}\text{)} = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+ + Al^{3+} + Fe^{3+} + Mn^{2+} + H^+$$

$$BC \text{ (cmol + kg}^{-1}\text{)} = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+$$

$$EA \text{ (cmol + kg}^{-1}\text{)} = Al^{3+} + Fe^{3+} + Mn^{2+} + H^+$$

$$BS \text{ (\%)} = BC/KVK * 100$$

KVK - kationtová výměnná kapacita (cmol + kg⁻¹)

$Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+ + Al^{3+} + Fe^{3+} + Mn^{2+} + H^+$ - iontový ekvivalent (IE, cmol + kg⁻¹)

BC - bazické kationty (cmol + kg⁻¹)

EA – výměnná acidita (cmol + kg⁻¹)

BS - saturace bází - nasycenost sorpčního komplexu bazickými kationty (%)

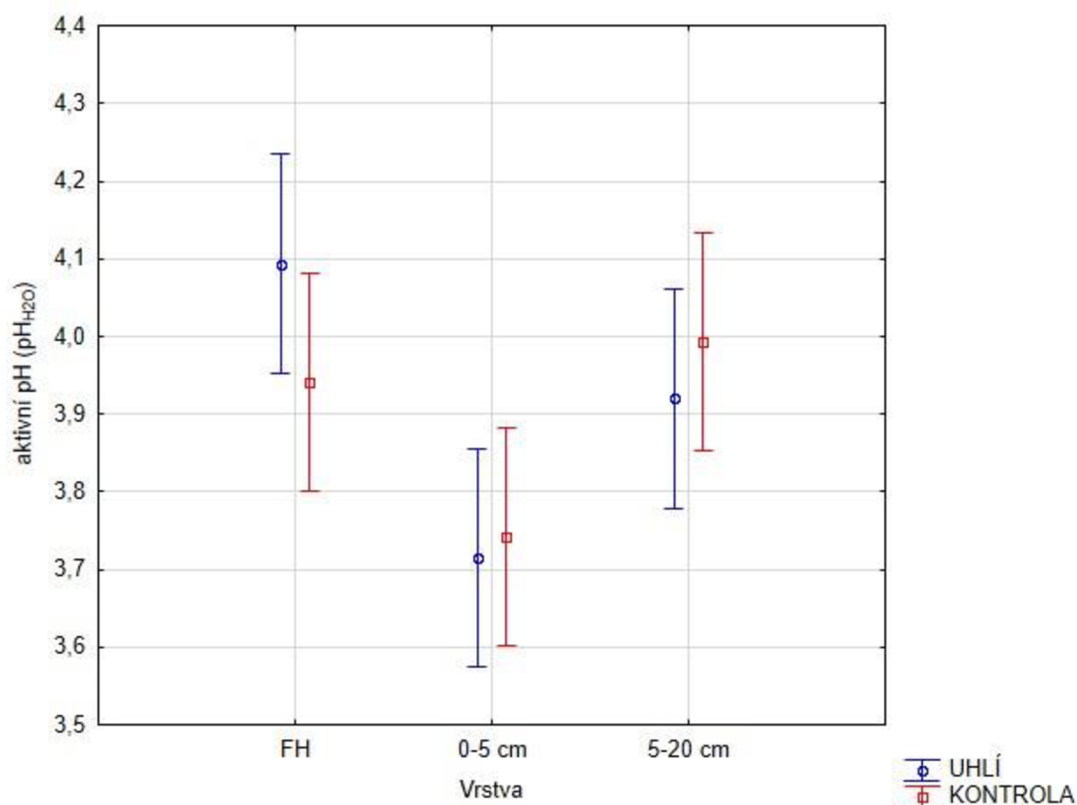
9.8 ZPRACOVÁNÍ DAT, STATISTIKA

Výsledky měření pH přístrojem pH metr (Multi 3620 IDS, WTW, Germany) byly okamžitě po změření zapisovány do předem vytvořené tabulky v programu Microsoft Excel, kde byly provedeny i následné výpočty KVK a grafické výstupy. Pro statistické zpracování dat byl použit program STATISTICA Cz 12. Statistická významnost byla určena jako $p = 0,05$. Byly použity následující statistické metody: jednofaktorová, vícefaktorová analýza rozptylu (ANOVA), základní statistické souhrny dat.

10. VÝSLEDKY

10.1 AKTIVNÍ pH ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$)

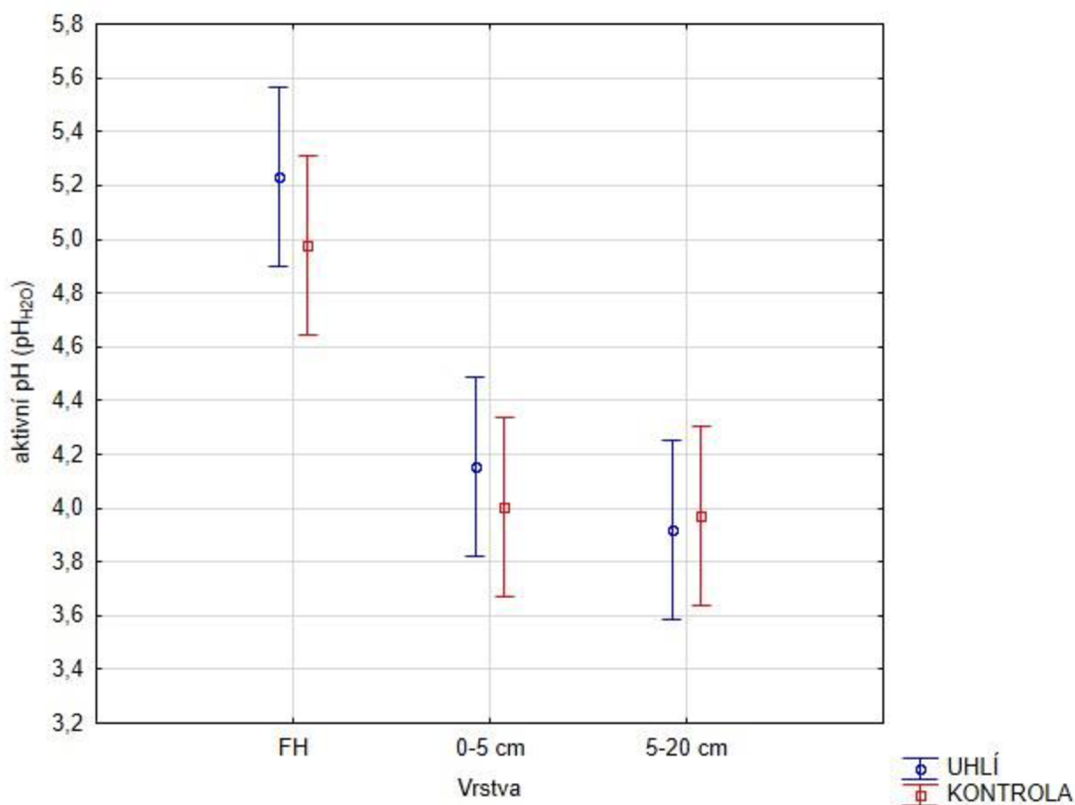
Z obrázku č. 12 níže je patrné, že nejvyšších hodnot aktivního pH ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) dosahuje pro smrkové dřeviny půda v organickém horizontu FH. V tomto horizontu bylo zjištěno statisticky významného rozdílu ($p=0,018$), kdy průměrné hodnoty mezi kontrolami a aplikacemi (KONTROLA-UHLÍ) byly s rozdílem 0,15 pH (směrodatná odchylka aplikace 0,11). Celkově bylo v půdě po aplikaci biouhlu změřeno nejnižší pH ve vrstvě 0-5 cm s hodnotou 3,53 pH a nejvyšší pH vykazoval vzorek získaný z vrstvy 5-20 cm s hodnotou 4,39 pH (nejvyšší hodnota pH pro horizont FH byla 4,29 pH).



Obrázek 12: Porovnání změn aktivního pH ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) v půdách pod smrkovým porostem po aplikaci biouhlu (UHLÍ) a bez aplikace biouhlu (KONTROLA) ve všech vzorkovaných horizontech (vrstvách). Průměrné hodnoty a 95 % interval spolehlivosti, počet opakování = 36.

Půda pod dubovými dřeviny vykazuje nejvyšší hodnoty aktivního pH ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) taktéž v horizontu FH s průměrem hodnot aplikací 5,23 pH (sm. odch. 0,51), porovnej s průměrem aplikací u vrstev 0–5 cm/5–20 cm - 4,15/3,92 pH. Nejnižší hodnota pro aplikaci byla naměřena ve vrstvě 5–20 cm a to 3,78 pH (nejnižší výsledek ve stejné vrstvě pro kontrolní stanoviště byl 3,75 pH). 5,92 pH byla nejvyšší naměřená hodnota a to v horizontu FH. Rozdíl hodnot pro žádnou z vrstev (horizontů) nebyl vyhodnocen

jako statisticky významný, nicméně navýšení pH, zejména u horizontu FH a vrstvy 0-5 cm, bylo prokázáno (obrázek č. 13).



Obrázek 13: Porovnání změn aktivního pH ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) v půdách pod dubovým porostem po aplikaci biouhlu (UHLÍ) a bez aplikace biouhlu (KONTROLA) ve všech vzorkovaných horizontech (vrstvách). Průměrné hodnoty a 95 % interval spolehlivosti, počet opakování = 36.

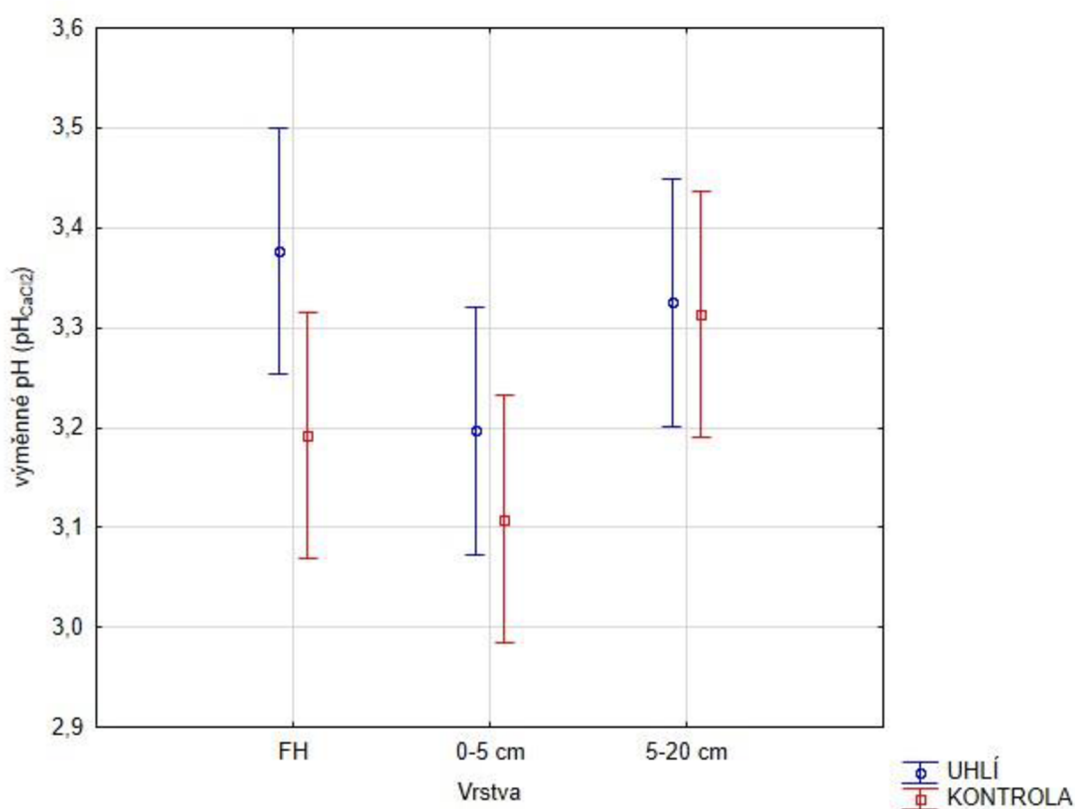
Bližší informace pro aktivní pH ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) jsou uvedeny v následující tabulce č. 5.

Tabulka 5: Přehled základních statistických údajů k měřenému aktivnímu pH ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) pro půdy vegetace dub a smrk (U-aplikace uhlí; K-místo bez aplikace uhlí, n=počet opakování).

SMRK						
Typ	Vrstva	Průměr	Sm. odch.	n	Min	Max
U	FH	4,09	0,11	6	3,96	4,29
U	0-5 cm	3,72	0,14	6	3,53	3,92
U	5-20 cm	3,92	0,23	6	3,72	4,39
K	FH	3,94	0,05	6	3,87	4,03
K	0-5 cm	3,74	0,15	6	3,55	3,96
K	5-20 cm	3,99	0,18	6	3,75	4,35
DUB						
Typ	Vrstva	Průměr	Sm. odch.	n	Min	Max
U	FH	5,23	0,51	6	4,44	5,92
U	0-5 cm	4,15	0,31	6	3,79	4,17
U	5-20 cm	3,92	0,11	6	3,78	4,08
K	FH	4,98	0,60	6	4,15	5,76
K	0-5 cm	4,00	0,22	6	3,75	4,28
K	5-20 cm	3,97	0,11	6	3,86	4,19

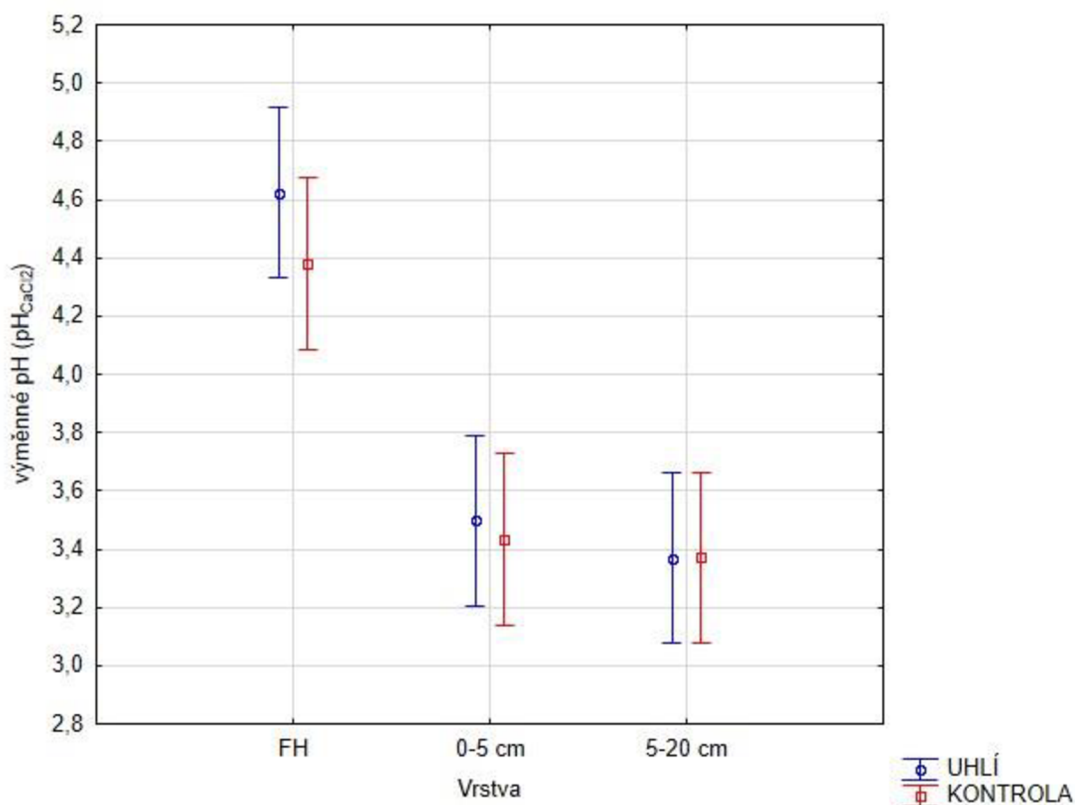
10.2 VÝMĚNNÉ pH ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$)

Výsledky měření výměnného pH ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$) pro půdy pod smrkovým porostem jsou graficky znázorněny na obrázku č. 14. Zvýšení pH zde proběhlo ve všech třech vrstvách (horizontech), přičemž pro horizont FH je statisticky významné ($p=0,039$) s průměrnou hodnotou pro stanoviště s aplikací 3,38 pH, oproti kontrolnímu stanovišti ve stejném horizontu se jedná o navýšení o 0,19 pH. Rozdíl navýšení pH ve vrstvě 0-5 cm je 0,09 a pro vrstvu 5-20 cm již jen 0,02 pH. Lze tak konstatovat, že s hloubkou změny pH slábnou. Nejvyšší hodnota pH byla zaznamenána u aplikace horizontu FH (3,66 pH).



Obrázek 14: Porovnání změn výměnného pH ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$) v půdách pod smrkovým porostem po aplikaci biouhlu (UHLÍ) a bez aplikace biouhlu (KONTROLA) ve všech vzorkovaných horizontech (vrstvách). Průměrné hodnoty a 95 % interval spolehlivosti, počet opakování = 36.

Níže na obrázku č. 15 jsou graficky zobrazeny výsledky měření výměnného pH pro půdy pod dubovou vegetací. Nejvyšší hodnoty $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ byly zjištěny v horizontu FH. Tyto hodnoty jsou o několik řádků výše, než-li hodnoty ve zbývajících vrstvách (0-5 a 5-20 cm). Nejvyšší hodnoty byly naměřeny právě v horizontu FH s výsledkem 5,18/5,20 pH (aplikace/kontrola). Nejnižší hodnoty aplikací a kontrol ve vrstvách 0-5 cm a 5-20 cm se všechny pohybovali v rozmezí 3,23 - 3,35 pH.



Obrázek 15: Porovnání změn výměnného pH (pH_{CaCl_2}) v půdách pod dubovým porostem po aplikaci biouhlu (UHLÍ) a bez aplikace biouhlu (KONTROLA) ve všech vzorkovaných horizontech (vrstvách). Průměrné hodnoty a 95 % interval spolehlivosti, počet opakování = 36.

Bližší informace pro výměnné pH (pH_{CaCl_2}) jsou uvedeny v následující tabulce č. 6.

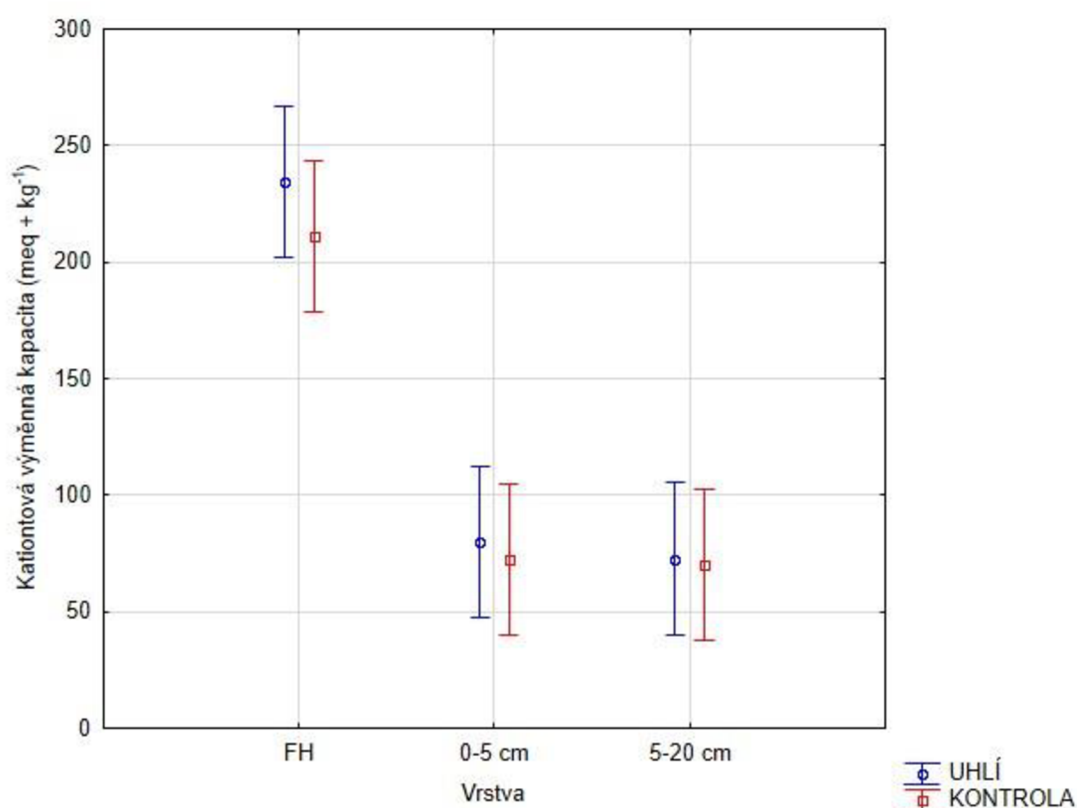
Tabulka 6: Přehled základních statistických údajů k měřenému výměnnému pH (pH_{CaCl_2}) pro půdy s vegetací dub a smrk (U-aplikace uhlí; K-místo bez aplikace uhlí, n=počet opakování).

SMRK						
Typ	Vrstva	Průměr	Sm. odch.	n	Min	Max
U	FH	3,38	0,17	6	3,17	3,66
U	0-5 cm	3,20	0,14	6	2,98	3,42
U	5-20 cm	3,33	0,15	6	3,17	3,63
K	FH	3,19	0,05	6	3,14	3,28
K	0-5 cm	3,11	0,12	6	2,92	3,33
K	5-20 cm	3,31	0,15	6	3,13	3,61
DUB						
Typ	Vrstva	Průměr	Sm. odch.	n	Min	Max
U	FH	4,62	0,41	6	4,02	5,18
U	0-5 cm	3,50	0,07	6	3,35	3,57
U	5-20 cm	3,37	0,08	6	3,25	3,50
K	FH	4,38	0,63	6	3,54	5,20
K	0-5 cm	3,43	0,20	6	3,23	3,67
K	5-20 cm	3,37	0,07	6	3,30	3,47

Veškeré naměřené a zjištěné hodnoty aktivního a výměnného pH ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$; $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ a $\text{pH}_{\text{BaCl}_2}$) jsou uvedeny v příloze č. 1.)

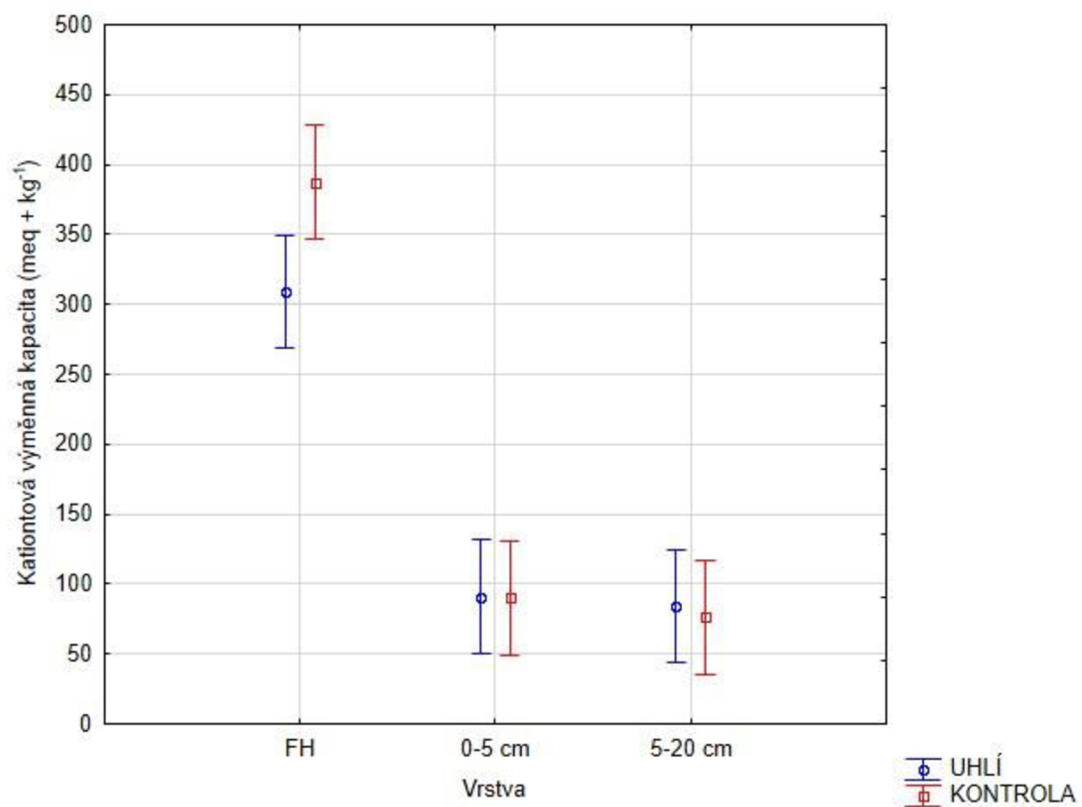
10.3 KATIONTOVÁ VÝMĚNNÁ KAPACITA

Níže uvedený obrázek č. 16 zobrazuje změny výměnných kationtů proběhlé v půdách pod smrkovou vegetací po přepočtu v jednotkách $\text{meq} + \text{kg}^{-1}$. Z grafu je patrné, že oproti vrstvám 0-5 a 5-20 cm je vyšší KVK v organickém horizontu FH. Průměr pro FH horizont je pro aplikace 235 $\text{meq} + \text{kg}^{-1}$. Pro vrstvy 0-5 cm a 5-20 cm je to u aplikací již 80 a 73. Rozdíly nebyly vyhodnoceny jako statisticky významné, zvýšení hodnot však proběhlo ve všech úrovních vzorkovaného terénu. Nejvyšší rozdíl byl u horizontu FH.

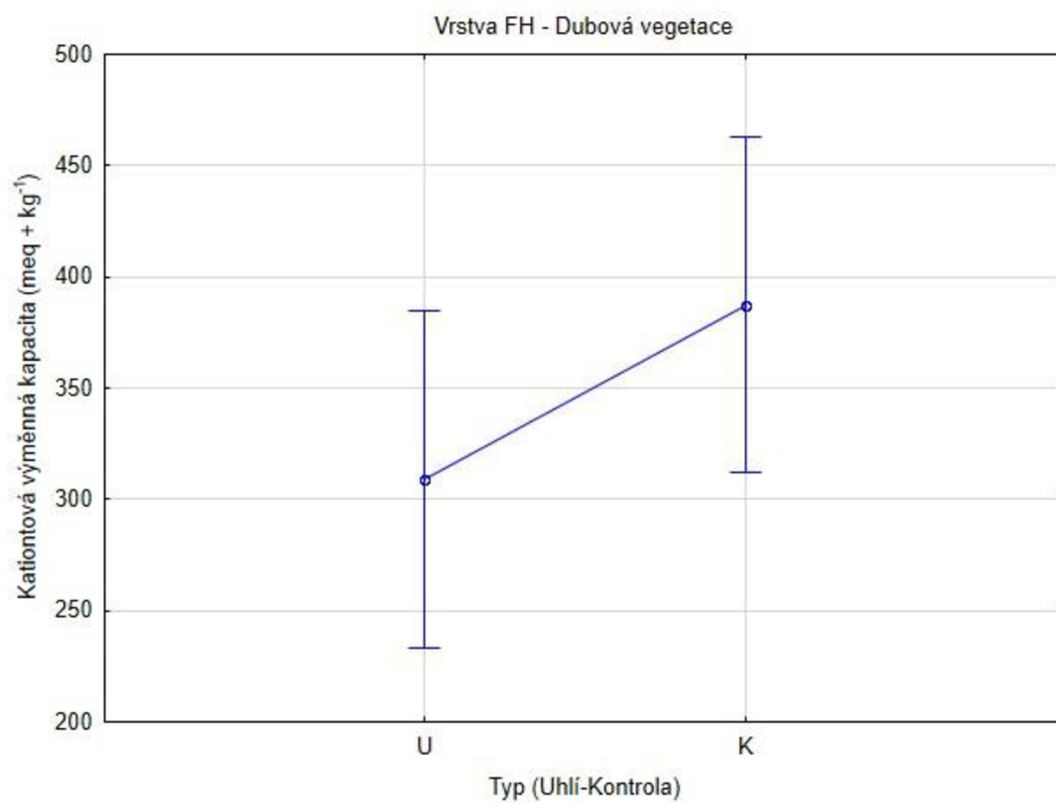


Obrázek 16: Porovnání změn kationtové výměnné kapacity v půdách pod smrkovým porostem po aplikaci biouhlu (UHLÍ) a bez aplikace biouhlu (KONTROLA) ve všech vzorkovaných horizontech (vrstvách). Průměrné hodnoty a 95 % interval spolehlivosti, počet opakování = 36.

Půdy pod dubovou vegetací vykazovaly snížení hodnot KVK v horizontu FH, zbývající vrstvy 0-5 a 5-20 cm byly téměř beze změny, viz obrázky č. 17 a 18. Rozdíl v horizontu FH sice není statisticky významný, ale je znatelný (rozdíl v průměrných hodnotách mezi aplikacemi a kontrolami je 79 $\text{meq} + \text{kg}^{-1}$).



Obrázek 17: Porovnání změn kationtové výměnné kapacity v půdách pod dubovým porostem po aplikaci biouhlu (UHLÍ) a bez aplikace biouhlu (KONTROLA) ve všech vzorkovaných horizontech (vrstvách). Průměrné hodnoty a 95 % interval spolehlivosti, počet opakování = 36.

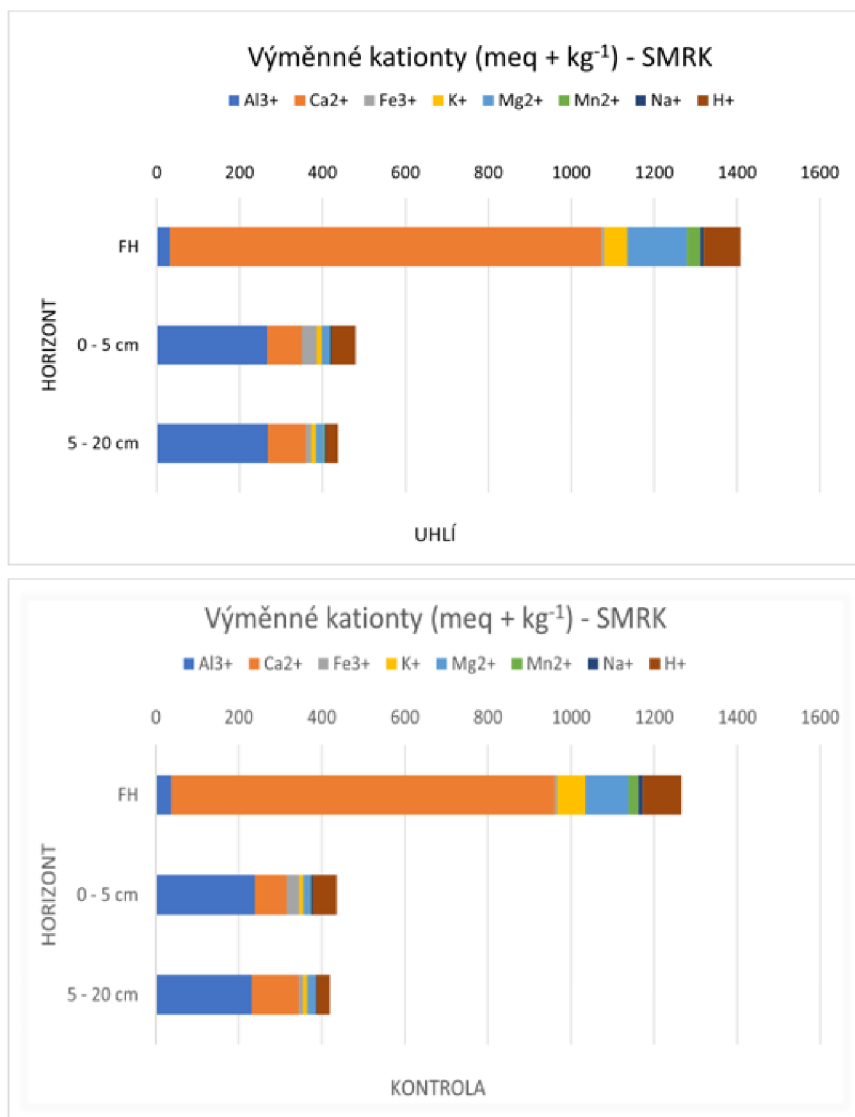


Obrázek 18: Snížení hodnot KVK ($\text{meq} + \text{kg}^{-1}$) v půdě horizontu FH u dubové vegetace mezi stanovišti, kde byla provedena aplikace biouhlu a kde nikoliv. Průměrné hodnoty a 95 % interval spolehlivosti, počet opakování = 12.

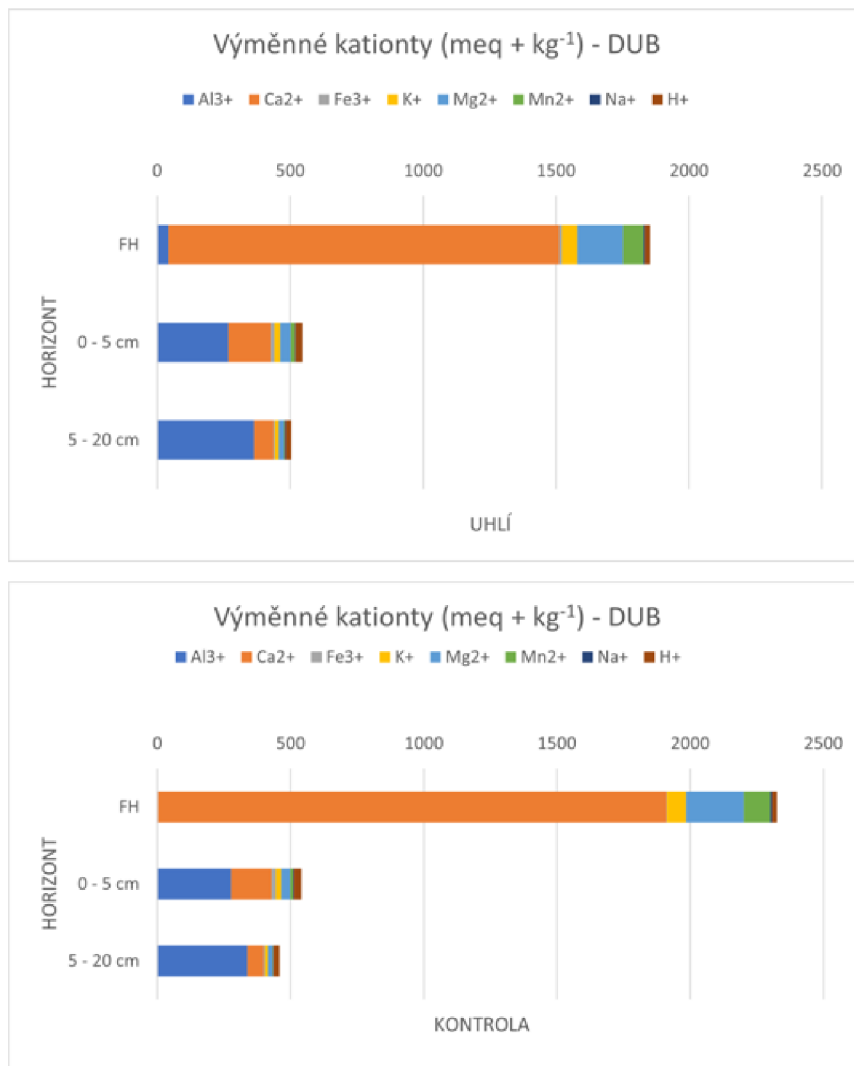
Tabulka 7: Přehled základních statistických údajů k měřeným hodnotám KVK kationtů ($Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+ + Al^{3+} + Fe^{3+} + Mn^{2+} + H^+$) pro půdy pod vegetací dub a smrk (U-aplikace uhlí; K-místo bez aplikace uhlí, n=počet opakování).

SMRK						
Typ	Vrstva	Průměr	Sm. odch..	n	Min	Max
U	FH	234,71	60,71	6	185,59	369,97
U	0-5 cm	79,99	8,72	6	66,27	94,11
U	5-20 cm	72,79	23,12	6	35,72	124,97
K	FH	210,98	48,61	6	144,37	288,83
K	0-5 cm	72,73	11,80	6	60,88	88,71
K	5-20 cm	69,98	20,03	6	50,30	96,83
DUB						
Typ	Vrstva	Průměr	Sm. odch.	n	Min	Max
U	FH	308,90	73,72	6	228,48	424,45
U	0-5 cm	91,10	4,24	6	80,59	97,36
U	5-20 cm	84,03	8,95	6	72,73	96,61
K	FH	387,54	82,16	6	276,75	498,39
K	0-5 cm	90,22	11,13	6	78,73	102,83
K	5-20 cm	76,26	7,38	6	66,55	86,29

Níže uvedené grafy zobrazené na obrázku č. 19 a 20 porovnávají obsah jednotlivých kationtů námi sledovaných prvků mezi stanovišti s kontrolami a aplikacemi biouhlu. Pro půdy smrkové vegetace je v horizontu FH dominantní kationt vápníku následovaný kationty manganu a vodíku. Níže uloženým vrstvám převládají kationty hliníku následované kationty vápníku. U půd pod dubovou vegetací dominují v organické FH vrstvě kationty vápníku následované kationty manganu a ve vrstvách pak převládají kationty hliníku, následované kationty vápníku. Nejvyšší změny proběhly v horizontu FH pro obě vegetace. Pro půdy pod smrkovou vegetací to bylo zvýšení koncentrace kationtů vápníku a pro půdy pod vegetací dubovou naopak snížení koncentrace kationtů vápníku. Tyto změny nebyly vyhodnoceny jako statisticky významné. Podrobněji lze nalézt jednotlivé hodnoty v tabulce č. 7 a taktéž na příloze č 2.



Obrázek 19: Porovnání koncentrací jednotlivých výměnných kationtů pro všechny měřené horizonty (vrstvy) mezi stanovišti kontrol (KONTROLA) a aplikacemi biouhlu (UHLÍ) v jednotkách meq + kg⁻¹ pro půdy smrkové vegetace.



Obrázek 20: Porovnání koncentrací jednotlivých výměnných kationtů pro všechny měřené horizonty (vrstvy) mezi stanovišti kontrol (KONTROLA) a aplikacemi biouhlu (UHLÍ) v jednotkách meq + kg⁻¹ pro půdy dubové vegetace.

11. DISKUZE

Ovlivnění půdní kyselosti

Biouhel přidaný do půdy prokazatelně snižuje její kyselost a tím zvyšuje pH. Je to dáno zvýšením koncentrace základních kationtů, které snižují půdní kyselost (Dai et al. 2013). Většina biouhlů je totiž alkalických a mají kapacitu pro neutralizaci kyselosti půd (Josseph et al. 2021). V rámci této studie bylo díky biouhlu aplikovanému do lesní půdy pod různé druhy vegetace pozorováno různého vlivu biouhlu v různých horizontech (vrstvách) lesní půdy. Nejzásadnější změna zvýšení pH byla pozorována u organické FH vrstvy a to u půd pod smrkovými porosty (pH_{H_2O} $p=0,018$), kam byl biouhel aplikován, více tabulka č. 5. U půd pod dubovou vegetací bylo navýšení pH viditelné rovněž v organickém horizontu FH, nicméně se nejednalo o statisticky významné rozdíly, přesto zde došlo k navýšení pH v horizontu FH o 0,25 jednotek pH pro pH_{H_2O} a o 0,24 jednotek pH pro pH_{CaCl_2} – viz tabulky č. 5 a 6. Půdy pod smrkovou vegetací jsou obecně oproti půdám pod dubovou vegetací kyselějšího rázu (Gruba & Mulder 2015). V této práci lze porovnat rozdíly průměrných hodnot pH u kontrolních stanovišť. Pro horizont FH je to pro půdy pod smrkem 3,94 a pod dubem 4,98 pH u aktivního pH (pH_{H_2O}). Pro výměnné pH (pH_{CaCl_2}) je rozdíl ještě vyšší (o 1,19 jednotek pH). Svoji roli zde hrála jistě kvalita a proces výroby použitého biouhlu, kdy oba tyto faktory přímo souvisí s výslednými vlastnostmi biouhlu (Josseph et al. 2021). K tomu bylo použito biouhlu vyrobeného ze smrkových dřevin. Pro půdu je totiž vhodnou variantou použití biomasy vyrobené rychlou pyrolýzou a ze dřeva. Takový biouhel je zásaditější a tím jsou umocněny i jeho účinky po samotné aplikaci do půdy (Glaser et al. 2002; Dai et al. 2013). Navíc biouhly vyrobené za vyšší teploty se vyznačují vyšší hodnotou pH. Změny v půdě zase silně korelují s tím, jak vysoké pH užitý biouhel má (Johanis et al. 2022). Neznamená to ale, že biouhel vyrobený za jiných podmínek či z jiné vstupní suroviny by byl nefunkční, mnoho studií již vliv biocharu na pH půd zkoumalo. Například Gul et al. 2015 uvádí, že použili biochar vyrobený pomalou pyrolýzou při teplotách 300 – 600 °C z různých druhů surovin biomasy, který konzistentně zvyšoval mimo jiné chemické aspekty půdy jako pH či kationtovou výměnnou kapacitu (KVK), ale i agregaci. Gul et al. 2015 také uvádí, že jimi zkoumané půdy Terra Preta, které jsou velmi bohaté na živiny, vykazovaly oproti neupraveným oxisolům vyšší pH v průměru o 1,5 – 1,7 jednotek pH, kdy se jednalo o statisticky významné rozdíly ($p < 0,05$). Ovšem zde je nutné zdůraznit, že půdy Terra Preta byly upraveny před nesrovnatelně delší dobou, než-li je tomu v našem výzkumu a tudíž změny, které tam proběhly, jsou na zcela jiné úrovni. Podobně jako půdy Terra Preta

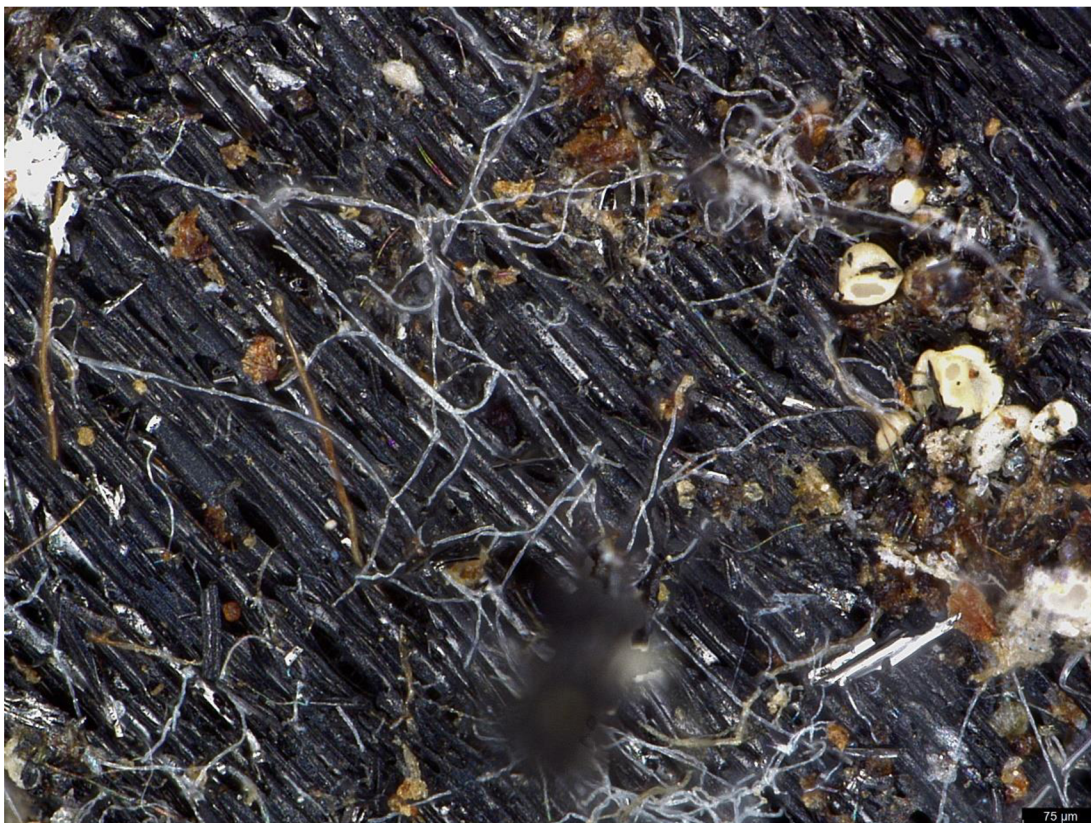
jsou na tom také půdy historických milířišť. Jedná se také, stejně jako u Terra Preta, o půdy vysoce produktivní, bohaté na živiny a stabilní (Borchard et al. 2014). Například Hirsch et al. (2017) provedl měření půd milířišť, kde bylo zjištěno, že výměnné pH milířišť změřené v roztoku chloridu vápenatém se průměrně liší od kontrolních stanovišť v organickém horizontu AuH (srovnatelné s horizontem FH) o 0,75 pH, kdy se zvyšující se hloubkou uvedený průměr klesá. To je stejný trend, jaký byl pozorován v našem výzkumu. Tedy lze konstatovat, s přihlédnutím na věk milířišť (stovky let), že po chemické stránce (změna pH), souvisí síla zvýšení pH na době, po kterou biouhlí na půdu působí. Vliv aplikace biouhlu se v této studii neprojevil v níže uložených vrstvách (0-5 a 5-20 cm), kdy dokonce došlo k mírnému poklesu průměrné hodnoty pH. To bylo zřejmě způsobeno tím, že biouhel byl v půdě aplikován po kratší dobu (24 měsíců) a dosud plně nepronikl do nižších vrstev půdy. Lehké snížení pH zřejmě souvisí s nižším počtem dat a k tomu je všude statisticky nevýznamné.

Na základě výše uvedeného lze navrhnout zapravování biouhlu přímo do nižších vrstev půd. Bylo by to sice ekonomicky náročnější variantou, ale bylo by možné pozorovat, jak by se biouhel projevoval a pokud by způsoboval alespoň podobné navýšení pH v nižších vrstvách, jaké způsobuje v organické vrstvě, bylo by to úspěchem. K tomu je ale nutné vždy posoudit lokalitu případné aplikace a přihlédnout na okolní vegetaci, aby nedošlo spíše k poškození částí porostů (kořenů atd.).

Výměnné kationty

Aplikace biouhlu do půd má příznivé účinky a výrazně zvyšuje KVK půdy. Reliktní ohniště na dřevěné uhlí (milířišť) prokazují, že má dlouhodobý efekt (Mastrolonardo et al. 2019; Johanis et al. 2022). Zvýšení KVK je dáno zvýšením SOM. Zvyšuje se plocha pro adsorpci bazických kationtů (Liang et al. 2006). Biouhel také mění strukturu půdy. Ta se stává více pórovitou a agregátovou (Li et al. 2018). Na obrázku č. 21 je zobrazen biouhel po 24 měsících v půdě pod smrkovým porostem. Biouhel je obklopený mycelii hub, které se do něj zachytávají pro jejich vzájemnou komunikaci (Godbold et al. 2006). Jedná se o biouhel, který s půdou interagoval po dobu 2 let. Jde tak o střednědobé až dlouhodobé působení. Mastrolonardo et al. (2019) zaznamenali zdvojnásobení obsahu půdního dusíku v ornici na reliktních ohništích ve srovnání s referenčními půdami a také výrazné zvýšení koncentrace bází v ornici i v podloží. KVK byla vyšší v RCH půdách. Koncentrace Mg byly vyšší v podloží RCH. Ve studii provedené Faghihem et al. (2019) měla milířišť 75% nárůst Ca^{2+} a 65% nárůst Mg ve srovnání s kontrolami. Na^+ a K^+ také vykazovaly zvýšení, i když ne v rozsahu Mg a Ca^{2+} . Johanis et al. (2022) pozorovali nárůst bazických kationtů na milířišťích v České republice. Zejména pak Ca, H, Mn, K. Nejznamenatelnější nárůst byl

v organickém horizontu FH. Vápník a mangan se však významně zvýšil i v minerální vrstvě, avšak došlo k prudkému poklesu hliníku. V našem experimentu došlo k nejvýznamnějším změnám taktéž v organickém horizontu FH. Sice nebylo zjištěno statisticky významných změn, nicméně k navýšení kationtů došlo. Zejména došlo ke zvýšení Ca^{2+} a Mg^{2+} v organickém FH horizontu u půd smrkové vegetace. U dubové vegetace došlo naopak ke snížení Ca^{2+} a Mg^{2+} v organickém FH horizontu za současného nárustu Al^{3+} . Pro vrstvy (0-5 a 5-20 cm) byly evidovány minimální rozdíly.



Obrázek 21: Mikroskopický snímek kousku smrkového biouhlu (75 μm) po dvou letech od aplikace biouhlu (Tejnecký V., nepublikováno).

Dále by bylo vhodné studovat také množství organického uhlíku obsaženého v půdě. Rovněž by bylo na místě rozšířit studování i o další druhy vegetace, díky čemuž by bylo možné porovnávat účinky biouhlu na české půdy pod různými druhy vegetace. Rovněž lze navrhnout studie i dalších parametrů, jako jsou biologické či fyzikální vlastnosti lesních půd.

12. ZÁVĚR

Cílem této práce byla analýza a následné vyhodnocení vlivu biouhlu na půdy pod dubovým a smrkovým porostem po 24 měsících od aplikace.

Smrkový biouhel aplikovaný pod smrkovou a dubovou vegetaci v obou případech snížil kyselost daných půd a zvýšil tak jejich hodnoty pH v organických horizontech FH. Zároveň došlo k navýšení koncentrací kationtů u sledovaných prvků. Množství kationtů prvků, zejména Ca^{2+} byly oproti kontrolním stanovištím, kde biouhel aplikován nebyl, podstatně vyšší a to v organickém FH horizontu. Rovněž bylo prokázáno, že biouhel výrazněji ovlivňuje smrkové podloží oproti dubovému. Tedy hypotéza byla potvrzena a nebyla zamítnuta.

Tato studie sice potvrzuje obecně známé účinky biouhlu, jako je např. změna chemických vlastností půdy (pH, KVK), nicméně zároveň poukazuje na to, že experiment provedený po dvou letech není ideální volbou a bylo by vhodné jej zopakovat po delší době, např. po 5-ti letech, či po 10-ti letech a poté dle výsledků dále.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Odborné publikace:

ATKINSON, C. J., FITZGERALD, J. D., HIPPS, N. A., 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil* 337. 1 – 18 s.

ATKINSON, C. J., 2018. How good is the evidence that soil-applied biochar improves water-holding capacity? *British Society of Soil Science*, 34 (2). 177 – 186 s.

BORCHARD, N., LADD, B., ESCHEMANN, S., HEGENBERG, D., MÖSELER, B. M., AMELUNG, W., 2014. Black carbon and soil properties at historical charcoal production sites in Germany. *Geoderma* 232 (234). 236 – 242 s.

BREWER, C. E., BROWN, R. C., 2012. Biochar. *Comprehensive Renewable Energy. Earth systems and Environmental Sciences*, 5. 357 – 384 s.

BROWN, T. R., WRIGHT, M. M., BROWN, R. C., 2011. Estimating profitability of two biochar production scenarios: slow pyrolysis vs fast pyrolysis. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining (Biofpr)*, 5 (1). 2 – 6 s.

BRUUN, E. W., MÜLLER-STÖVER, D., AMBUS, P., HAUGGAARD-NIELSEN, H., 2011. Application of biochar to soil and N₂O emissions: potential effects of blending fast-pyrolysis biochar with anaerobically digested slurry. *European Journal of Soil Science*, 62 (4). 581 – 589 s.

BUDAI, A., WANG, L., GRONLI, M., STRAND, L. T., ANTAL, M. J., ABIVEN, J. S., DIEUEZ-ALONSO, A., ANCA-COUCÉ, A., RASSE, D. P., 2014. Surface properties and chemical composition of corncob and Miscanthus biochars: effects of production temperature and method. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62 (17). 3791 – 3799 s.

CHARI, M. M., NEMATI, F., AFRASIAB, P., DAVARI, A., 2012. Prediction of evaporation from shallow water table using regression and artificial neural networks. *Journal of Agricultural Science*, 5 (1). 168 – 169 s.

CHEN, L., CHEN, X. L., ZHOU, C. H., YANG, H. M., JI, S. F., TONG, D. S., ZHONG, Z. K., YU, W. H., CHU, M. Q., 2017. Environmental-friendly montmorillonite-biochar composites: Facile production and tunable adsorption-release of ammonium and phosphate. *Journal of Cleaner Production*, 156. 648 – 659 s.

CHEN, W., MENG, J., HAN, X., LAN, Y., ZHANG, W., 2019. Past, present, and future of biochar. *Biochar*, 1. 75 – 87 s.

CHENG, C.H., LEHMANN, J., ENGELHARD, M. H., 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72. 1600 s.

CHEW, J., ZHU, L., NIELSEN, S., GRABER, E., MITCHELL, D. R., HORVAT, J., MOHAMMED, M., LIU, M., ZWIETEN, L., DONNE, S., MUNROE, P., TAHERYMOOSAVI, S., PACE, B., RAWAL, A., HOOK, J. MARJO, C., THOMAS, D. S., GENXING, P., LI, L., BIAN, R., FAN, X., 2020. Biochar-based fertilizer: Supercharging root membrane potential and biomass yield of rice. *Science of the Total Environment*, 713 (136431). 2 – 10 s.

DAI, Z., MENG, J., MUHAMMAD, N., LIU, X., WANG, H., HE, Y., BROOKES, P. C., XU, J., 2013. The potential feasibility for soil improvement, based on the properties of biochars pyrolyzed from different feedstocks. *Journal of Soils and Sediments*, 13. 989 – 1000 s.

DAI, Z., ENDERS, A., RODRIGUES, J. L. M., HANLEY, K. L., BROOKES, P. C., XU, J., LEHMANN, J., 2018. Soil fungal taxonomic and functional community composition as affected by biochar properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 126. 159 – 167 s.

DAI, Z., LI, Y., ZHANG, X., WU, J., LUO, Y., KUZYAKOV, Y., BROOKES, P. C., XU, J., 2019. Easily mineralizable carbon in manure-based biochar added to a soil influences N₂O emissions and microbial-N cycling genes. *Land Degradation and Development*, 30 (4). 406 – 416 s.

DAI, Z., XIONG, X., ZHU, H., XU, H., LENG, P., LI, J., TANG, C., XU, J., 2021. Association of biochar properties with changes in soil bacterial, fungal and fauna communities and nutrient cycling processes. *Biochar*, 3 (3). 239 – 254 s.

DALIAKOPOULOS, I. N., TSANIS, I. K., KOUTROULIS, A., KOURGIALAS, N. N., VAROUCHAKIS, A. E., KARATZAS, G. P., RITSEMA, C. J., 2016. The threat of soil salinity: A European scale review. *Science of The Total Environment*, 573. 727 – 739 s.

DEMIRBAS, A., GÖNENC, A., 2002. An overview of Biomass Pyrolysis. *Energy Sources*, 24 (5). 471 – 474 s.

DUTTA, T., KWON, E., BHATTACHARVA, S. S., JEON, B. H., DEEP, A., UCHIMIYA, M., KIM, K. H., 2016. Polycyclic aromatic hydrocarbons and volatile organic

compounds in biochar and biochar-amended soil: a review. *GCB-bioenergy*, 9 (6). 990 – 1004 s.

FAGHIH, F., EMADI, M., SADEGH-ZADEH, F., BAHMANYAR, M. A., 2019. Long-term charcoal-induced changes to soil properties in temperate regions of northern Iran. *Journal of Forestry Research*, 30 (2). 1063 - 1071 s.

FAN, L. S., PARK, A., 2004. CO₂ mineral sequestration in a high pressure, high temperature, 3-phase fluidized bed reactor. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 81. 855 – 890 s.

FAN, X., PEDROLI, B., LIU, G., LIU, Q., LIU, H., SHU, L., 2012. Soil salinity development in the yellow river delta in relation to groundwater dynamics. *Land Degradation and Development*, 23 (2). 175 – 189 s.

FAVERO, A., DAIGNEAULT, A., SOHNGEN, B., 2020. Forests: Carbon sequestration, biomass energy, or both? *Science Advances*, 6 (13). 1 – 13 s.

FRAC, M., HANNULA, S. E., BELKA, M., JEDRYCZKA, M., 2018. Fungal Biodiversity and Their Role in Soil Health. *Frontiers in Microbiology*, 9 (707). 1 – 6 s.

GLASER, B., LEHMANN, J., ZECH, W., 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – A review. *Biology and Fertility of Soils*, 35 (4). 219 – 230 s.

GOLDSTEIN I. S., SOLTES E. J., ELDER T. J., 1981: *Organic Chemicals From Biomass*, Chapter 5: pyrolysis. CRC Press. Boca Raton. 2 – 3 s.

GUL, S., WHALEN, J. K., THOMAS, B. W., SACHDEVA V., DENG, H., 2015. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 206. 46 – 59 s.

GLISCZYNSKI, F. V, PUDE, R., AMELUNG, W., SANDHAGE-HOFMANN, A., 2016. Biochar-compost substrates in short-rotation coppice: effects on soil and trees in a three-year field experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 179. 574 – 583 s.

GODBOLD, D. L., HOOSBEEK, M. R., LUKAC, M., COTRUFO, M. F., JANSSENS I. A., CEULEMANS, R., POLLE, A., VELTHORST, E. J., SCARASCIA-MUGNOZZA, G., ANGELIS, P., MIGLIETTA, F., PERESSOTI, A., 2006. Mycorrhizal Hyphal Turnover as a Dominant Process for Carbon Input into Soil Organic Matter. *Plant and Soil*, 281. 15 – 24 s.

GRISSE, R. D., ALLEY, M. M., HOLSHOUSER, D. L., THOMASON, W. E., 2005. Precision Farming Tools. Soil Electrical Conductivity. Virginia Cooperative Extension, 442 (508). 1 – 2 s.

GRUBA, P., MULDER, J., 2015. Tree species affect cation exchange capacity (CEC) and cation binding properties of organic matter in acid forest soils. *Science of the Total Environment*, 511. 655 - 662 s.

HARDY, B., LEIFELD, J., KNICKER, H., DUFEY, J. E., DEFORCE, K., CORNÉLIS, J. T., 2017. Long term change in chemical properties of preindustrial charcoal particles aged in forest and agricultural temperate soil. *Organic Geochemistry*, 107. 33 – 45 s.

HIRSCH, F., RAAB, T., OUMET, W., DETHIER, D., SCHNEIDER, A., RAAB, A., 2017. Soils on Historic Charcoal Hearths: Terminology and Chemical Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81 (6). 1427 – 1435 s.

IPPOLITO, J. A., CUI, L., KAMMANN, C., WRAGE-MÖNNIG, N., ESTAVILLO, J. M., FUERTES-MENDIZABAL, T., And Co., 2020. Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: A comprehensive meta-data analysis review. *Biochar*, 2. 421 – 438 s.

JOHANIS, H., LEHEJČEK, J., TEJNECKÝ, V., 2022. An insight into long-term effects of biochar application on forest soils. *European Journal of Forest Research*, 141. 213 – 224 s.

JOSSEPH, S., COWIE, A. L., ZWIETEN, L. V., BOLAN, N., BUDAI, A., BUSS, W., And Co., 2021. How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, 13 (11). 1731 – 1742 s.

KAMARUDIN, N. S., DAHALAN, F. A., HASAN, M., AN, O. S., PARMIN, N. A., IBRAHIM, N., And Co., 2022. Biochar: A Review of its History, Characteristics, Factors that Influence its Yield, Methods of Production, Application in Wastewater Treatment and Recent Development. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 12 (6). 7916 s.

KAMMANN, C. I., SCHMIDT, H. P., MESSERSCHMIDT, N., LINSEL, S., STEFFENS, D., MÜLLER, C., KOYRO, H. W., CONTE, P., JOSEPH, S., 2015. Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Scientific Reports*, 5 (11080). 1 – 10 s.

KERN, J., GIANI, L., TEIXEIRA, W., LANZA, G., GLASER, B., 2019. What can we learn from ancient fertile anthropic soil (Amazonian Dark Earths, shell mounds, Plaggen soil) for soil carbon sequestration? *CATENA*, 172. 104 – 112 s.

LAL, R., FOLLETT, R. F., KIMBLE, J. M., 2003. Achieving soil carbon sequestration in the United States: a challenge to the policy makers. *Soil Science*, 168 (12). 827 - 845 s.

LAIRD, D. A., BROWN, R. C., AMONETTE, J. E., LEHMANN, J., 2009. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining (Biofpr)*, 3 (5). 547 – 559 s.

LASOTA, J., BŁOŃSKA, E., BABIAK, T., PIASZCZYK, W., STEPNIEWSKA, H., JANKOWIAK, R., And Co., 2021. Effect of Charcoal on the Properties, Enzyme Activities and Microbial Diversity of Temperate Pine Forest Soils. *Forests*, 12 (1488). 1 – 17 s.

LEE, J. W., KIDDER, M., EVANS, B. R., PAIK, S., BUCHANAN, A. C., GARTEN, C. T., BROWN, R. C., 2010. Characterization of biochars produced from cornstovers for soil amendment. *Environmental of Science and Technology*, 44. 7970 – 7974 s.

LEHMANN, J., GAUNT, J., RONDON, M., 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11 (2). 403 – 427 s.

LEHMANN, J., 2007. A handful of carbon. *Nature*, 447. 143 – 144 s.

LEHMANN, J., RILLIG, M. C., THIES, J., MASIELLO, C. A., HOCKADAY, W. C., CROWLEY, D., 2011. Biochar effects on soil biota – a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43 (9). 1812 – 1836 s.

LI, Y., SHUAIDONG, H., CHEN, J., MÜLLER, K., 2018. Effects of biochar application in forest ecosystems on soil properties and greenhouse gas emissions: a review. *Journal of Soils and Sediments*, 18 (2). 546 – 563 s.

LIANG, B., LEHMANN, J., SOLOMON, D., KINYANGI, J., GROSSMAN, J., O'NEILL, B., SKJEMSTAD, J. O., THIES, J., LUIZAO, F. J., PETERSEN, J., NEVES, E. G., 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America*, 70. 1719 – 1730 s.

MAO, J. D., JOHNSON, R. L., LEHMANN, J., OLK, D. C., NEVES, E. G., THOMPSON, M. L., SCHMIDT-ROHR, K., 2012. Abundant and stable char residues in soils:

implications for soil fertility and carbon sequestration. *Environmental Science & Technology*, 46. 9571 – 9576 s.

MASTROLONARDO, G., CALDERARO, C., COCOZZA, 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 in Environmental Science*, 7 (51). 1 – 15 s.

MCKENDRY, P., 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83 (1). 37 s.

NGUYEN, B. T., LEHMANN, J., 2009. Black carbon decomposition under varying water regimes. *Organic Geochemistry*, 40 (8). 846 – 853 s.

NOVAK, J. M., CANTRELL, K. B., WATTS, D. W., 2013. Compositional and thermal evaluation of lignocellulosic and poultry litter chars via high and low temperature pyrolysis. *Bioenergy Research*, 6. 14 – 130 s.

O'CONNOR, W. K., DAHLIN, D. C., NILSEN, D. N., RUSH, G. E., WALTERS, R. P., TURNER, P. C., 2001. Carbon dioxide sequestration by direct mineral carbonation: results from recent studies and current status. National Energy Technology Laboratory (U.S.). 1 – 8 s.

QUILLIAM, R. S., GLANVILLE, H. C., WADE, S. C., JONES, D. L., 2013. Life in the 'charosphere' – does biochar in agricultural soil provide a significant habitat for microorganisms? *Soil Biology and Biochemistry*, 65. 287 - 293 s.

RACEK, J., SEVCIK, J., CHORAZY, T., HLAVINEK, P., KUCERIK, J., 2020. Biochar – Recovery Material from Pyrolysis of Sewage Sludge: A Review. *Waste and Biomass Valorization*, 11. 3677 – 3709 s.

RAJAPAKSHA, A. U., VITHANAGE, M., ZHANG, M., AHMAD, M., MOHAN, D., CHANG, S. X., OK, Y. S., 2014. Pyrolysis condition affected sulfamethazine sorption by tea waste biochars. *Bioresouce Technology*, 166. 303 – 308 s.

RATTAN, L., 2007. Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363 (1492). 1 – 9 s.

RIVKIN, R. B., LEGEDRE, L., 2001. Biogenic carbon cycling in the upper ocean: effects of microbial respiration. *Science*, 291. 2398 – 2400 s.

RONSSSE, F., HECKE, S., DICKINSON, D., PRINS, W., 2013. Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *GCB Bioenergy*, 5 (2). 104 – 115 s.

RYU, C., SHARIFI, V. N., SWITENBANK, J., 2007. Waste pyrolysis and generation of storable char. *International Journal of Energy Research*, 31 (2). 177 – 191 s.

SANTANA, G. P., 2012. TERRA PRETA DE INDIO NA REGIÃO AMAZÓNICA. *Scientia Amazonia*, 1 (1). 1 – 8 s.

SAQUING, J. M., YU, Y., CHIU, P. C., 2016. Wood-derived black carbon (biochar) as a microbial electron donor and acceptor. *Environmental Science & Technology Letters*, 3. 62 – 66 s.

SCHIMMELPFENNIG, S., GLASER, B., 2012. One step forward toward characterization: Some important properties to distinguish biochars. *Journal of Environmental Quality*, 41 (4). 1001 – 1011 s.

SHI, W., JU, Y., BIAN, R., LI, L., JOSEPH, S., MITCHELL, D. R., MUNROE, P., TAHERYMOOSAVI, S., PAN, G., 2020. Biochar bound urea boosts plant growth and reduces nitrogen leaching. *Science of the Total Environment*, 701 (134424). 1 – 8 s.

SILBER, A., LEVKOVITCH, I., GRABER, E., 2010. pH-dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar: Agronomic implications. *Environmental Science & Technology*, 44 (24). 9318 – 9323 s.

SINGH, B. P., COWIE, A. L., 2010. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*, 48 (7). 516 – 525 s.

SINGH B., CAMPS-ARBESTAIN M., LEHMANN J., 2017: Biochar: A Guide to Analytical Methods, Chapter 3: Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. CRC Press. Boca Raton. 27 – 31 s.

SOHI, S. P., KRULL, E., LOPEZ-CAPEL, E., BOL, R., 2010. Chapter 2 – A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. *Advances in Agronomy*, Academic Press, 105. 47 – 52 s.

STEWART, C. E., ZHENG, J., BOTTE, J., COTRUFO, M. F., 2012. Co-generated fast pyrolysis biochar mitigates green-house gas emissions and increases carbon sequestration in temperate soils. *GCB-Bioenergy*, 5 (2). 153 – 164 s.

TSANG, C. F., BENSON, S. M., KOGELSKI, B., SMITH, R. E., 2002. Scientific considerations related to regulation development for CO₂ sequestration in brine formations. *Environmental Geology*, 42. 275 – 281 s.

WANG, J., XIONG, Z., KUZYAKOV, Y., 2016. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects. *GCB Bioenergy*, 8 (3). 512 – 523 s.

WANG, L., O'CONNOR, D., RINKLEBE, J., OK, Y. S., TSANG, D. C. W., SHEN, Z., HOU, D., 2020. Biochar Aging: Mechanisms, physicochemical changes, assessment, and implications for field applications. *Environmental Science & Technology*, 54 (23). 14797 – 14814 s.

WIEDNERA K., GLASER B., 2013: Biochar and Soil Biota, Chapter: Biochar-Fungi interactions on soils. CRC Press. Boca Raton. 2 – 29 s.

WOFSY, S. C., 2001. Where has all the carbon gone? *Science*, 292 (5525). 2261 – 2263 s.

XIANG, W., ZHANG, X., CHEN, J., ZOU, W., HE, F., HU, X., TSANG, D. C. W. OK, Y. S., GAO, B., 2020. Biochar technology in wastewater treatment: A critical review. *Chemosphere*, 252 (126539). 2 - 12 s.

Internetové zdroje:

IEA BIOENERGY ANNUAL REPORT 2006, © 2023: International Energy Agency (citováno) [cit. 2023.02.09] <<https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/annual-report-2006/>>.

Ostatní zdroje:

COOLS, N., DE VOS, B., 2020. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests). Part X. 5 - 100 s.

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Fyzikálně-chemické vlastnosti biouhlů získaných z různých druhů biomasy (upraveno z různých zdrojů).....	7
Tabulka 2: Biouhel a další produkty tepelné přeměny biomasy vyrobené dle dostupných technologií a surovin (Sohi et al. 2010, přeloženo).....	12
Tabulka 3: Výtěžky výchozí hmoty jako produkty pyrolýzních procesů (www.ieabioenergy.com, přeloženo).....	14
Tabulka 4: Půdní oblasti (faktory) ovlivněné přítomností biouhlu v půdě písčitého a hlinitého/jílovitého typu (Atkinson 2018, přeloženo).	18
Tabulka 5: Přehled základních statistických údajů k měřenému aktivnímu pH ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) pro půdy vegetace dub a smrk.....	33
Tabulka 6: Přehled základních statistických údajů k měřenému výměnnému pH ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$) pro půdy s vegetací dub a smrk.	35
Tabulka 7: Přehled základních statistických údajů k měřeným hodnotám KVK kationtů pro půdy pod vegetací dub a smrk.	39

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Porovnání půdy Terra Preta s neobohacenou půdou v Amazonii (online) [citováno 2023.02.20], dostupné z < https://www.allotment-garden.org/composts-fertilisers/biochar-terra-preta/ >	4
Obrázek 2: Pohled na pozůstatky historického mlířiště (Hirsch et al. 2017).....	5
Obrázek 3: Technologie výroby biouhlu (Xiang et al. 2020, přeloženo).....	8
Obrázek 4: Fáze působení biouhlu (Josseph et al. 2021, přeloženo).....	9
Obrázek 5: Atmosférický CO ₂ . - vývoj od roku 1960 do roku 2021 (Global Carbon Budget 2021, Author(s) 2022., přeloženo, dostupné z < https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/archive/2021/GCP_CarbonBudget_2021.pdf >).	16
Obrázek 6: Přehled faktorů a procesů ovlivňujících rozklad biouhlu v půdě (Wang et al. 2016, přeloženo).....	19
Obrázek 7: Lokalita pokusu - Sruby (www.mapy.cz).....	24
Obrázek 8: Bližší pohled na lokalitu pokusu - Sruby (www.mapy.cz).	24
Obrázek 9: Lesní smrkový porost (lokalita pokusu) – Sruby (Tejnecký V. nepublikováno).	25
Obrázek 10: Schéma založení experimentu pro aplikaci biouhlu do půd v lesním prostředí (Tejnecký V. nepublikováno).....	26
Obrázek 11: Porovnání půdních sond na předmětné lokalitě – Sruby (Tejnecký V. nepublikováno).	27
Obrázek 12: Porovnání změn aktivního pH (pH _{H2O}) v půdách pod smrkovým porostem po aplikaci biouhlu (UHLÍ) a bez aplikace biouhlu (KONTROLA).	32
Obrázek 13: Porovnání změn aktivního pH (pH _{H2O}) v půdách pod dubovým porostem po aplikaci biouhlu (UHLÍ) a bez aplikace biouhlu (KONTROLA).	33
Obrázek 14: Porovnání změn výměnného pH (pH _{CaCl2}) v půdách pod smrkovým porostem po aplikaci biouhlu (UHLÍ) a bez aplikace biouhlu (KONTROLA).....	34
Obrázek 15: Porovnání změn výměnného pH (pH _{CaCl2}) v půdách pod dubovým porostem po aplikaci biouhlu (UHLÍ) a bez aplikace biouhlu (KONTROLA).....	35
Obrázek 16: Porovnání změn kationtové výměnné kapacity v půdách pod smrkovým porostem po aplikaci biouhlu (UHLÍ) a bez aplikace biouhlu (KONTROLA).....	36
Obrázek 17: Porovnání změn kationtové výměnné kapacity v půdách pod dubovým porostem po aplikaci biouhlu (UHLÍ) a bez aplikace biouhlu (KONTROLA).....	37
Obrázek 18: Snížení hodnot KVK (meq + kg ⁻¹) v půdě horizontu FH u dubové vegetace mezi stanovišti, kde byla provedena aplikace biouhlu a kde nikoliv.	38

Obrázek 19: Porovnání koncentrací jednotlivých výměnných kationtů pro všechny měřené horizonty (vrstvy) mezi stanovišti kontrol (KONTROLA) a aplikacemi biouhlu (UHLÍ) pro půdy smrkové vegetace.....	40
Obrázek 20: Porovnání koncentrací jednotlivých výměnných kationtů pro všechny měřené horizonty (vrstvy) mezi stanovišti kontrol (KONTROLA) a aplikacemi biouhlu (UHLÍ) pro půdy dubové vegetace	41
Obrázek 21: Mikroskopický snímek kousku smrkového biouhlu (75 μm) po dvou letech od aplikace biouhlu (Tejnecký V. nepublikováno).	44

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Data veškerých vzorků s uvedením jejich pracovních názvů, číselného označení, naměřenými pH hodnotami a dalšími údaji.....	57
Příloha 2: Koncentrace kationtů měřených prvků pro všechny měřené vzorky, nasycenost bází, KVK a další údaje.....	60

PŘÍLOHY:

Příloha 1: Tabulka všech vzorků s uvedením jejich pracovních názvů, číselného označení, naměřenými pH hodnotami a dalšími údaji.

Číslo vzorku	Název	Lokalita	Čas	Vegetace	Číslo	Typ	Vrstva	pH _{H2O}	pH _{CaCl2}	pH _{BaCl2}
S401	SS_24_1UFH	Sruby	24	smrk	1	U	FH	4,14	3,66	3,17
S402	SS_24_1U0-5 cm	Sruby	24	smrk	1	U	0-5 cm	3,92	3,2	3,17
S403	SS_24_1U5-20 cm	Sruby	24	smrk	1	U	5-20 cm	3,72	3,34	3,39
S404	SS_24_1KFH	Sruby	24	smrk	1	K	FH	3,94	3,2	2,8
S405	SS_24_1K0-5 cm	Sruby	24	smrk	1	K	0-5 cm	3,96	2,92	2,86
S406	SS_24_1K5-20 cm	Sruby	24	smrk	1	K	5-20 cm	3,75	3,13	3,24
S407	SS_24_2UFH	Sruby	24	smrk	2	U	FH	3,96	3,2	2,81
S408	SS_24_2U0-5 cm	Sruby	24	smrk	2	U	0-5 cm	3,65	3,12	3,15
S409	SS_24_2U5-20 cm	Sruby	24	smrk	2	U	5-20 cm	3,88	3,3	3,4
S410	SS_24_2KFH	Sruby	24	smrk	2	K	FH	4,03	3,24	2,88
S411	SS_24_2K0-5 cm	Sruby	24	smrk	2	K	0-5 cm	3,77	3,16	3,22
S412	SS_24_2K5-20 cm	Sruby	24	smrk	2	K	5-20 cm	3,97	3,31	3,35
S413	SS_24_3UFH	Sruby	24	smrk	3	U	FH	4,02	3,34	2,93
S414	SS_24_3U0-5 cm	Sruby	24	smrk	3	U	0-5 cm	3,84	3,29	3,22
S415	SS_24_3U5-20 cm	Sruby	24	smrk	3	U	5-20 cm	4,39	3,63	3,85

S416	SS_24_3KFH	Sruby	24	smrk	3	K	FH	3,98	3,28	4,31
S417	SS_24_3K0-5 cm	Sruby	24	smrk	3	K	0-5 cm	3,65	3,11	3,2
S418	SS_24_3K5-20 cm	Sruby	24	smrk	3	K	5-20 cm	3,91	3,24	3,38
S419	SS_24_4UFH	Sruby	24	smrk	4	U	FH	4,29	3,44	3,08
S420	SS_24_4U0-5 cm	Sruby	24	smrk	4	U	0-5 cm	3,78	3,17	3,24
S421	SS_24_4U5-20 cm	Sruby	24	smrk	4	U	5-20 cm	4	3,34	3,41
S422	SS_24_4KFH	Sruby	24	smrk	4	K	FH	3,87	3,14	2,85
S423	SS_24_4K0-5 cm	Sruby	24	smrk	4	K	0-5 cm	3,9	3,33	3,41
S424	SS_24_4K5-20 cm	Sruby	24	smrk	4	K	5-20 cm	4,35	3,61	3,71
S425	SS_24_5UFH	Sruby	24	smrk	5	U	FH	4,12	3,45	3,27
S426	SS_24_5U0-5 cm	Sruby	24	smrk	5	U	0-5 cm	3,57	3,42	3,16
S427	SS_24_5U5-20 cm	Sruby	24	smrk	5	U	5-20 cm	3,77	3,17	3,43
S428	SS_24_5KFH	Sruby	24	smrk	5	K	FH	3,89	3,14	2,83
S429	SS_24_5K0-5 cm	Sruby	24	smrk	5	K	0-5 cm	3,55	3,08	3,26
S430	SS_24_5K5-20 cm	Sruby	24	smrk	5	K	5-20 cm	4,03	3,33	3,49
S431	SS_24_6UFH	Sruby	24	smrk	6	U	FH	4,03	3,17	2,75
S432	SS_24_6U0-5 cm	Sruby	24	smrk	6	U	0-5 cm	3,53	2,98	3
S433	SS_24_6U5-20 cm	Sruby	24	smrk	6	U	5-20 cm	3,76	3,17	3,45
S434	SS_24_6KFH	Sruby	24	smrk	6	K	FH	3,94	3,15	2,98
S435	SS_24_6K0-5 cm	Sruby	24	smrk	6	K	0-5 cm	3,62	3,05	3,11
S436	SS_24_6K5-20 cm	Sruby	24	smrk	6	K	5-20 cm	3,95	3,26	3,43
S437	SS_24_1UFH	Sruby	24	dub	1	U	FH	5,92	5,18	4,89
S438	SS_24_1U0-5 cm	Sruby	24	dub	1	U	0-5 cm	4,17	3,57	3,52
S439	SS_24_1U5-20 cm	Sruby	24	dub	1	U	5-20 cm	4,02	3,39	3,53
S440	SS_24_1KFH	Sruby	24	dub	1	K	FH	5,63	4,99	4,69
S441	SS_24_1K0-5 cm	Sruby	24	dub	1	K	0-5 cm	4,28	3,67	3,65
S442	SS_24_1K5-20 cm	Sruby	24	dub	1	K	5-20 cm	4,19	3,47	3,6

S443	SS_24_2UFH	Sruby	24	dub	2	U	FH	4,72	4,26	3,98
S444	SS_24_2U0-5 cm	Sruby	24	dub	2	U	0-5 cm	4,8	3,52	3,5
S445	SS_24_2U5-20 cm	Sruby	24	dub	2	U	5-20 cm	3,96	3,43	3,78
S446	SS_24_2KFH	Sruby	24	dub	2	K	FH	4,15	3,54	3,21
S447	SS_24_2K0-5 cm	Sruby	24	dub	2	K	0-5 cm	3,82	3,23	3,29
S448	SS_24_2K5-20 cm	Sruby	24	dub	2	K	5-20 cm	3,96	3,37	3,55
S449	SS_24_3UFH	Sruby	24	dub	3	U	FH	5,63	5,01	2,98
S450	SS_24_3U0-5 cm	Sruby	24	dub	3	U	0-5 cm	4,05	3,49	3,39
S451	SS_24_3U5-20 cm	Sruby	24	dub	3	U	5-20 cm	3,88	3,36	3,54
S452	SS_24_3KFH	Sruby	24	dub	3	K	FH	4,49	3,81	3,42
S453	SS_24_3K0-5 cm	Sruby	24	dub	3	K	0-5 cm	3,75	3,23	3,46
S454	SS_24_3K5-20 cm	Sruby	24	dub	3	K	5-20 cm	3,89	3,31	3,45
S455	SS_24_4UFH	Sruby	24	dub	4	U	FH	4,44	4,02	3,68
S456	SS_24_4U0-5 cm	Sruby	24	dub	4	U	0-5 cm	3,97	3,51	3,7
S457	SS_24_4U5-20 cm	Sruby	24	dub	4	U	5-20 cm	4,08	3,5	3,65
S458	SS_24_4KFH	Sruby	24	dub	4	K	FH	5,76	5,2	4,83
S459	SS_24_4K0-5 cm	Sruby	24	dub	4	K	0-5 cm	4,23	3,63	3,64
S460	SS_24_4K5-20 cm	Sruby	24	dub	4	K	5-20 cm	4	3,45	3,62
S461	SS_24_5UFH	Sruby	24	dub	5	U	FH	5,23	4,44	4,15
S462	SS_24_5U0-5 cm	Sruby	24	dub	5	U	0-5 cm	3,79	3,35	3,32
S463	SS_24_5U5-20 cm	Sruby	24	dub	5	U	5-20 cm	3,78	3,29	3,48
S464	SS_24_5KFH	Sruby	24	dub	5	K	FH	5,25	4,75	4,38
S465	SS_24_5K0-5 cm	Sruby	24	dub	5	K	0-5 cm	4,13	3,58	3,49
S466	SS_24_5K5-20 cm	Sruby	24	dub	5	K	5-20 cm	3,94	3,33	3,68
S467	SS_24_6UFH	Sruby	24	dub	6	U	FH	5,45	4,83	4,58
S468	SS_24_6U0-5 cm	Sruby	24	dub	6	U	0-5 cm	4,14	3,55	3,54
S469	SS_24_6U5-20 cm	Sruby	24	dub	6	U	5-20 cm	3,79	3,25	3,42

S470	SS_24_6KFH	Sruby	24	dub	6	K	FH	4,58	3,99	3,67
S471	SS_24_6K0-5 cm	Sruby	24	dub	6	K	0-5 cm	3,81	3,26	3,27
S472	SS_24_6K5-20 cm	Sruby	24	dub	6	K	5-20 cm	3,86	3,3	3,5

Příloha 2: Koncentrace kationtů měřených prvků (všechny jsou uvedeny v tabulce) pro všechny měřené vzorky, nasycenost bází, KVK a další údaje. Nasycenost bází je uvedena v procentech a hodnoty jednotlivých kationtů v jednotkách meq + kg⁻¹.

Číslo vzorku	Al ³⁺	Ca ²⁺	Fe ³⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Mn ²⁺	Na ⁺	H ⁺	BC	EA	KVK	BS
S401	3,95	147,61	0,72	9,91	19,49	5,35	2,30	9,17	179,31	19,19	198,50	90,33
S402	54,53	12,02	7,78	1,93	2,76	0,17	0,39	9,14	17,11	71,62	88,73	19,28
S403	38,74	8,22	1,70	1,30	1,97	0,34	0,62	5,46	12,11	46,24	58,35	20,75
S404	6,80	105,00	1,50	21,23	16,43	2,69	2,22	21,56	144,88	32,56	177,44	81,65
S405	30,12	6,04	4,56	1,14	1,61	0,05	0,76	18,77	9,55	53,49	63,04	15,15
S406	30,58	6,95	2,00	1,06	1,66	0,12	0,16	7,78	9,83	40,48	50,30	19,53
S407	10,48	123,57	3,24	6,81	15,79	3,36	1,27	21,07	147,44	38,16	185,59	79,44
S408	46,82	11,40	6,14	1,61	2,30	0,40	0,42	9,58	15,73	62,93	78,66	19,99
S409	35,13	11,72	0,07	1,41	1,72	1,66	0,30	5,34	15,15	42,20	57,35	26,42
S410	2,53	201,96	0,85	11,66	24,82	5,01	1,10	17,93	239,54	26,33	265,87	90,10
S411	39,18	27,37	2,82	2,96	5,12	0,83	0,23	8,14	35,68	50,97	86,64	41,18
S412	30,36	41,99	0,19	2,37	5,72	0,68	0,51	6,01	50,59	37,24	87,84	57,60
S413	0,53	267,17	0,07	15,29	58,98	10,02	0,93	15,97	342,38	26,59	368,97	92,79
S414	40,54	8,47	3,88	1,74	2,85	0,10	0,56	8,14	13,61	52,65	66,27	20,54
S415	30,65	9,93	3,17	1,35	2,73	0,12	0,50	1,78	14,51	35,72	50,23	28,89
S416	9,56	109,17	2,09	6,75	12,91	1,77	1,60	0,53	130,43	13,94	144,37	90,34
S417	30,48	11,82	5,08	1,60	2,08	0,07	1,21	8,54	16,71	44,17	60,88	27,45
S418	29,64	17,58	3,10	1,31	3,02	0,09	0,48	5,61	22,40	38,43	60,83	36,82
S419	8,01	153,11	1,79	6,89	15,29	3,34	1,47	11,29	176,76	24,43	201,19	87,86

S420	43,70	21,41	3,99	1,85	4,09	0,44	1,12	7,77	28,47	55,90	84,37	33,74
S421	40,31	26,59	0,61	1,53	4,27	0,40	0,64	5,21	33,04	46,53	79,57	41,52
S422	8,26	138,78	1,92	8,73	15,20	2,65	1,66	19,21	164,38	32,04	196,42	83,69
S423	42,23	10,02	5,94	1,33	2,18	0,14	0,56	5,21	14,09	53,51	67,60	20,85
S424	39,97	17,73	1,76	1,53	2,66	0,28	0,66	2,52	22,58	44,52	67,10	33,66
S425	2,52	167,47	0,71	8,92	17,29	5,20	1,28	7,27	194,95	15,70	210,66	92,55
S426	31,87	14,40	6,63	1,60	3,00	0,08	0,84	9,37	19,84	47,94	67,78	29,28
S427	37,21	14,12	4,06	1,86	3,10	0,12	0,83	4,97	19,91	46,37	66,28	30,04
S428	7,63	131,05	1,87	8,75	16,81	4,73	2,02	20,12	158,62	34,35	192,97	82,20
S429	40,84	8,91	7,25	1,69	2,61	0,17	0,59	7,41	13,81	55,67	69,48	19,88
S430	38,20	8,85	1,90	1,36	1,80	0,23	0,34	4,31	12,36	44,65	57,01	21,68
S431	5,38	182,77	1,23	7,38	16,71	4,59	1,07	24,20	207,93	35,40	243,33	85,45
S432	49,74	16,00	7,56	2,40	3,76	0,27	0,82	13,57	22,98	71,13	94,11	24,42
S433	86,98	20,45	3,42	3,90	4,58	0,33	0,64	4,68	29,56	95,41	124,97	23,66
S434	1,36	237,21	0,31	8,94	17,80	7,91	1,07	14,23	265,02	23,81	288,83	91,76
S435	56,68	12,31	3,62	1,77	3,42	0,12	0,31	10,50	17,80	70,92	88,71	20,06
S436	62,93	18,91	2,57	2,32	4,38	0,11	0,67	4,94	26,27	70,56	96,83	27,13
S437	0,23	371,23	0,07	10,07	35,20	6,52	1,01	0,12	417,50	6,95	424,45	98,36
S438	41,49	36,22	1,37	4,05	7,90	1,69	0,42	4,01	48,59	48,56	97,15	50,02
S439	63,39	9,21	0,72	1,82	3,30	0,28	0,38	3,88	14,71	68,27	82,98	17,72
S440	0,24	296,86	0,07	12,76	34,95	16,24	0,89	0,23	345,46	16,78	362,24	95,37
S441	42,40	37,22	4,31	3,75	7,58	1,59	0,38	2,92	48,92	51,22	100,14	48,85
S442	56,57	9,26	1,88	2,32	2,99	0,25	0,07	3,27	14,64	61,98	76,62	19,11
S443	0,18	323,84	0,07	10,35	36,09	8,92	0,70	1,38	370,98	10,54	381,52	97,24
S444	44,29	26,51	3,14	3,29	7,28	0,59	0,20	4,20	37,28	52,22	89,50	41,65
S445	59,62	4,45	1,86	2,01	2,27	0,07	0,38	2,05	9,12	63,60	72,73	12,54
S446	0,63	213,61	0,07	8,16	20,44	24,98	0,51	8,36	242,71	34,04	276,75	87,70

S447	51,10	21,48	2,09	3,61	4,56	1,69	0,47	6,90	30,12	61,78	91,90	32,78
S448	59,54	15,94	0,67	2,25	3,28	0,31	0,61	3,70	22,07	64,22	86,29	25,58
S449	10,14	163,25	0,83	8,37	18,46	12,57	0,62	14,23	190,71	37,77	228,48	83,47
S450	42,46	33,85	3,46	3,88	6,56	1,31	0,38	5,46	44,67	52,69	97,36	45,88
S451	75,24	8,77	2,28	2,56	3,44	0,13	0,43	3,76	15,20	81,41	96,61	15,73
S452	0,28	290,58	0,07	10,43	32,98	9,77	0,76	5,14	334,75	15,25	350,01	95,64
S453	48,34	17,51	2,84	2,58	4,12	1,00	0,35	4,62	24,57	56,81	81,38	30,19
S454	52,91	4,62	0,50	1,44	1,71	0,32	0,32	4,72	8,09	58,45	66,55	12,16
S455	25,21	184,28	8,40	10,53	23,75	16,69	0,49	2,75	219,05	53,04	272,10	80,51
S456	26,04	30,19	0,07	4,01	8,19	9,18	0,31	2,61	42,70	37,90	80,59	52,98
S457	52,16	28,32	0,26	2,36	5,36	0,52	1,15	2,90	37,19	55,83	93,02	39,98
S458	0,84	276,33	0,07	13,02	29,49	27,03	2,36	0,13	321,20	28,07	349,27	91,96
S459	58,26	7,54	4,31	2,27	2,37	0,33	0,69	2,96	12,87	65,86	78,73	16,35
S460	57,19	4,68	1,55	1,72	1,92	0,21	0,45	3,11	8,78	62,07	70,85	12,39
S461	5,42	183,62	0,64	8,91	25,51	15,47	0,73	0,88	218,77	22,41	241,19	90,71
S462	62,83	9,10	6,79	2,34	2,88	0,13	0,92	6,42	15,24	76,16	91,41	16,67
S463	59,55	4,73	0,37	1,54	1,62	0,04	0,49	4,38	8,39	64,35	72,74	11,54
S464	0,28	411,33	0,07	14,61	50,70	10,04	1,06	0,52	477,70	10,91	488,61	97,77
S465	29,52	47,13	0,07	5,57	11,10	4,39	0,73	4,32	64,53	38,30	102,83	62,75
S466	50,96	17,73	0,23	1,94	3,33	0,62	0,43	2,69	23,43	54,51	77,93	30,06
S467	0,95	243,83	0,07	10,31	31,06	18,27	0,89	0,30	286,08	19,58	305,66	93,59
S468	50,57	22,60	0,39	3,43	6,86	2,37	0,53	3,80	33,42	57,14	90,56	36,90
S469	54,69	17,22	0,30	2,53	4,41	1,34	0,52	5,07	24,68	61,40	86,08	28,67
S470	0,28	420,89	0,07	14,25	48,01	10,61	1,40	2,87	484,56	13,83	498,39	97,23
S471	46,28	21,28	2,62	2,53	4,86	1,18	0,38	7,24	29,05	57,32	86,37	33,64
S472	60,87	8,05	0,78	1,97	3,02	0,17	0,30	4,18	13,34	65,99	79,33	16,82

