

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra pedologie a ochrany půd



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Půdy historických milířišť jako model pro současné
biocharové aplikace**

Bakalářská práce

Autor práce: Rostislav Čermák

Obor studia: Ekologické zemědělství

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

© 2021 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Půdy historických milířišť jako prostředek pro současné biocharové aplikace" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne datum odevzdání _____

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval RNDr. Václavovi Tejneckému za vedení mé bakalářské práce, cenné rady a především trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Haně Johanis za konstruktivní rady a připomínky. Také děkuji všem, kteří mi pomáhali v laboratořích a odebírali vzorky v terénu.

Výzkum byl podpořen projektem TAČR TL02000160: Úloha milířišť z hlediska kulturního dědictví a ochrany krajiny.

Půdy historických milíříšť jako model pro současné biocharové aplikace

Souhrn

První část literárního přehledu se zaměřuje na biouhel (biochar) obecně. Druhá část popisuje půdy ovlivněné člověkem (antropické půdy), na které byl po staletí až tisíciletí ukládán biouhel a organická hmota.

Cílem této bakalářské práce bylo stanovit základní chemické vlastnosti milíříšť Brd. Posoudit vliv historického biocharu na půdní prostředí a porovnat s půdami bez vlivu biocharu.

Celkem bylo odebráno 76 půdních vzorků z 11 milíříšť a 11 kontrol na území CHKO Brdy. V laboratořích byly vzorky podrobeny analýze pH, kationtové výměnné kapacity a koncentraci jednotlivých kationtů.

Hodnoty pH půdy milíříšť byly oproti kontrolním půdám mírně zvýšeny ve všech sledovaných horizontech.

Kationtová výměnná kapacita milíříšť byla u horizontu FH (fermentační s humifikačním) zvýšena. U horizontu M (minerální) byla naopak KVK nižší než u kontrolních půd.

Nasycení sorpčního komplexu bázemi bylo u všech jednotlivě sledovaných horizontů vyšší u milíříšť než u kontrolních půd, avšak statisticky významné zvýšení bylo pouze u horizontu FH a M.

Biouhel má stále po více jak po 150 letech vliv na půdní prostředí milíříšť.

Klíčová slova: *terra preta*, organická hmota, biochar (biouhel), pyrolýza, acidita

Soils on historical charcoal hearts as a model for recent biochar experiments

Summary

The first part of the literary overview is focused on the biochar in general. The second part describes soils affected by humans (anthropic soils), on which there were biochar and organic matter laid for centuries to thousands of years.

The objective of this bachelor's thesis was to define basic chemical characteristics of the charcoal kiln in Brdy. In addition, to assess the influence of historical biochar on soil environment and to compare it with soils, which are not influenced by biochar.

In total, 76 of soil samples were collected from 11 charcoal kilns and 11 control stations on the premisses of CHKO Brdy. These samples were submitted to an analysis of pH, cation exchange capacity and concentration of individual cations.

The pH values of charcoal kiln soil, in every monitored horizon, were slightly elevated in contrast to the control soils.

Cation exchange capacity of charcoal kiln was elevated in the FH horizon (fermentation with humification). On the contrary, the cation exchange capacity was lower in the M (mineral) horizon than in the control soils.

The saturation of sorption complex by alkalies was higher in each of the monitored charcoal kiln horizon than in the control soil, however it was statistically important just in the horizons FH and M.

After more than 150 years, biochar still affects the charcoal kiln environment.

Keywords: *terra preta*, organic matter, biochar, pyrolysis, acidity

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce	2
2.1	Hypotéza práce	2
2.2	Cíl práce	2
3	Literární přehled	3
3.1	Biouhel	3
3.1.1	Pyrolýza.....	3
3.1.1.1	Pomalá pyrolýza.....	4
3.1.2	Vlastnosti biouhlu ke zlepšení půdy.....	5
3.1.3	Vliv biouhlu na kvalitu půdy.....	6
3.1.3.1	Vliv na fyzikální vlastnosti půdy.....	6
3.1.3.2	Vliv na chemické vlastnosti půdy.....	7
3.1.3.3	Vliv na půdní organismy.....	7
3.1.3.4	Vliv na absorpci rizikových látek.....	8
3.2	Půdy ovlivněné člověkem	8
3.2.1	Terra preta.....	8
3.2.1.1	Výskyt.....	9
3.2.1.2	Vznik.....	11
3.2.1.3	Klasifikace.....	11
3.2.1.4	Půdní vlastnosti.....	11
3.2.2	Nordic Dark Earth.....	13
3.2.2.1	Naleziště.....	13
3.2.2.2	Klasifikace.....	13
3.2.2.3	Půdní vlastnosti.....	14
3.2.3	Terra Preta Australis.....	15
3.2.3.1	Naleziště.....	15
3.2.3.2	Klasifikace.....	15
3.2.3.3	Půdní vlastnosti.....	16
3.2.4	African Dark Earths.....	17
3.2.5	Sambaquis (shell mounds).....	18
3.2.6	Plaggické Anthrosoly.....	19
3.2.7	Půdy historických milíříšť.....	20

3.2.7.1	Historie	20
3.2.7.2	Milíře	22
4	Metodika	24
4.1	Výběr lokality	24
4.2	Popis lokality	24
4.3	Vzorkování půd a milíříšť	26
4.4	Příprava vzorků	27
4.5	Stanovení pH	27
4.6	Stanovení kationtové výměnné kapacity (KVK) a výměnných prvků	28
4.7	Zpracování dat, statistika	29
5	Výsledky	30
5.1	pH	30
5.1.1	pH _{H₂O}	30
5.1.2	pH _{CaCl₂}	30
5.2	Kationtová výměnná kapacita a výměnné kationty	31
6	Diskuze	36
6.1	Klasifikace	36
6.2	Acidita	36
6.3	Kationtová výměnná kapacita	38
6.4	Potenciál milíříšť	38
7	Závěr	39
8	Literatura	40
9	Seznam použitých zkratk a symbolů	46
10	Samostatné přílohy	I

1 Úvod

Biouhel (biochar) v poslední době přitahuje mnoho pozornosti díky své slibné roli v ochraně životního prostředí. Biouhel vzniká zahříváním biomasy za omezeného nebo žádného přístupu vzduchu. Za těchto podmínek vznikne tmavý až černý, porézní materiál podobný dřevěnému uhlí. Biouhel lze využít pro různé účely, například zlepšení kvality půdy, omezení nebo zamezení kontaminace rizikovými prvky, čištění odpadních vod, ale také pro energetické účely. Podle toho, kde bude biouhel využit, volíme technologii zpracování biomasy, druh biomasy, teplotu a dobu pobytu biomasy při této teplotě. Vlastnosti biouhlu poté úzce souvisí právě s touto použitou technologií.

Půdy ovlivněné člověkem (antropické půdy) byly v minulosti využívány různým způsobem. Některé byly ovlivněny se záměrem zlepšit kvalitu půdy, u jiných není zcela jasné, zda byly ovlivněny záměrně, či neúmyslně, a u některých je zcela zřejmé, že nebylo v úmyslu tyto půdy jakoliv ovlivnit. Některé antropické půdy poskytují příležitost zkoumat dlouhodobé důsledky přidávání biouhlu, většinou i s organickou hmotou, především z hlediska zlepšení a udržení úrodnosti půdy. Například půdy *terra preta* a jí podobné půdy. Vlastnosti těchto antropických půd budou ale jistě ovlivněny klimatickými podmínkami a antropologickým procesem jejich tvorby. Proto je důležité nacházet příklady antropických půd, do kterých je přidáván biouhel a organická hmota v různých půdách a klimatických podmínkách. Jedním z typů antropických půd, kde byl ponechán pouze biouhel mohou být stará milířiště.

Půdy historických milířišť poskytují možnost sledovat změny půdních vlastností a okolního prostředí. Na těchto místech byl před více než 170 lety ponechán biouhel, respektive dřevěné uhlí po pálení milířů. Cílem této práce bylo stanovit půdní chemické vlastnosti (pH a kationtová výměnná kapacita) milířišť v oblasti Brd a pálením uhlí neovlivněných okolních půd.

2 Cíl práce

2.1 Hypotéza práce

Místa po pálení uhlí – milířiště – představují dlouhodobý pokus s biocharem (biouhlem) a biochar je zde uložen až stovky let. Na takto uloženém biocharu lze sledovat změnu chemických vlastností a ovlivnění půdního prostředí.

2.2 Cíl práce

Stanovit základní chemické vlastnosti vybraných půd milířišť Brd. Posoudit vliv historického biocharu na půdní prostředí a porovnat s půdami bez vlivu biocharu.

3 Literární přehled

3.1 Biouhel

Biouhel vzniká zahříváním biomasy s malým nebo žádným obsahem kyslíku. Tímto procesem nazývaným pyrolýza, znikne pevný materiál bohatý na uhlík (Weber & Quicker 2018; Kumar et al. 2020).

Jako biomasa mohou být použity například organické materiály pocházející ze zemědělství (rostlinný odpad, hnůj), z lesnictví (zbytky po těžbě, štěpka, větve, piliny, hobliny), dále z čistíren odpadních vod (kaly), z papírenského průmyslu a další průmyslové výroby (Barrow 2012; Quambrani et al. 2017; Weber & Quicker 2018; Kumar et al. 2020).

Podle toho, jaký typ biomasy použijeme, můžeme rozlišit mezi biouhlem a hydrocharem (Weber & Quicker 2018; Kumar et al. 2020). Konvenční biochar se vyrábí ze suché suroviny obsahující až 10 % vlhkosti, oproti tomu při výrobě hydrocharu se používají suroviny, které obsahují více vlhkosti, například lidský a komunální odpad a čistírenské kaly (Wang et al. 2018; Kumar et al. 2020).

Je nesmírně důležité rozlišovat biouhel od hydrocharu, protože jejich fyzikální a chemické vlastnosti hrají zásadní roli při jejich použití v průmyslu a životním prostředí. Například biouhel s nízkým obsahem uhlíku a vysokým obsahem popela není vhodný pro energetické účely a stejně tak není biouhel s nízkou povrchovou plochou a nízkou adsorpční kapacitou určen pro zemědělství a čistírenský průmysl (Kambo & Dutta 2015).

Dále můžeme rozlišit biouhel od dřevěného uhlí, a to pomocí jejich vstupní suroviny a využití. Při výrobě dřevěného uhlí probíhá pyrolýza dřeva s následným využitím především jako palivo pro výrobu tepla. Oproti tomu biouhel (i hydrochar) vzniká pyrolýzou nejen dřeva, ale jakékoliv biomasy, která může být využita pro různé účely, například ke zlepšení vlastností půdy, filtraci vody, sanaci půdy od těžkých kovů, čištění spalin, jako stavební materiál, pro lékařské využití aj., Nicméně biouhle může sloužit i pro výrobu tepla podobně jako dřevěné uhlí (Barrow 2012; Quambrani et al. 2017; Weber & Quicker, 2018; Kumar et al. 2020).

3.1.1 Pyrolýza

Proces pyrolýzy začíná sušením biomasy, která se dále zahřívá a uvolňují se těkavé látky. Těmi mohou být permanentní (nezkapalnitelné) plyny (například CO_2 , CO , CH_4 a H_2) nebo kondenzované organické sloučeniny (například metanol, kyselina octová). Výsledkem pyrolýzy můžeme rozlišit tři produkty: permanentní plyny, jednu nebo více kapalných fází (voda, dehet) a pevný zbytek (char). Procentuální rozložení výsledných produktů a jejich vlastnosti lze podmínkami procesu ovlivnit, zejména teplotou a dobou zdržení (Weber & Quicker 2018). Podle těchto podmínek se rozlišují různé procesy výroby, pro představu uvedené v tabulce 1, ze které lze vidět významný procentuální rozdíl výnosu jednotlivých produktů s použitím různé teploty a doby zdržení. Produkty z jednotlivých procesů se většinou využívají na odlišné účely a vyrábí se v různých zařízeních. Například bio-olej z rychlé pyrolýzy, kterého může být 75 % z původní hmotnosti suché suroviny, je zdrojem energie a lze jej také použít pro výrobu chemikálií. Při zplyňování dochází k výrobě velkého množství plynu

Syngas, který se používá jako palivo v plynových motorech a plynových turbínách (Quambrani et al. 2017).

Jelikož je sušení vlhkých surovin energeticky náročné a ekonomicky neudržitelné (Sharma et al. 2019), byla vymyšlena metoda hydrotermální karbonizace (HTC), při níž je vyráběn hydrochar. Hydrotermální karbonizace probíhá se surovinami obsahující vyšší vlhkost při teplotě 180–250 °C a tlaku 2–6 MPa (Mumme et al. 2011; Kumar et al. 2020).

Pyrolýza v teplotním rozsahu mezi 200 až 300 °C se označuje jako torefikace. Hlavním cílem je udržet a soustředit většinu energetického obsahu v pevné látce a výrazně zlepšit mechanické vlastnosti biomasy, například rozměňování, což může být pro některé aplikace jinak omezující (Weber & Quicker 2018).

V tomto textu se dále zaměříme pouze na pomalou pyrolýzu, která byla v minulosti využívána při výrobě dřevěného uhlí při pálení mílířů a také lze tuto jednoduchou a levnou metodu používat v malém měřítku a přímo na farmě.

Tabulka 1: Reakční podmínky a distribuce různých prvků pyrolýzy (Quambrani et al. 2017).

Proces	Teplota (°C)	Doba pobytu	Výnos %		
			Biouhel	Bio-olej	Syngas
Pomalá pyrolýza	300–700	minuty až dny	35	30	35
Meziproduktová pyrolýza	~ 500	10–20 s	20	50	30
Rychlá pyrolýza	500–1000	< 2 s	12	75	13
Zplyňování	~ 750–900	10–20 s	10	5	85
Hydrotermální karbonizace (HTC)	180–300	1–16 h	50–80	5–20	2–5
Torefikace	~ 290	~ 10–60 min	80	0	20

3.1.1.1 Pomalá pyrolýza

Při výrobě biouhlu pomalou pyrolýzou je hlavním zájmem uhlíkatý pevný produkt. Rychlost ohřevu je nízká a doba pobytu dlouhá. V tradičním procesu při výrobě dřevěného uhlí může trvat několik týdnů, než dojde ke karbonizaci (zuhelnatění). Typické teploty pro pomalou pyrolýzu jsou kolem 500 °C, ale záleží na požadovaných vlastnostech produktu. Velmi vysoký obsah uhlíku, vyšší než 95 % může vyžadovat teploty blízké 1000 °C, čehož lze dosáhnout u dřevěných surovin, ale problémy představují zemědělské odpady a jiné materiály s nižší teplotou tání popela (Weber & Quicker 2018). U většiny druhů dřevin bývá teplota tání popela větší než 1100–1200 °C a například u slámy a vojtěšky se pohybuje mezi 800–900 °C (Kočica a spol. 2004).

Kromě podmínek procesu mají vlastnosti suroviny vliv na proces přeměny a vlastnosti biouhlu. Biomasa se skládá ze tří organických sloučenin: celulózy, hemicelulózy a ligninu. Během tepelného zpracování se chovají odlišně, a proto složení biomasy přímo ovlivňuje výtěžek a vlastnosti produktu (Weber & Quicker 2018). Hemicelulóza je nejreaktivnější ze tří

hlavních složek a rozkládá se při teplotách přibližně 220–315 °C (Yang et al. 2007). Rozklad hemicelulózy v biomase je hlavním procesem torefikace. K nejvýznamnějším změnám téměř všech vlastností dochází v malém teplotním rozsahu hemicelulózy, což činí torefikaci velmi citlivým procesem, který lze obtížně kontrolovat (Weber & Quicker 2018). Celulóza je tepelně stabilnější a rozkládá se při teplotách mezi 280 až 400 °C. Tepelná degradace ligninu není v omezeném teplotním rozmezí, ale začíná na 200 °C a může vyžadovat dokončení až na 900 °C (v závislosti na době zdržení) (Yang et al. 2007).

3.1.2 Vlastnosti biouhlu ke zlepšení půdy

Všechny vlastnosti biouhlu jsou výsledkem charakteristik suroviny a podmínek procesu karbonizace. Mohou být záměrně vybrány a upraveny, aby se dosáhlo určitých vlastností produktu (Weber & Quicker 2018).

Zvýšený stupeň karbonizace realizovaný zvýšením teploty a/nebo dobou zdržení vede ke snížení výtěžku hmoty a energie (Weber & Quicker 2018). Výtěžek biouhlu také závisí na použité surovině. Břendová a spol. (2015) zjišťovali vlastnosti biouhlu v závislosti na finální teplotě a původu suroviny, kdy doba zdržení byla 30 minut. Výtěžek biouhlu z pšeničné slámy při 400 °C byl 30 % hmotnosti a na 600 °C lineárně klesal na 25 % hmotnosti. U biouhlu z topolu byl výtěžek při 400 °C 23 % hmotnosti a klesal na 600 °C na 10 % hmotnosti.

Opačně je tomu u specifického povrchu biouhlu, ten se zvyšuje se zvyšující se teplotou. (Břendová a spol. 2015; Tan et al. 2017) Přibližně od 300–500 °C dochází k rychlému nárůstu a od 500 °C se zvyšuje relativně pomalu. Specifický povrch a objem mikropórů byl u dubového dřeva a modřínu oproti biouhlu z trávy výrazně vyšší. Specifické povrchy biouhlu ze dřeva byly v tomto případě o 145,5 % vyšší než u biouhlu z trávy a objemy mikropórů byly vyšší o 762,5 % (Tan et al. 2017). Podobně Břendová a spol. (2015) zjistili rozdíl ve specifickém povrchu u biouhlu z topolu, který byl výrazně vyšší než u biouhlu z pšeničné slámy.

Hodnota pH biouhlu je důležitou vlastností pro zemědělské aplikace, jako je úprava půdy. Je to také jedna z vlastností, ve které se biochar z pyrolýzy významně liší od hydrocharů vyrobených hydrotermální karbonizací (HTC). Ta zahrnuje tvorbu organických kyselin, čímž se hydrochary stávají kyselejšími (Weber & Quicker 2018). Hodnota pH biouhlu závisí na druhu biomasy, reakční teplotě, ale také na obsahu popela v biouhlu. Například Lehmann & Joseph (2015) uvádějí, že průměrné hodnoty pH biouhlu pyrolizovaného při teplotě 300–399 °C bylo 5,01, zatímco pH biouhlu pyrolizovaného při teplotě 600–690 °C bylo 9,00. Mukherjee et al. (2011) zjistili u biouhlu z dubu, borovice a trávy, pyrolizovaného při teplotě 250–650 °C výrazné rozdíly. Borovice měla pH 3 na 250 °C a zvyšovalo se na 6,5 při 650 °C. U dubu bylo rozmezí pH od 3,5 do 8,5 a tráva měla pH 4,5 až 10.

Kationtová výměnná kapacita biouhlu souvisí s jeho plochou povrchu, přítomností karboxylové funkční skupiny, použitím materiálu (biomasy) a teplotou přípravy. Nejvyšší KVK byla zjištěna u biocharů vyrobených při nižších teplotách, při kterých se povrchová plocha významně zvýšila, ale ve struktuře zůstává dostatek funkčních skupin, aby poskytovaly záporný povrchový náboj, který přitahuje kationty. Kationtová výměnná kapacita u biouhlu připraveného ze dřeva byla velmi vysoká, 77,5 cmol + kg⁻¹, zatímco u kukuřičné slámy byla o dost nižší, kolem 10 cmol + kg⁻¹ a u pšeničné slámy přibližně 6 cmol + kg⁻¹ (Tan et al. 2017).

Je důležité znát obsah popela v biouhlu, protože množství a druh anorganických látek může určit možné aplikace. Vysoký obsah popela může bránit použití v náročnějších průmyslových aplikacích (například metalurgie a výroba tepla) (Weber & Quicker 2018). Obsah popela v biouhlu obecně souvisí s obsahem popela v surovině. Například u slámy se zvyšuje z původního obsahu 10,4 % na 34,2 % v biouhlu. V popelu je mnoho alkalických iontů a jejich přítomnost může zvyšovat pH půdy. Obsah popela se zvyšuje s prodlužující se dobou zdržení při výrobě (Tan et al. 2017).

Lze očekávat, že biouhly produkované při vysoké teplotě zadržují více vody ve své porézní struktuře. I když se pórovitost během karbonizace obecně zvyšuje, zpracování při velmi vysokých teplotách vede ke smrštění pevné struktury, což má za následek konečné snížení pórovitosti a zvýšení hustoty (Weber & Quicker 2018).

3.1.3 Vliv biouhlu na kvalitu půdy

Ukazuje se, že biouhel zlepšuje fyzikální i chemické vlastnosti půdy. Záleží však například na tom, z jakého materiálu a jakým způsobem byl biouhel vyroben. To znamená, jaké jsou jeho vlastnosti, v jakých množstvích se do půdy přidává, kdy, jak často, do jaké hloubky, za jakým účelem (sanace, zlepšení vlastností pro pěstování ...), na jaký typ půdy (úrodná, neplodná, písčité, jílovité), jak se na půdě bude hospodařit (zelenina, sad, pole, struktura osevu ...) a tak dále. V některých případech dochází k výraznému zlepšení vlastností, někdy ke zhoršení nebo k žádným změnám. Co se týče výnosu plodin po přidání biouhlu, byly sledovány podobné změny, nárůst výnosu, žádný rozdíl nebo mírný pokles. Vždy však záleží na konkrétních podmínkách daného stanoviště, vlastností přidaného biouhlu, agrotechniky, požadavků plodiny na živiny a tak dále (Ganie et al. 2015; Tan et al. 2017; Lou et al. 2020; Yang & Lu 2021).

Pokud se biouhel používá v zemědělství, většinou je používán ve velkém množství, pokud by to mělo nepříznivé účinky z hlediska zemědělské nebo environmentální toxicity, není možné jej z půdy odstranit (Kambo & Duta 2015). Proto je důležité nacházet a studovat půdy, do kterých byl biouhel již přidáván ať už záměrně, či nikoli (*terra preta*, milířiště a jim podobné půdy). Dále vytvářet pokusy s přidáváním biouhlu do půdy a sledovat jeho účinky, studovat jeho vlastnosti a techniky přidávání v různých typech půdy, klimatických podmínkách, s různou agrotechnikou a tak dále (Ganie et al. 2015; Tan et al. 2017).

3.1.3.1 Vliv na fyzikální vlastnosti půdy

Biouhel může snížit objemovou hmotnost půdy a zvýšit pórovitost, čímž zlepšuje provzdušněnost půdy a optimalizuje půdní strukturu a tím podporuje růst plodin. Nízká objemová hustota půdy charakterizuje půdu s vyšším počtem pórů, kdežto vysoká objemová hmotnost půdy naznačuje půdy těžké, s méně póry, což má za následek nízkou provzdušněnost, která může bránit růstu kořenů a ovlivňovat vstřebávání živin a vody (Tan et al. 2017). Biouhel může změnit vlastnosti pórů (distribuci, velikost, tvar, ...), čímž může následně ovlivnit zadržování vody a mechanickou pevnost půdy. Yang & Lu (2021) zjistili po zapracování biouhlu do půdy snížení mechanické odolnosti proti růstu kořenů a zlepšení zpracovatelnosti půdy, čímž se zvýšil výnos. Ve srovnání s kontrolou bez přidání biouhlu zjistili významné zvýšení makroagregátů >5 mm a stabilitu agregátů, dále zvýšení retenční kapacity vody a

dostupný obsah vody v půdě. Přímý příspěvek pórů pocházející z pórů v biouhlu a tvorba nových pórů uspořádáním biouhlu a půdních částic snížila pevnost v tahu a soudržnost půdy. Účinky na tyto fyzikální vlastnosti byly výrazně ovlivněny surovinou a použitým množstvím biouhlu. Naopak Madari et al. (2017) zjistili, že po přidání biouhlu na písčito-jílovitou půdu nebyly účinky na objemovou hustotu půdy po dvou letech významné. Stejně tak Luo et al. (2020) zjistili u písčité a hlinito-písčité půdy podobné účinky.

3.1.3.2 Vliv na chemické vlastnosti půdy

Biouhel má schopnost zvyšovat pH půdy (Tan et al. 2017). Tento efekt je pravděpodobně způsoben tím, že biouhel obsahuje vysoké množství alkalických kovů (základních kationtů – K, Ca, Mg), což přispívá k neutralizaci půdní kyselosti (Novak et al. 2009). U alkalických půd ale nemá biouhel většinou žádné pozitivní účinky na zvyšování pH půdy, dokonce může pH půdy snižovat (Dai et al. 2017).

Na povrchu biouhlu se vyskytuje náboj, který při kontaktu biouhlu s půdou vede k elektrostatické adsorpci. Skupiny aktivního kyslíku na povrchu biouhlu jsou negativně nabitě, a proto má biouhel vysokou KVK (Tan et al. 2017). Kationtová výměnná kapacita je důležitým ukazatelem úrodnosti půdy, používá se k odhadu schopnosti půdy adsorbovat, zadržet a vyměňovat kationty. Půdy s vysokou KVK pravděpodobněji adsorbují základní kationty, což může zlepšit využití iontů živin v půdě a snížit ztrátu živin (Liang et al. 2006).

Biouhel může zvýšit půdní organickou hmotu, která je primárním zdrojem živin. Půdní organická hmota (SOM) podporuje aktivitu mikroorganismů a absorpci dusíku a ztrátu dusíku těkáním (Mary et al. 1996). Kromě toho může SOM zlepšit strukturu půdy a fyzikální vlastnosti stimující růst a vývoj plodin (Wang et al. 2005).

3.1.3.3 Vliv na půdní organismy

Ve většině studií bylo zjištěno, že mikrobiální biomasa roste v důsledku přidávání biouhlu s významnými změnami ve složení mikrobiálního společenství a enzymovými aktivitami, které mohou vysvětlovat účinky biouhlu na cykly prvků, rostlinné patogeny a růst plodin (Lehmann et al. 2011)

Biouhel přímo mění fyzikální a chemické vlastnosti půdy a následně aktivitu mikroorganismů. Změna aktivity mikroorganismů může zase ovlivnit fyzikální a chemické vlastnosti půdy. Hojně a složité póry biouhlu zůstávají zachovány i po jeho aplikaci. Vytvoří se hmota mikropórů, které poskytují prostor pro růst a množení mikroorganismů a chrání je před nepříznivým vnějším prostředím, čímž se snižuje konkurence mezi mikroorganismy (Tan et al. 2017). Z krátkodobého hlediska uvolňování různých organických molekul z čerstvého biouhlu může být v některých případech odpovědné za zvýšení nebo snížení množství a aktivity půdní bioty (Lehmann et al. 2011).

Množství půdních mikroorganismů se zvyšuje s přidáním biouhlu (Tan et al. 2017). Občas pozorovaný pokles v množství mykorhizních hub je pravděpodobně způsoben současným zvýšením dostupnosti živin, což snižuje potřebu symbiontů (Lehmann et al. 2011). Avšak nadměrné množství přidaného biouhlu může mít inhibiční účinek na půdní mikrobiální aktivitu (Zhang et al. 2021).

3.1.3.4 Vliv na absorpci rizikových látek

Bohatá a komplikovaná mikroporézní struktura biouhlu poskytuje velký specifický povrch s mnoha aktivními skupinami na jeho povrchu a s relativně stabilními vlastnostmi. Biouhel lze přidávat do znečištěné půdy, aby absorboval jedovaté a škodlivé látky v půdě. Biouhel snižuje toxické účinky organických znečišťujících látek na rostliny a snižuje akumulaci organických znečišťujících látek v rostlinách. Biouhel může také zlepšit aktivitu půdních mikroorganismů, což jim umožňuje lépe degradovat polutanty. Odstraňování polycyklických aromatických uhlovodíků (PAH) se liší podle toho, jestli použijeme pouze hnojivo, biouhel nebo hnojivo s biouhlem. Samotné hnojivo významně neodstraňuje PAH. Přidáním biouhlu do půdy se významně zvyšuje odstraňování PAH, přibližně na dvojnásobek oproti kontrolní půdě a půdám, kde bylo přidáváno pouze hnojivo. Účinek se zlepšuje a je synergický, pokud se do půdy přidá jak biouhel, tak hnojivo. Rychlost odstraňování se zvyšuje o 12,13 % ve srovnání s přidáním pouze biouhlu. Je to pravděpodobně proto, že biouhel podporuje absorpci PAH a snižuje hladiny PAH. Proto je použití biouhlu slibnou metodou pro sanaci znečištěných půd (Tan et al. 2017).

Existují důkazy o dlouhodobé imobilizaci rizikových prvků v kontaminovaných půdách v různých oblastech, ale existují i opačné důkazy, že po několika letech došlo k oslabení imobilizačního účinku. Snížení sorpční kapacity pro organické znečišťující látky by mohlo být primárně způsobeno zmenšením povrchu (blokováním pórů) a zvýšením polaritu povrchu stárnoucího biouhlu (Ren et al. 2018; Wang et al. 2021). Bylo prokázáno, že biouhel je účinný při snižování obsahu dostupných těžkých kovů v půdě i těžkých kovů v rostlinách. Dlouhodobá účinnost imobilizace pomocí biouhlů však nebyla široce studována (Wang et al. 2021).

3.2 Půdy ovlivněné člověkem

3.2.1 Terra preta

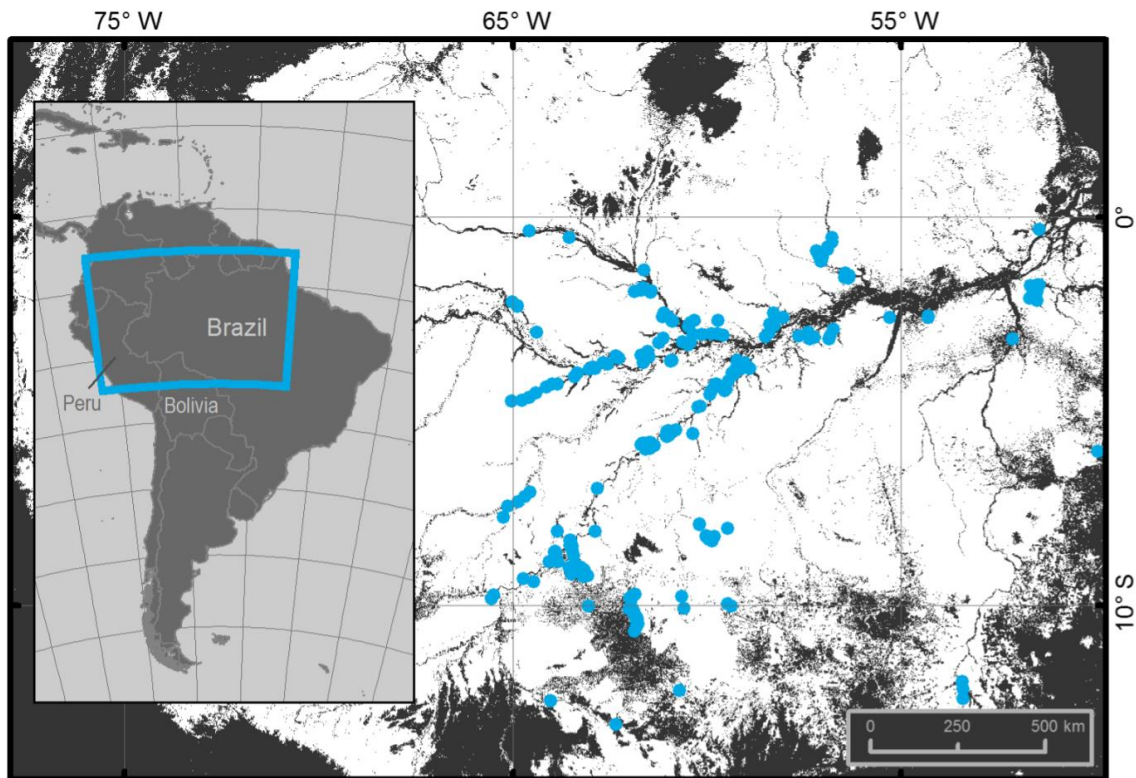
„Terra Preta de Índio“ (indiánská černá země) neboli *terra preta* ze západní Amazonie je hluboký, tmavě zbarvený, antropický horizont A (Lima et al. 2002). Tyto půdy vykazují zcela odlišné vlastnosti než většina půd v této oblasti. Jsou charakterizovány silnou vrstvou stabilní půdní organické hmoty a vysokým obsahem prvků, především P (Glaser 2007). Vyskytují se většinou nad záplavovou oblastí, podél břehů řeky Amazonky, nad hlubokými, silně zvětralými půdami, chudými na živiny (Lima et al. 2002). Na obrázku 1 vidíme profil *terra preta* a okolní půdy.



Obrázek 1: **(a)** Typický profil *terra preta*. Povrchové horizonty jsou tmavě šedé nebo černé barvy a mohou dosahovat hloubky více než 1 m. Pro tento horizont jsou charakteristické střepy, malé kosti a částice dřevěného uhlí. Kořeny sahají hlouběji dolů a s vyšší hustotou než u okolních půd (například Ferralsolů a Oxisolů) a často se vyskytují známky bioturbace a agregátů biogenního původu. Níže následují přechodové horizonty, které jsou světlejší a obvykle vykazují kousky různých hnědých, šedých a černých barev se zřetelnými známkami míchání ornice a podloží. Horizonty podloží jsou totožné s horizonty podloží přilehlých půd. *Terra preta* mají stejnou zrnitost jako okolní půdy (hlinitou nebo písčitou). **(b)** Typický profil okolní půdy (Ferralsolu). Mělký povrchový horizont je světle hnědý a kořeny jsou soustředěny na povrchu půdy. Níže tento horizont přechází do přechodného tenkého horizontu a dále do horizontu podloží, který může mít tloušťku několik metrů. Zrnitost těchto půd je hlinitá nebo písčitá a struktuře dominují stabilní mikroagregáty (pseudopísek) (Glaser et al. 2001).

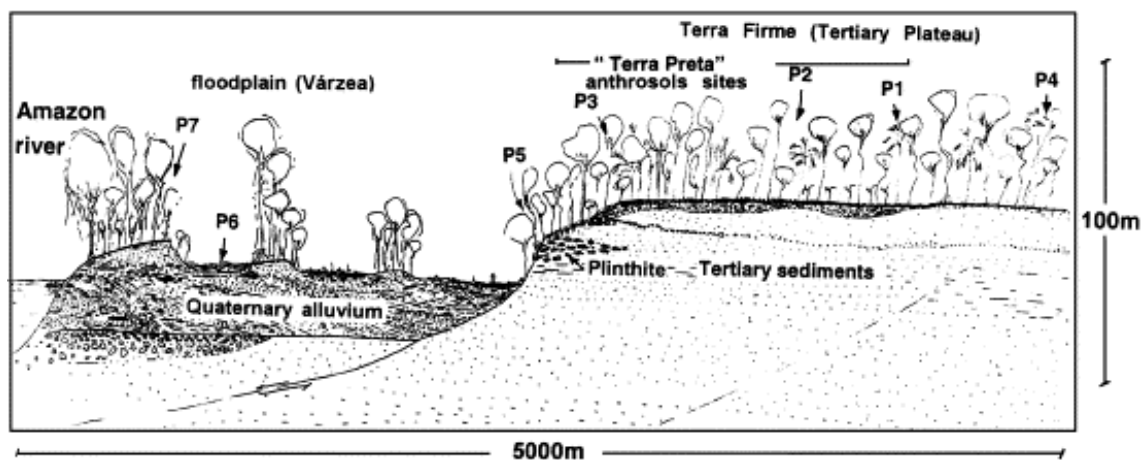
3.2.1.1 Výskyt

Lokality *terra preta* se vyskytují v celé Amazonii (Kern 2003). *Terra preta* není souvislá, ale vyskytují se plochy různých rozměrů, které obsahují archeologické artefakty, například kousky keramiky, zvětralé kosti a organické zbytky (Lima et al. 2002). Plochy *terra preta* byly nalezeny v rozmezí menších než hektar do několika kilometrů čtverečních. Velké plochy se vyskytují především v blízkosti hlavních řek, zatímco v horních tocích byla nalezena pouze menší místa (Kern et al. 2003). Na obrázku 2 je zobrazeno rozmístění známých lokalit s přítomností *terra preta*.



Obrázek 2: Lokality terra preta znázorňují modré tečky (Palace et al. 2017).

Na obrázku 3 vidíme terciární náhorní plošinu, která je dobře odvodněna (regionálně zvaná *Terra Firme*), nivu řeky Amazonky se záplavovou oblastí (regionálně *Várzea*) a *terra preta* na okraji *Terra Firme*. Vzorky P1-P3 v antropogenním A horizontu vykazovaly značný eutrofní charakter, se zvýšenou saturací bází a velmi vysokým obsahem dostupného P (Lima et al. 2002).



Obrázek 3: Schéma typické oblasti výskytu *terra preta* (Lima et al. 2002).

Terra preta bývá často doprovázena pásy *terra mulata* s tmavě hnědou spíše než černou barvou půdy, ale stejně jako *terra preta* s vysokým obsahem SOM (Sombroek et al. 2002). *Terra mulata* je pravděpodobně spojena se zemědělskými praktikami v perifernějších oblastech starověkých sídel. Vyznačuje se nižší úrovní živin oproti *terra preta* a obsahuje méně artefaktů (Smith et al. 2014). Podle Sombroek et al. (2002) *terra mulata* artefakty neobsahuje.

3.2.1.2 Vznik

S největší pravděpodobností vznikla *terra preta* přidáváním biouhlu a odpadních materiálů bohatých na živiny do půd chudých na živiny, například přirozeně se vyskytujících Ferralsolů a Ultisolů. Z anorganických materiálů byly přidávány popel, kosti, především rybí a z organických materiálů rostlinné zbytky, exkrementy, moč a biouhel. Tyto složky byly mikrobiálně metabolizovány a stabilizovány humifikací v půdě. Houby zde hrají důležitou úlohu ve srovnání s bakteriemi v okolních ekosystémech. Biouhel je klíčový komponent v tomto procesu, který zajišťuje stabilitu a obohacení *terra preta* (Glaser & Birk 2012). Pět lokalit *terra preta* ve Střední Amazonii obsahovalo v průměru okolo 50,000 kg biouhlu na hektar a jeden metr hloubky půdy. To je 70x více než v okolních půdách. K tomuto množství by bylo zapotřebí přibližně 25 lesních požárů (Glaser et al. 2001), které se Amazonii vyskytují běžně. V tom případě by ale měla být *terra preta* v celé Amazonii, což není (Glaser & Birk 2012). Za akumulaci biouhlu by mohla být zodpovědná řada antropogenních aktivit, jako je nízká teplota při spalování, například při přípravě jídla na ohni, vypalování keramiky, duchovních důvodech nebo přidávání biouhlu na domácích zahrádkách (Glaser et al. 2001). Podle radiokarbonových dat vznikla *terra preta* mezi 60-1640 n. l. (Heckerberger et al. 2003) a 2500-500 př. n. l. (Neves et al. 2003).

3.2.1.3 Klasifikace

Podle IUSS Working Group WRB (2015) se *terra preta* řadí do referenční skupiny Anthrosoly, které jsou definovány diagnostickými horizonty začínajícími na povrchu půdy s hloubkou nejméně 50 cm. Anthrosoly jsou dále děleny do 6 skupin, kde je *terra preta* řazena do Pretických Anthrosolů s pretickým horizontem. Pretický horizont (portug. preto, černý) je minerální povrchový horizont, který je výsledkem lidské činnosti, včetně přídavku dřevěného uhlí. Charakteristická je tmavá barva, přítomnost artefaktů (fragmenty keramiky, kamenných, kostěných či mušlových nástrojů) a vysoký obsah organického uhlíku, fosforu, vápníku, hořčíku a stopových prvků (zejména zinku a manganu), obvykle kontrastující s přírodními půdami v blízkém okolí. Typicky rovněž obsahuje viditelné zbytky dřevěného uhlí. Pretické horizonty nevykazují zvýšenou aktivitu živočichů.

3.2.1.4 Půdní vlastnosti

pH

V porovnání s okolními půdami, které jsou vysoce kyselé (\approx pH4), je *terra preta* méně kyselé (pH od 5,2-6,4). Vysoká kyselost přirozeně se vyskytujících půd způsobuje vysoké hodnoty výměnného Al, který má za následek toxicitu pro rostliny. *Terra preta*

má tyto hodnoty nižší, a tudíž pro rostliny pěstované na *terra preta* není taková hladina výměnného Al toxická (Falcao et al. 2009).

Kationtová výměnná kapacita a biouhel

Kationtová výměnná kapacita (KVK) v okolních půdách je obvykle nižší než 12 cmol + kg⁻¹. Je to dáno vysoce zvětralými půdami s malou schopností zadržování živin a nízkým obsahem půdní organické hmoty (SOM – soil organic matter), která je nízká kvůli rychlé mineralizaci díky vysokým teplotám a silným srážkám. To je důvod, proč sečení, vypalování nebo hnojení komerčními hnojivy, například NPK není efektivní a udržitelné (Glaser & Birk 2012). Oproti tomu *terra preta* má v průměru 3x vyšší hodnoty SOM (Glaser 2007), a tudíž i vyšší KVK 13-25 cmol + kg⁻¹ (Glaser & Birk 2012).

Nejen kvantita, ale i kvalita SOM je odpovědná za vyšší KVK. *Terra preta* má vysoce stabilní SOM, která je bohatá na kondenzované aromatické struktury. Tyto struktury pocházejí z neúplného spalování (Glaser et al. 2003) a byly nazvány černý uhlík, který obsahuje biouhel, ale také další složky, například popel (Glaser 2007). Doba setrvání biouhlu v půdě byla odhadnuta na 2000 let v půdách mírného podnebí (Kuzyakov et al. 2009). Pomalá oxidace biouhlu v průběhu času zvýšila schopnost zadržování živin (Glaser et al. 2000). Biouhel je tedy klíčovým faktorem pro dlouhodobou stabilitu SOM v *terra preta* i vysokou KVK, a tudíž i pro její samotnou genezi (Glaser & Birk 2012).

Živiny

V okolních půdách, jedná se například o Ferralsoly a Ultisoly, najdeme velmi málo živin. Oproti tomu *terra preta* se vyznačují vysokou úrovní P, N a základních živin. Zásoby živin jsou několikanásobně vyšší než zásoby okolních půd (Lehman et al. 2003).

Celkový a dostupný obsah P v nekultivovaných půdách *terra preta* je velmi vysoký, u kultivovaných půd *terra preta* je tento obsah nižší, avšak stále vysoký (Lima et al. 2002). *Terra preta* obecně obsahuje >200 mg. kg⁻¹ rostlinně dostupného P, na rozdíl od okolních půd, které obsahují asi 5 mg. kg⁻¹ (Falcão et al. 2009).

Biouhel primárně nepřispívá k množství živin, ačkoliv je ho v *terra preta* obsaženo velké množství (Woods & Mann 2000). Biouhel obsahuje pouze stopové množství živin (Glaser 2007).

Jako zdroje živin, lze *in situ* produkovat pouze C a N pomocí fotosyntézy a biologické fixace. Další prvky musí být dodány akumulací živin. Potencionální zdroje živin v *terra preta* jsou následující:

- i. lidské a zvířecí výkaly (bohaté na P a N),
- ii. odpad zahrnující savčí, rybí kosti a želví krunýře (bohatý na P a Ca),
- iii. popel a nedokonalé spalování (bohatý na Ca, Mg, K, P a dřevěné uhlí),
- iv. suchozemská rostlinná biomasa (např. zelené hnojení, kompost) a
- v. vodní rostlinná biomasa (např. řasy) (Glaser 2007).

Nicméně některé koncentrace prvků v *terra preta* jsou sníženy v porovnání s okolní půdou (Ultisolem). Jedná se o Se, U, Al, Fe a V (Barbosa et al. 2020). Snížení koncentrace Se je pravděpodobně zapříčiněna jeho vytěkáním při spalování organických materiálů z úplného (popel) a neúplného spalování (dřevěné uhlí) a jejich začleněním do půdy ve velkém množství (Fletcher et al. 2014; Barbosa et al. 2020).

Často uváděné vyšší výnosy plodin na *terra preta* závisí na druhu plodiny: například plodiny s vysokými požadavky na K nemusí růst stejně dobře (Lehmann et al. 2003; Falcão et al. 2009), jako plodiny s vysokými požadavky na P (Lehmann et al. 2003). Nízké koncentrace rostlině dostupného K v kombinaci s vysokými koncentracemi Ca zapříčiňují nevyvážený výživný stav pro mnoho plodin (Falcão et al. 2009). Zde můžeme uvést banán, jakožto plodinu, která má vysoký požadavek na K, ta zde neroste dobře, stejně tak kukuřice. Naopak plodiny s vysokým požadavkem na P jako jsou luštěniny, fazole a maniok dávaly vyšší výnosy než na okolních půdách. Dále vysoké koncentrace dostupného P, Ca a Mg snižují absorpci Zn a Mn rostlinami, což je další nevýhodou pro produkci plodin (Lehmann et al. 2003).

Mikroorganismy

Existují vědecké důkazy o biologické produkci černého uhlíku v *terra preta* houbami. Černý pigment *Aspergillus niger* obsahuje kondenzované aromatické struktury, podobné strukturám černého uhlíku pyrogenního původu. Nepyrogenní složka by mohla přispět ročně k celkové zásobě černého uhlíku asi 1-3 % v mírném podnebí a až 9 % při zvýšené hladině CO₂ v tropickém podnebí (Glaser & Knorr 2008).

V porovnání bakteriální rozmanitosti nedotčené lesní půdy ze Západního Amazonského lesa a antropogenní *terra preta*, měly obě půdy podobné složení bakteriálních společenstev v rámci fylogenetických skupin, ale *terra preta* obsahovala o 25 % větší druhovou diverzitu (Kim et al. 2007).

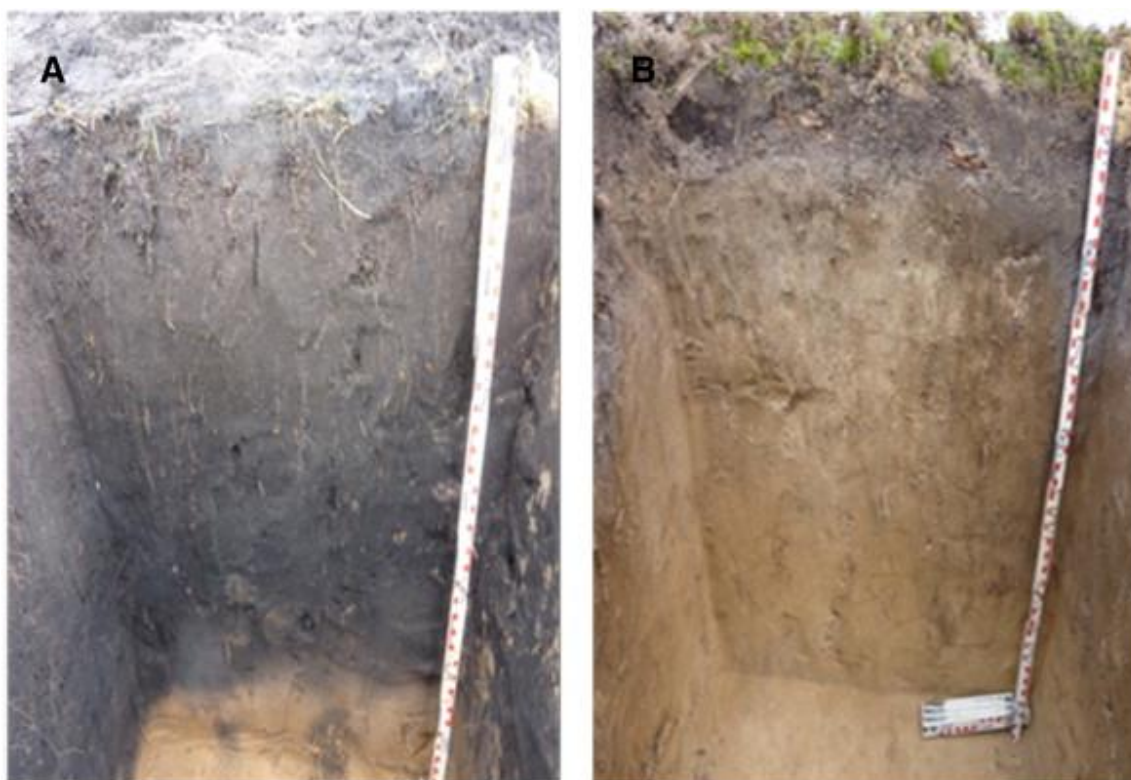
3.2.2 Nordic Dark Earth

3.2.2.1 Naleziště

Během archeologického výzkumu slovanského osídlení v Severním Německu byla objevena hluboká černá půda Nordic Dark Earth (NDE), která připomínala půdu *terra preta*. Byla nalezena přibližně 50 cm pod povrchem půdy a měla rozlohu ca 1,2 ha. Tento Anthrosol je jednoznačně spojen s ostatky slovanského osídlení, které zde bylo od konce 9. až do 13. století našeho letopočtu. Průměrná roční teplota vzduchu je zde kolem 8,7 °C a průměrné roční srážky 720 mm za rok (Wiedner et al. 2015).

3.2.2.2 Klasifikace

Podle IUSS Working Group WRB (2015) NDE odpovídá jak hortickému, tak pretickému horizontu. Hortický horizont (lat. hortus, zahrada) je povrchový minerální horizont vytvořený lidskými aktivitami, jako je hluboká kultivace, intenzivní hnojení a / nebo dlouhodobá aplikace lidských a zvířecích výkalů případně jiných organických zbytků (např. statková hnojiva, domácí odpad, kompost, odpady žump apod.). Hortický horizont je celý promíchaný. Běžně se vyskytují úlomky keramiky a jiné artefakty, často obroušené. Mohou se vyskytovat rovněž známky po orbě a promíchání půdy. Pretický horizont je typický pro *terra preta*. Na obrázku 4 vidíme porovnání profilu NDE s okolní půdou.



Obrázek 4: (A) NDE a (B) referenční půda Cambisol. Vzorky byly odebírány do hloubky 80 cm (Wiedner et al. 2015).

3.2.2.3 Půdní vlastnosti

Hodnoty pH referenční půdy bylo v rozmezí od 2,9 v povrchové vrstvě až 4,4 v 70-80 cm hloubky. Nordic Dark Earth měla pH od povrchové vrstvy 4,1 s nárůstem do 5,8 v 70-80 cm hloubky (Wiedner et al. 2015). U *terra preta* se hodnoty pH pohybovaly v průměru od 5,2 – 6,4 (Falcão et al. 2009).

Potencionální KVK referenční půdy nebyla vyšší než $0,35 \text{ cmol} + \text{kg}^{-1}$. To je v silném kontrastu s NDE, kde byla potencionální KVK až $14,5 \text{ cmol} + \text{kg}^{-1}$ (Wiedner et al. 2015). U *terra preta* byla KVK v průměru $15 \text{ cmol} + \text{kg}^{-1}$ v hloubce půdy 0-10 cm a $9,6 \text{ cmol} + \text{kg}^{-1}$ v hloubce 30-40 cm (Glaser et al. 2000).

Celkové množství organického uhlíku v NDE pro hloubku 0-80 cm bylo $121 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ v porovnání s referenční půdou $68 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Wiedner et al. 2015). U *terra preta* bylo celkové množství organického uhlíku $250 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ a okolních půd $70 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ (Glaser 2014).

Obsah biouhlu u NDE byl $30,8 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ na 80 cm hloubky, zatímco referenční půda obsahovala pouze $8 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ na stejnou hloubku, to znamená obohacení 4x (Wiedner et al. 2015). U *terra preta* byl obsah biouhlu $50 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ a oproti okolním půdám byla *terra preta* obohacena o biouhel 70x (Glaser 2014).

Celkový obsah prvků byl v NDE vysoce obohacen ve srovnání s referenční půdou. Pomocí fekálních biomarkerů byl indikován zvířecí hnůj, který pocházel z všežravců, býložravců a lidských exkrementů. Vstupní materiály a výsledné chemické vlastnosti NDE byly srovnatelné s *terra preta*. To naznačuje, že jejich geneze byla totožná. Existence NDE v klimatu

Evropy představuje schopnost písčité půdy udržet vysoký obsah organické hmoty a retenci živin po stovky let (Wiedner et al. 2015).

3.2.3 Terra Preta Australis

3.2.3.1 Naleziště

Terra Preta Australis (TPA) se nacházejí nad záplavovou oblastí podél řeky Murray v Jihovýchodní Austrálii. Panuje zde mírné klima s průměrnou denní teplotou 15,7 °C a průměrnými ročními srážkami 400 až 500 mm, které padají většinou v zimních měsících (Downie et al. 2011; Weatherzone 2021). Oproti tomu místa, kde se nachází *terra preta* může být průměrná roční teplota 20–26 °C i více a průměrné roční srážky 2200–3100 mm, výjimečně i více (Alvares et al. 2013). Záleží však na konkrétním místě, kde se *terra preta* nachází.

Radiokarbonová data prováděná na dřevěném uhlí ze dvou různých míst ukázala stáří jednoho místa 650 ± 30 let př. n. l. a druhého 1609 ± 34 let př. n. l. Antropologie těchto lokalit naznačuje, že toto uhlí bylo přidáno do půdy kočovnými domorodci, kteří vyprázdnily hliněné pece po přípravě jídla (Downie et al. 2011).

3.2.3.2 Klasifikace

Terra Preta Australis je neformální klasifikace těchto půd. Tyto půdy vykazují podobné vlastnosti jako půdy *terra preta*, ale nebyly zde nalezeny zbytky keramiky, protože australští domorodci keramiku nevyrobili a množství spalovaného odpadu bylo menší. Ve studované oblasti se velikosti ploch TPA pohybovaly přibližně od 1 do 10 ha (Downie et al. 2011), *terra preta* i několik kilometrů čtverečních (Kern et al. 2003). To naznačuje, že oproti předkolumbovské populaci australští domorodci nezakládaly zemědělské pozemky a nerozhrnovali odpad po polích. Na obrázku 5 vidíme porovnání půdního profilu TPA a referenční půdy. Vyskytují se zde převážně písčité půdy (Downie et al. 2011).



Obrázek 5: Půdní profil TPA (vlevo), sousední půda (vpravo). Lopatka má 20 cm. Vzorky byly odebírány do hloubky 80 cm (Downie et al. 2011).

3.2.3.3 Půdní vlastnosti

Terra Preta Australis měla pH od povrchu do 30 cm hloubky půdy (6,5–7,1) ve srovnání s okolní půdou (5–6,2) to je pH vyšší v průměru o 1,3 jednotky (Downie et al. 2011). U *terra preta* došlo v hloubce 0–10 cm ke zvýšení pH o 1,6 jednotek, kde pH *terra preta* bylo v průměru (5,5) v porovnání se sousedním Oxisolem pH v průměru (3,9). Je však nutno poznamenat, že v hloubce půdy 30–40 cm nedošlo u pH *terra preta* (4,8) v porovnání s Oxisolem (4,4) k výraznému rozdílu (Glaser et al. 2000).

Kationtová výměnná kapacita u TPA v hloubce půdy 20–30 cm byla oproti okolím půdám vyšší o $31,2 \text{ cmol} + \text{kg}^{-1}$ (Downie et al. 2011). *Terra preta* v profilu 0–10 cm ve srovnání se sousedním oxisolem měla KVK vyšší o $13,3 \text{ cmol} + \text{kg}^{-1}$ a v hloubce 30–40 cm došlo také k výraznému rozdílu o $9,0 \text{ cmol} + \text{kg}^{-1}$ (Glaser et al. 2000).

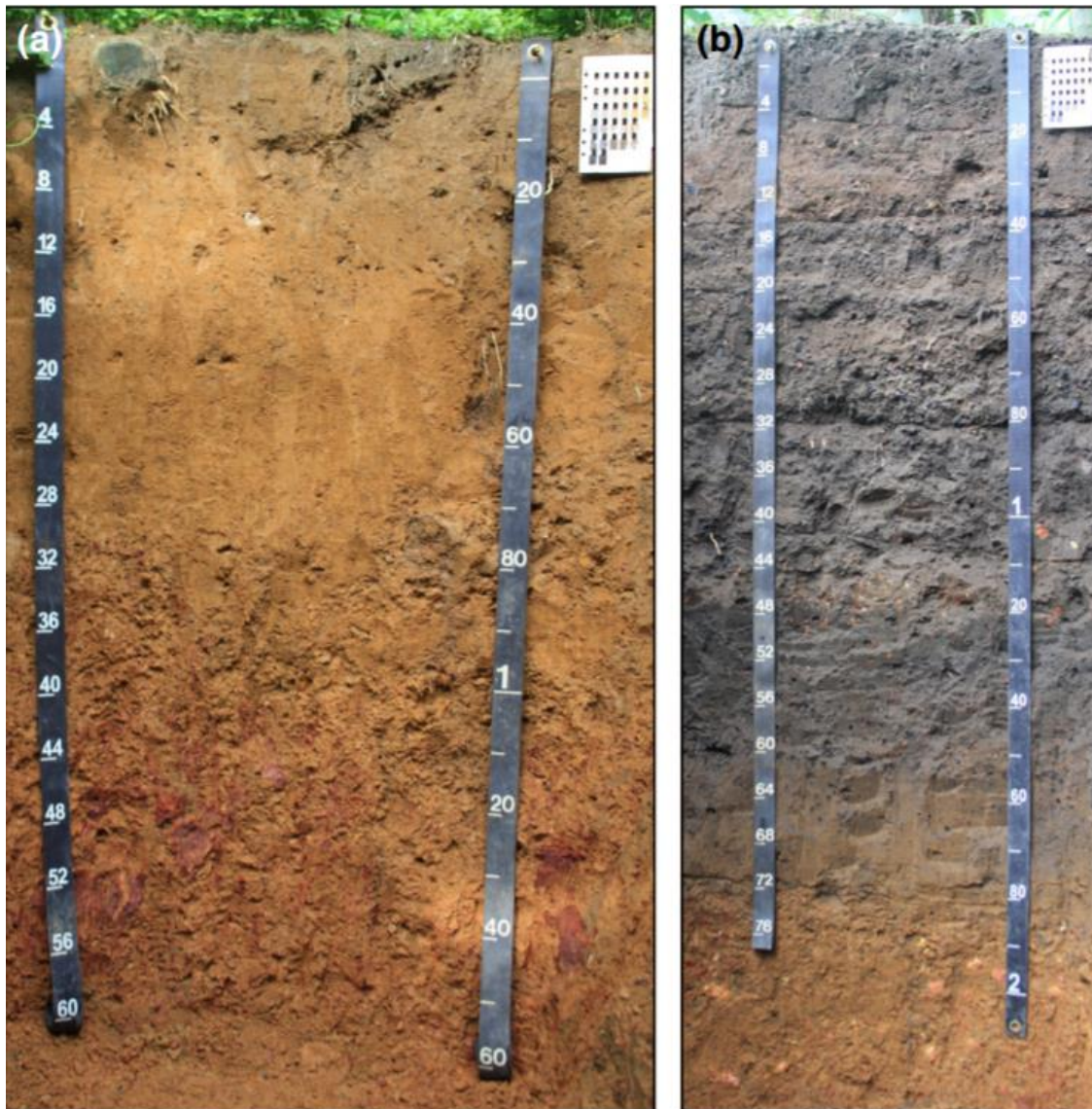
Průměrná hodnota celkového organického C v TPA oproti okolním půdám byla zvýšena o $33,5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Downie et al. 2011). U *terra preta* byl zjištěn nárůst organického C oproti sousednímu oxisolu o $23,5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ v hloubce půdy 0–10 cm a $15,7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ v hloubce 30–40 cm (Glaser et al. 2000). U TPA může být příčinou vyššího množství organického C soustředění spálených organických zbytků na jedno místo (Downie et al. 2011).

Co se týče stavu živin, N, P, K a Ca byly výrazně vyšší než v okolních půdách v celém profilu, P skoro 10x vyšší (Downie et al. 2011). U *Terra preta* byl obsah P v porovnání se sousedním Ultisolem až 5x vyšší a N, K, Ca byly také výrazně obohaceny (Barbosa et al. 2020).

3.2.4 African Dark Earths

African Dark Earths (AfDE) byly nalezeny v severní Libérii a v Ghaně. V Libérii se průměrná teplota pohybuje kolem 26 °C a průměrné roční srážky 2900 mm, v Ghaně průměrná teplota okolo 27 °C a průměrné roční srážky 1090–1480 mm. Podle radiokarbonových dat, se sráží pyrogenního uhlíku na těchto lokalitách odhaduje na 115-692 let př. n. l. Obecně jsou AfDE velice podobné půdám *terra preta*. Profil AfDE s okolní půdou můžeme vidět na obrázku 6 (Solomon et al. 2016).

Hodnoty pH v AfDE (5,6–6,4) byly vyšší ve srovnání s okolní půdou (4,3–5,3). Kationtová výměnná kapacita byla v AfDE 1,4–3,6x vyšší než v okolní půdě s hodnoty 9–18 cmol + kg⁻¹. Celkový organický uhlík byl v Libérii na hloubku půdy 2,2 m přibližně 400 Mg. ha⁻¹, v Ghaně na hloubku půdy 2,6 m přibližně 440 Mg. ha⁻¹. V porovnání s okolní půdou bylo v AfDE celkového organického uhlíku 2–3x více a pyrogenního uhlíku 2–26x více. Obsah živin byl v AfDE také výrazně vyšší než v okolních půdách, zejména Ca, Mg a P (Solomon et al. 2016).



Obrázek 6: (a) žluto-červené půdy klasifikované jako Oxisoly nebo Ultisoly (b) AfDE, kde je vidět akumulace pyrogenního uhlíku až do hloubky 1,8 m (Solomon et al. 2016).

3.2.5 Sambaquis (shell mounds)

Sambaquis se vyznačují velkým množstvím uhličitanu vápenatého, který pochází ze schránek měkkýšů (Kern et al. 2019). Svrchní část profilu Sambaquis můžeme vidět na obrázku 7. Podle IUSS Working Group WRB (2015) se Sambaquis řadí mezi Terrické Antrosoly s terrickým horizontem. Terrický horizont (lat. terrae, země) je minerální povrchový horizont, který se vyvíjí v důsledku dodávání těžných surovin (tzv. earthy manures), kompostů, plážového písku, spráše nebo bahna. Může obsahovat náhodně vytríděný a náhodně rozložený skelet. Ve většině případů se vyvíjí postupně během dlouhého časového období. V některých případech jsou terrické horizonty vytvořeny přidávkou pouze jednoho materiálu. Běžně je přidaný materiál smíchán s původní orníci. Terrický horizont není homogenní, nicméně subhorizonty jsou důkladně promíchány. Běžně obsahují artefakty jako fragmenty keramiky, kulturní úlomky a odpady, které jsou typicky velmi malé (v průměru <1 cm) a hodně obroušené.

Terrické horizonty mají obvykle vysokou biologickou aktivitu, mají neutrální až slabě alkalickou půdní reakci (pH ve vodě je obvykle ≥ 7), a mohou obsahovat volné vápno. Barva terrického horizontu se silně váže na zdrojový materiál.

Půdy Sambaquis se vyskytují v Brazílii a v porovnání s *terra preta* mají půdy Sambaquis podobné vlastnosti, ale liší se zejména vyšším pH v průměru (7,7) v hloubce půdy 0–50 cm, ve srovnání s okolními Acrisoly pH (5,1) v hloubce půdy 0–50 cm, to je rozdíl o 2,6. Sambaquis vykazovaly i mimořádnou KVK 8,1–25,4 cmol + kg⁻¹ (Kern et al. 2019).



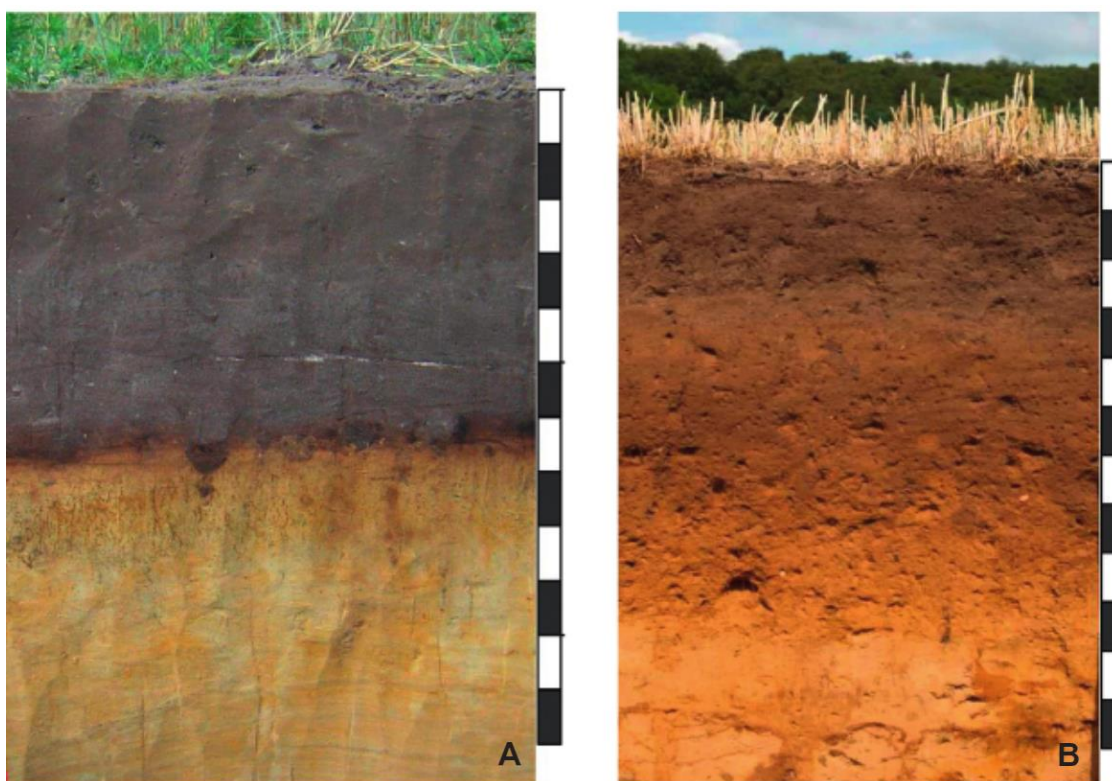
Obrázek 7: Sambaquis s typickou svrchní vrstvou schánek měkkýšů (Kern et al. 2019).

3.2.6 Plaggické Anthrosoly

Podle IUSS Working Group WRB (2015) Plaggické Anthrosoly s plaggickým horizontem (něm. plag – travnatá zem, drn) je černý nebo hnědý, minerální povrchový horizont, který vznikl jako výsledek lidských aktivit. Zrnitost je ve většině případů písek nebo hlinitý písek. Půdní profil Plaggických Anthrosolů můžeme vidět na obrázku 8. Tvorba Plaggických

Antrosolů je výsledkem využití orné půdy starou technikou plagg agriculture, která započala přibližně před 1000 lety a skončila se zavedením minerálního hnojení, které bylo zavedeno přibližně před 150 lety. Hlavním cílem bylo zlepšit kvalitu půdy, zejména půd chudých na živiny, jako jsou Podzoly. Podstata plaggic agriculture spočívala v tom, že se vytrhávaly rostliny nebo drny (vřesy, trávy, byliny i drobná keřová vegetace) a i s jejich hlínou a kořeny byly dávány do stájí jako podestýlka. Ve stájích došlo k obohacení o hnůj a poté byla podestýlka vyvezena a rozprostřena po poli. Hnůj se rozložil a zhumifikoval (stal se z něj humus). Živiny zůstaly zachovány a rostl povrch půdy v průměru o 0,1 cm za rok. Proto je plaggic horizont 70–150 cm hluboký a bohatý na humus, někdy obsahuje artefakty (Giani et al. 2014).

Hlavní oblasti, kde se Plaggické Antrosoly vyskytují je Severozápadní Německo, Nizozemsko a Severovýchodní Belgie. Menší výskyt jsou také hlášeny z jiných částí Evropy (Giani et al. 2014) z Jihozápadního Norska (Schnepel et al. 2014) a Severního Ruska (Hubbe et al. 2007). Průměrná roční teplota v Německém Oldenburgu, kde se Plaggické Antrosoly vyskytují je 8,7 ° C a průměrné roční srážky jsou 720 mm (Giani et al. 2014).



Obrázek 8: Giani et al. (2014) rozlišují Plaggické Anthrosoly na (A) Grey Plaggic Anthrosol a (B) Brown Plagic Anthrosol.

3.2.7 Půdy historických milířišť

3.2.7.1 Historie

Milířiště též uhlíště nebo uhlířská plošina nazýváme historická místa po pálení (výrobě) dřevěného uhlí (Bonhage et al. 2020).

Milířiště poznáme podle kruhové nebo elipsovité plošiny, ojedinele i čtvercové, v průměru většinou kolem 10 metrů. Milířiště jsou často vodorovně srovnané, nebo alespoň s náznakem, také často zabudované do svahu, kdy se půda ze svahu odkopala a byla použita k modelaci druhé části plošiny (Hirsch et al. 2017; Matoušek a Bobek 2017). Lze nalézt i milířiště, která mají vyskládanou zeď z kamenů pro zpevnění/udržení plošiny na strmých svazích (Carrari et al. 2017). Milířiště ve svazích jsou proto nejnápadněji rozpoznatelné (Hardy et al. 2016). Také si lze všimnout valů, které se mohou nacházet po obvodu milířiště, kam byla shrabávána půda z povrchu milíře, která sloužila k zamezení přístupu vzduchu při pálení dřevěného uhlí (Hirsch et al. 2017). Milířiště s vyskládanými kameny po svahu vidíme na obrázku 9.



Obrázek 9. Snadno rozpoznatelné milířiště ve svahu (Hirsch et al. 2017).

Milířiště můžeme nalézt většinou v lesích poblíž historických železáren, nejvíce v Evropě a na východě Spojených států (Hirsch et al. 2017). Avšak tyto známky historického využívání lesů, využívání dřeva a produkce dřevěného uhlí jsou rozšířené po celém světě, zejména v horských lesních oblastech. V krajině mohou milířiště dosahovat v extrémních případech více než 150 milířišť na kilometr čtvereční, takže průměrná vzdálenost mezi milířišti by byla menší než 90 metrů (Ludemann 2010).

Ludemann (2010) zanalyzoval dřevěné uhlí na hranicích Německa, Francie a Švýcarska v místech, kde se páliło dřevěné uhlí a zjistil stáří od Neolitu přibližně 5000 let př. n. l. po současnost v časovém měřítku o délce 7000 let. Je nutné poznamenat, že dřívě se jednalo o velice malá množství dřevěného uhlí a také bylo využíváno v primitivnějších technologiích (archeometalurgických procesech), například tavení stříbra. V průběhu dějin se využívání dřevěného uhlí zvyšovalo a dosáhno maxima ve střední Evropě na konci 18. století (Ludemann

2010). Od poloviny 19. století bylo ve střední Evropě dřevěné uhlí v metalurgii nahrazováno koksem, což znamenalo postupný zánik pálení dřevěného uhlí (Kadera 2014).

Konkrétně v brdské oblasti, kde byly odebírány půdní vzorky do této bakalářské práce, se v blízkosti milířišť nacházela Huť Svatá Dobrotivá, založená zřejmě už ve 2. polovině 15. století, také nazývaná jako Klášterská Huť. Pracovalo se zde až do počátku 19. století (místopis.eu 2008; Kořán 1946).

Dřevěné uhlí bylo v této době podstatnou surovinou především pro tavení železa v hutích, ale i pro další průmyslové odvětví (Ludemann 2010; Hirsch et al. 2017; Bonhage et al. 2020). Konkrétně v brdské oblasti byly neobyčejně vhodné podmínky pro vznik průmyslu železářského, jak vzhledem k jakostní rudě, tak k dostatečným zásobám paliva (Kořán 1946).

Dřevěné uhlí se páliło především v tzv. milířích, což je nazýváno jako technologie výroby dřevěného uhlí pod nestabilním příkrovem, kdy v průběhu procesu dochází k prostorovým změnám na výrobním zařízení. Milíře se páliły v lese, aby se minimalizovala přeprava dřeva. Teprve zpřístupnění porostů (infrastruktura – plavební kanály, cesty apod.) umožnilo zefektivnit jeho výrobu pálením ve stabilních, jedno či dvoukomorových pecích anebo retortách (Kadera 2014).

3.2.7.2 Milíře

Při stavbě milíře se nejprve urovnala plocha pro milíř, shrabala svrchní vrstva půdy (jehličí, kamení, tráva, kořeny, větve) a také když bylo potřeba plac udusat. U většiny milířů se dělal tzv. rošt z kulatin, které se skládaly rovnoběžně vedle sebe. Buďto se samotné dřevo (kulatiny) skládaly kolmo na rošt, vodorovně nebo se dřevo skládalo šikmo na výšku. Mezery mezi poleny se vyplňovaly drobným dřevem, třískami apod. Zápalný kanál se dělal z dobře hořlavého materiálu (třísky, slabší dřevo, chrástí, devěné uhlí) a bylo potřeba s ním počítat již při skládání polen. Následně byl celý milíř pokryt silnou vrstvou jehličnatého chvojí, trávou, mechem, rákosem, suchým listím apod., tzv. spodním pláštěm, který zabraňoval nežádoucímu propadání zeminy mezi dřevo. U některých milířů se dělalo bednění, kde se nechávala mezera, která se zasypala zeminou, tzv. svrchní plášť. Nejlepším materiálem byla přepálená mastná zemina nazývaná česky mour, což byla to hlína s uhelným prachem. Po vyplnění prostor mezi bedněním a milířem byl svrchním pláštěm pečlivě pokryt i vrchní povrch milíře. Vrstva svrchního pláště byla mocná 15–30 cm. (Kadera 2014). Ukázkou základny milíře s vyskládanými poleny a ve středu se zápalným kanálem nalezneme na obrázku 10.



Obrázek 10: Experimentální pálení milíře – rovnání polen, uprostřed hromady je zápalný kanál (Cyrus a Matoušek 2009).

Samotný výpal milíře se dělil do těchto fází: zapálení, předehtřívání, vlastní výpal, chladnutí a rozebírání. (i.) Po rozhoření se udělala první řada dýmníků, otvory k odvodu plyných produktů. (ii.) Fáze předehtřívání trvala dle šířky milíře a obsahu vody ve dřevě od 8 do 24, ale i 36 hodin. Dřevěné uhlí se již začalo vytvářet, dřevo vysychat, tmavnout a snižovat jeho pevnost. Po fázi předehtřívání nastal (iii.) vlastní výpal, kdy od 275 po 450 °C započal bouřlivý exotermický rozklad, tvořily se kondenzovatelné zplodiny (surový dřevní ocet neboli dehet). Po dosažení teplot 450 až 550 °C se uhlí zbavovalo prchavých produktů a zvyšoval se podíl uhlíku (tzv. pálení uhlí). Vlastní výpal milíře dle velikosti a vlhkosti dřeva trval od několika málo dní až po dva týdny. (iv., v.). Chlazení milíře probíhalo tak, že uhlí bylo vyhrabáváno postupně. To mohlo být opět zahazováno svrchním pláštěm a vyhrabáváno postupně. Vyhrabané uhlí bylo dle potřeby hašeno vodou a neustále hlídáno a dále dohašováno (Kadera 2014).

4 Metodika

4.1 Výběr lokality

Pro výběr lokality bylo zohledněno více aspektů, například předpoklad přítomnosti objektů milířišť z historických pramenů, z rešerší archeologických a přírodovědných a také převážně vybrat území, které spadá do režimu velkoplošného zvláště chráněného území.

Výběr konkrétního území pro terénní šetření (odběr vzorků) proběhl na základě vyhodnocení LiDARových dat (vizuální vyhodnocení přítomnosti milířišť). LiDAR (z anglického Light Detection And Ranging) je metoda dálkového měření vzdálenosti na základě výpočtu doby šíření pulzu laserového paprsku odraženého od snímaného objektu.

Na jaře roku 2019 proběhl nálet v Brdech (nálet je potřeba provést v období po roztání sněhové pokrývky a před rašením listů dřevin). Následně byly vytvořeny vrstvy s rozlišitelnými kruhovými/elipsovými strukturami milířišť.

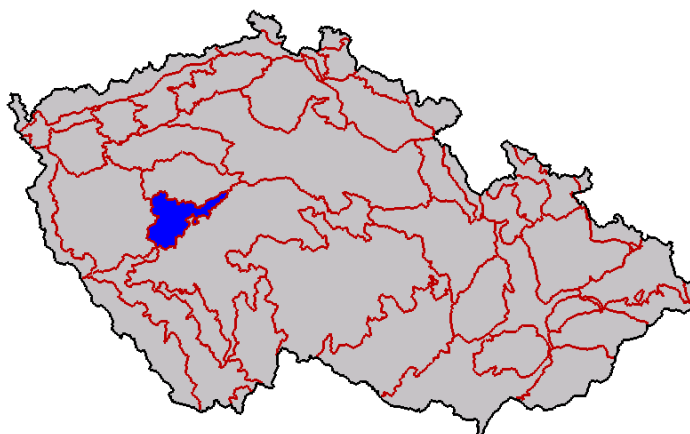
Pro vzorkování půdy v lokalitě Brdy bylo vybráno 10 milířů z vymezeného nového polygonu v centrální části CHKO Brdy na území bývalého vojenského újezdu. Polygon byl vybrán na základě velkého množství milířů a zachovalosti lesa.

Ke každému milířišti byla zvolena kontrola ve vzdálenosti do 50 m, pokud možno po vrstevnici tak, aby všechny ostatní přírodní faktory a podmínky zůstaly stejné.

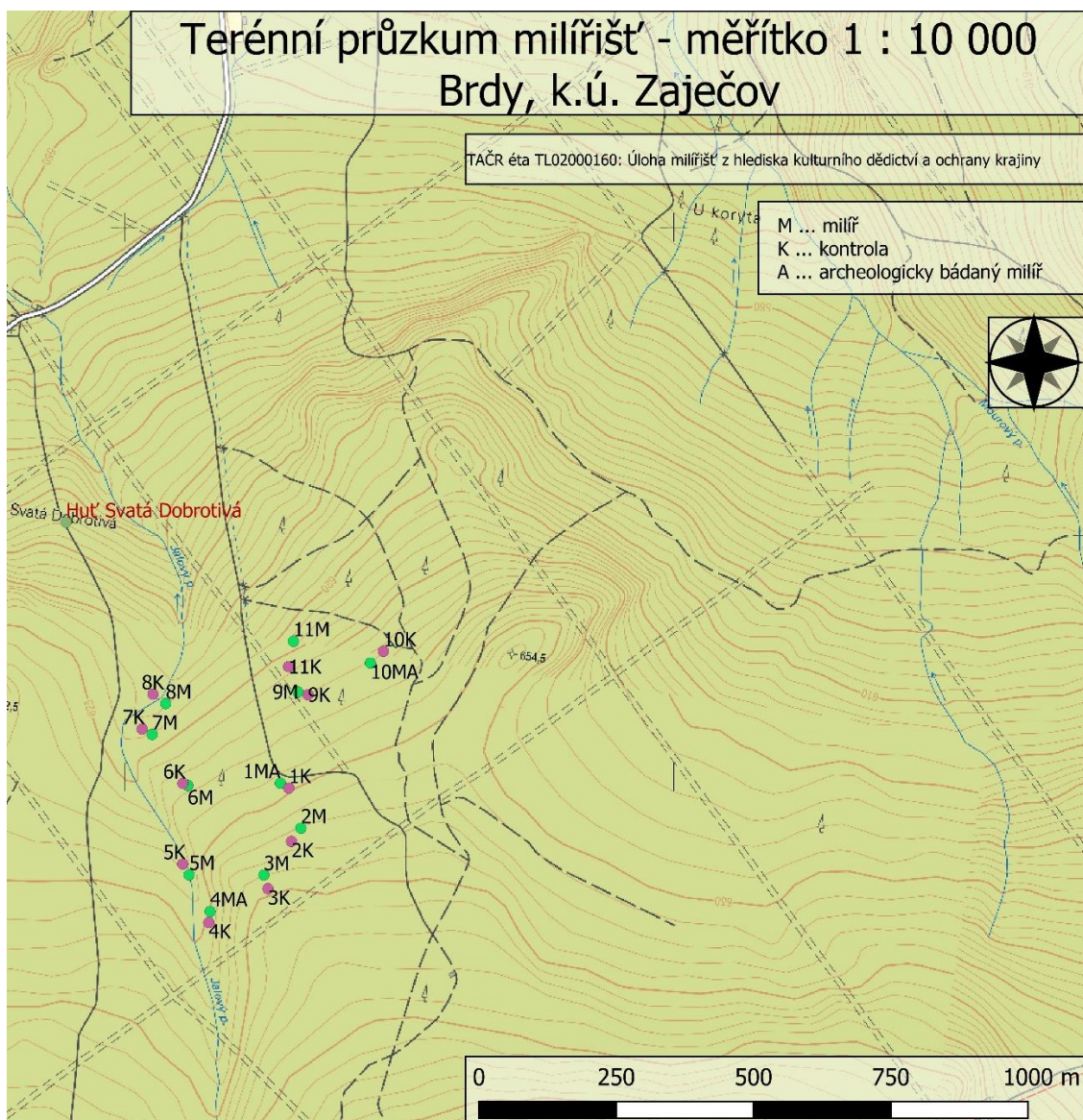
4.2 Popis lokality

Polygon nalétnuté zájmové lokality Brdy je umístěn uprostřed centrální části vrchoviny středních Brd, která je od roku 2016 součástí nově vzniklé CHKO Brdy. CHKO Brdy se dle geomorfologického členění reliéfu ČR nachází v Brdské vrchovině, která se táhne jihozápadně od hlavního města Prahy. Brdskou vrchovinu vidíte modře zvýrazněnou na obrázku 11. Nejvyšším vrcholem Tok 865 m.n.m. Vybrané milíře se nacházejí od 610 do 650 m.n.m. Detailní umístění vybraných milířů znázorňuje obrázek 12. Můžeme vidět, že většina z vybraných milířů se nachází v blízkosti Jalového potoka, nedaleko bývalé Hutě Svatá Dobrotivá.

Půdními typy kontrol v blízkosti milířišť jsou podzol, kambizem, pseudoglej, ranker a fluvizem. Porost je zde převážně smrkový (*Picea*) se zastoupením modřínu (*Larix*), klimatická oblast ČR chladná (ArcGis) s průměrnou teplotou vzduchu kolem 8 °C a průměrnými ročními srážkami přibližně 600–700 mm (ČHMÚ).



Obrázek 11: Brdská vrchovina na mapě ČR (Matějka 2005).



Obrázek 12: Detailní pozice vybraných milíříšť (Nepublikované výstupy z projektu TAČR TL02000160).

4.3 Vzorkování půd a milířišť

Na vybraných milířišťích a přilehlé kontrole (25-50 m vzdálené) byla vykopána půdní sonda. Kontrolní půdy nejevily známky antropogenní činnosti jako jsou cesty, stavby aj.) Celkem bylo vzorkováno 11 párů (11 milířišť a 11 kontrol). Každá půdní sonda byla popsána, fotograficky zdokumentována a byly odebrány vzorky. Datum odběru bylo 29–30.6.2020.

Na obrázku 13 vidíme půdní sondu milířišťe a kontroly číslo 4. U kontroly jsou dobře rozeznatelné horizonty opadanky, fermentační a humifikační horizont, směrem dolů následuje horizont A a C. U milířišťe je dobře vidět pouze horizont opadanky, dobře znatelný je ještě fermentační horizont (F), avšak humifikační (H) horizont částečně splývá s uhelným (označeno v tomto případě U) horizontem, který je mocný 15 cm. Pod uhelným horizontem následuje přechod do minerálního horizontu C.



Obrázek 13: půdní sonda číslo 4: (vlevo) milířišť, (vpravo) kontrola (autor fotografií: Václav Tejnecký)

Na obrázku 14 vidíme půdní sondu milířišťe a kontroly s číslem 7. U kontroly je velmi dobře vidět horizont opadanky, fermentační horizont a humifikační horizont. Směrem dolů následuje horizont A a M. U milířišťe vidíme horizont opadanky, fermentační a humifikační horizont s menší mocností, téměř nerozeznatelné od sebe. Následuje dolů horizont M1, který byl naplaven při rozvodnění Jalového potoka, tím byl překryt uhelný horizont, který má mocnost 11 cm. Pod uhelným horizontem následuje dolů horizont RED, což je horizont, který byl ovlivněný vysokou teplotou při pálení milíře. Pod horizontem RED je horizont M2.



Obrázek 14: Půdní sonda číslo 7: (vlevo) milířiště, (vpravo) kontrola (autor fotografií: Václav Tejnecký)

4.4 Příprava vzorků

Vzorky byly usušeny v sušárně (Memmert) při 40 °C, rozmělněny v třecí misce a přesítovány na frakci <2 mm. Pouze u horizontu U (uhlí) byly zachovány i frakce >2 mm kvůli stanovení druhu dřeva, které bylo páleno.

4.5 Stanovení pH

Stanovení aktivního pH ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) a výměnného pH ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$) proběhlo dle metodiky ICP forest manual 2016 (Cools N, De Vos B, 2016). Vzorky byly odměřeny objemově 1:5, v našem případě konkrétně 5 ml předpřipraveného vzorku do 50ml centrifugačních zkumavek. Ke vzorku byl přidán roztok, v našem případě 25 ml. Pro stanovení $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$ byla použita deionizovaná voda (konduktivita < 0.055 $\mu\text{S cm}^{-1}$; přístroj Crystal Adrona) a pro $\text{pH}_{(\text{CaCl}_2)}$ 0,01 mol/l koncentrace chloridu vápenatého. Poté byly pracovní vzorky přesunuty na třepačku a proběhlo třepání 60 min. +/- 10 min. Vzorky byly vyndány z třepačky a proběhlo ustálení nejméně 1 hod. a nejdéle 3 hod. Dále byl zkalibrován pH metr pomocí pufrů. V posledním

kroku bylo měřeno pH pomocí pH metru (Multi 3620 IDS), elektroda (pH Electrode SenTix 940) a proveden zápis do tabulky na 2 desetinná místa.

4.6 Stanovení kationtové výměnné kapacity (KVK) a výměnných prvků

Princip této metody spočívá v nasycení sorpčního komplexu přebytkem kationtu (Ba^{2+}) a vytěsnění sorbovaných kationtů do roztoku, kde poté proběhne měření pH a bude provedena prvková analýza pomocí optické emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES).

Na stanovení KVK a výměnných prvků dle metodiky ICP forest manual 2016 (Cools N, De Vos B, 2016) bylo naváženo $2,5 \pm 0,005$ g vzorku do 50 ml centrifugační zkumavky. Dávkovačem se k naváženému vzorku přidalo 30 ml 0,1 mol/l roztoku BaCl_2 . Poté byly pracovní vzorky přesunuty na třepačku a proběhlo třepání 2 hod. Dále centrifugace 10 min (4000 ot/min). Filtrace přes filtrační papír do nové centrifugační zkumavky. Měření pH přefiltrovaného roztoku pomocí pH metru (Multi 3620 IDS), elektroda (pH Electrode SenTix 940), změřeno bylo rovněž pH připraveného roztoku BaCl_2 . Zápis do tabulky na dvě desetinná místa. Dále se roztok naředil 10x deionizovanou vodou a byl filtrován přes stříkačkový membránový filtr s póry menšími než 0,45 μm . Nakonec se stanovily prvky pomocí optického emisního spektrometru s indukčně vázaným plazmatem iCap 7000 (Thermo).

Se stanovenými prvky a hodnoty pH byly dále vypočítány: iontový ekvivalent ($\text{cmol} + \text{kg}^{-1}$), volný vodík ($\text{cmol} + \text{kg}^{-1}$), KVK ($\text{cmol} + \text{kg}^{-1}$) a saturace bází (%).

IE – iontový ekvivalent ($\text{cmol} + \text{kg}^{-1}$)

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

kde:

c – koncentrace prvku v roztoku v mg L^{-1}

V – objem přidaného roztoku v ml

m – navážka vzorku půdy v g

EQ – ekvivalent prvku v g mol^{-1}

EQ = M/z (M – molární hmotnost prvku v g mol^{-1} , z – náboj prvku)

H^+ - volný H ($\text{cmol} + \text{kg}^{-1}$)

$$\text{H}^+ (\text{cmol} / \text{kg}) = 10^{-1} * \frac{(10^{-\text{pH}_p} - 10^{-\text{pH}_0}) * V * 1000}{m * 0,88} - \frac{c(\text{Al}) * V}{m * M(\text{Al}) * \left(1 + \frac{10^{-\text{pH}_p}}{10^{-5,85}}\right)}$$

kde:

pH_p – hodnota pH BaCl_2 roztoku po extrakci půdy

pH_0 – hodnota pH připraveného roztoku BaCl_2

V – objem přidaného roztoku v ml
m – navážka vzorku půdy v g
c(Al) - koncentrace Al v roztoku BaCl₂ v mg L⁻¹
M(Al) - molární hmotnost Al v g mol⁻¹

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

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

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

kde:

KVK – kationtová výměnná kapacita

BC – bazické kationty

EA – výměnná acidita

Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Al³⁺, Fe³⁺, Mn²⁺, H⁺ - iontový ekvivalent (cmol + kg⁻¹)

$$\mathbf{\text{Saturace bází (\%)} = BC/KVK * 100}$$

Saturace bází – nasycenost sorpčního komplexu bazickými kationty (%)

4.7 Zpracování dat, statistika

Data byla zapisována do programu MS Excel, kde byly provedeny i výpočty, tvorba tabulek a grafů. Další grafy byly vytvořeny v programu Statistika verze 12 (StatSoft ČR s.r.o.) pomocí vícefaktorové analýzy rozptylu (ANOVA). Po výpočtech byly data KVK převedeny z jednotek cmol + kg⁻¹ na meq. kg⁻¹. Seznam vzorků se všemi zapisovanými údaji a výpočty nalezneme v přílohách.

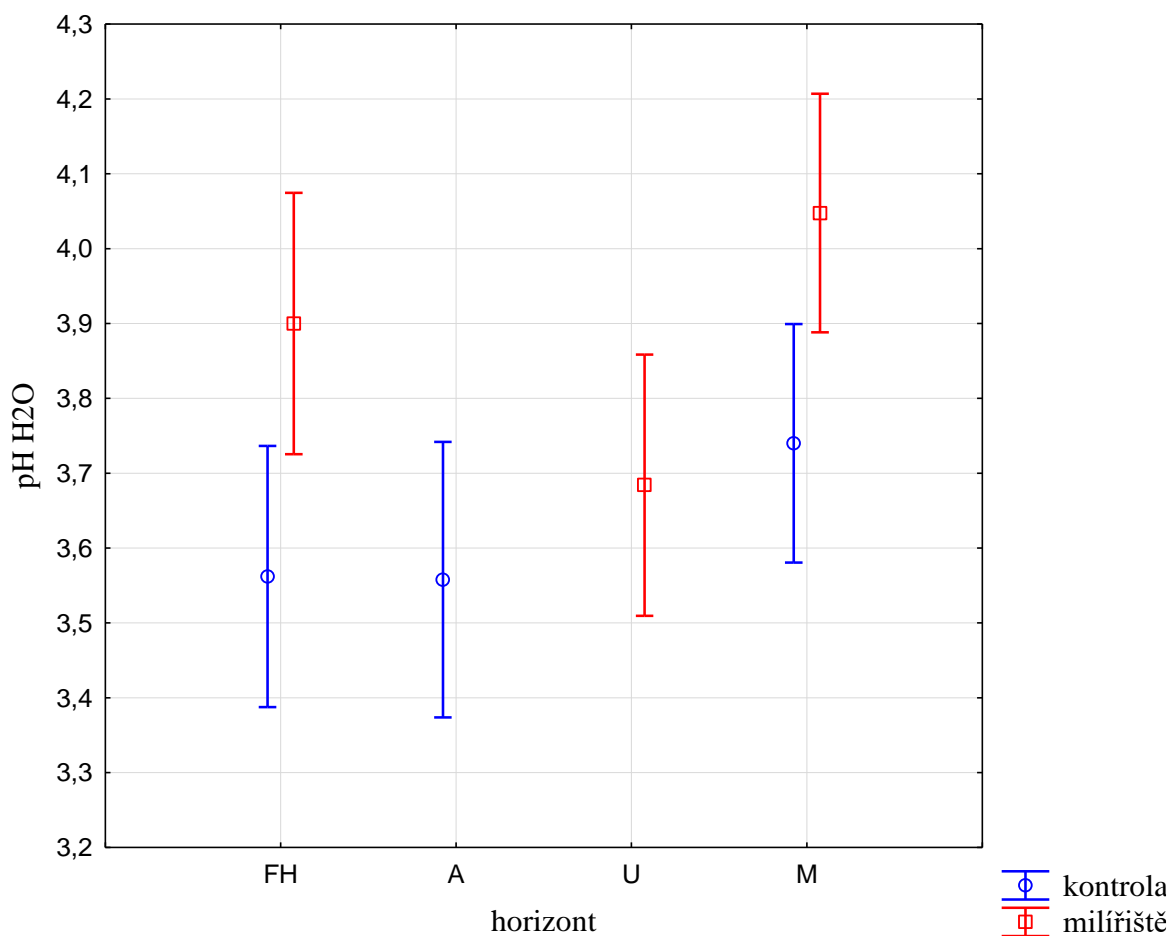
Pro zjednodušení byly zvoleny celkem 4 horizonty (FH, A, U, M). Horizont FH (fermentační + humifikační) se vyskytuje u všech milířišť a u všech kontrol. Horizont A (organominerální – humózní) se vykytuje pouze u kontroly, protože u milířišť není tento horizont pozorovatelný a půdní profil pokračuje horizontem U (uhelný). Horizont M (zde minerální) v sobě zahrnuje všechny podpovrchové minerální horizonty (B, C, přechod BC, přechody mezi horizonty B/C a půdní sediment – M, M1, M2) vyjma horizontů E a RED, které nebyly do statistiky zahrnuty, a to z důvodů, že tyto horizonty byly vzorkovány ojediněle a jsou výrazně odlišné od ostatních minerálních horizontů. Kontrolní půdy jsou značeny (K) a milířišť jsou značeny (MIL).

5 Výsledky

5.1 pH

5.1.1 pH_{H_2O}

U milíříšť je v porovnání s kontrolou vyšší pH_{H_2O} u obou porovnávaných horizontů (FH a M). U horizontu (FH) je tento rozdíl vyšší v průměru o 0,35 a u horizontu (M) v průměru o 0,3. Celkově je vyšší pH_{H_2O} u horizontu (M) v porovnání s (FH). Vzrůstající trend pH_{H_2O} je také ve srovnání horizontu (A) kontrol a (U) milíříšť, přičemž zde není statisticky významný rozdíl. Porovnání pH_{H_2O} milíříšť a kontrolních půd znázorňuje graf 1.

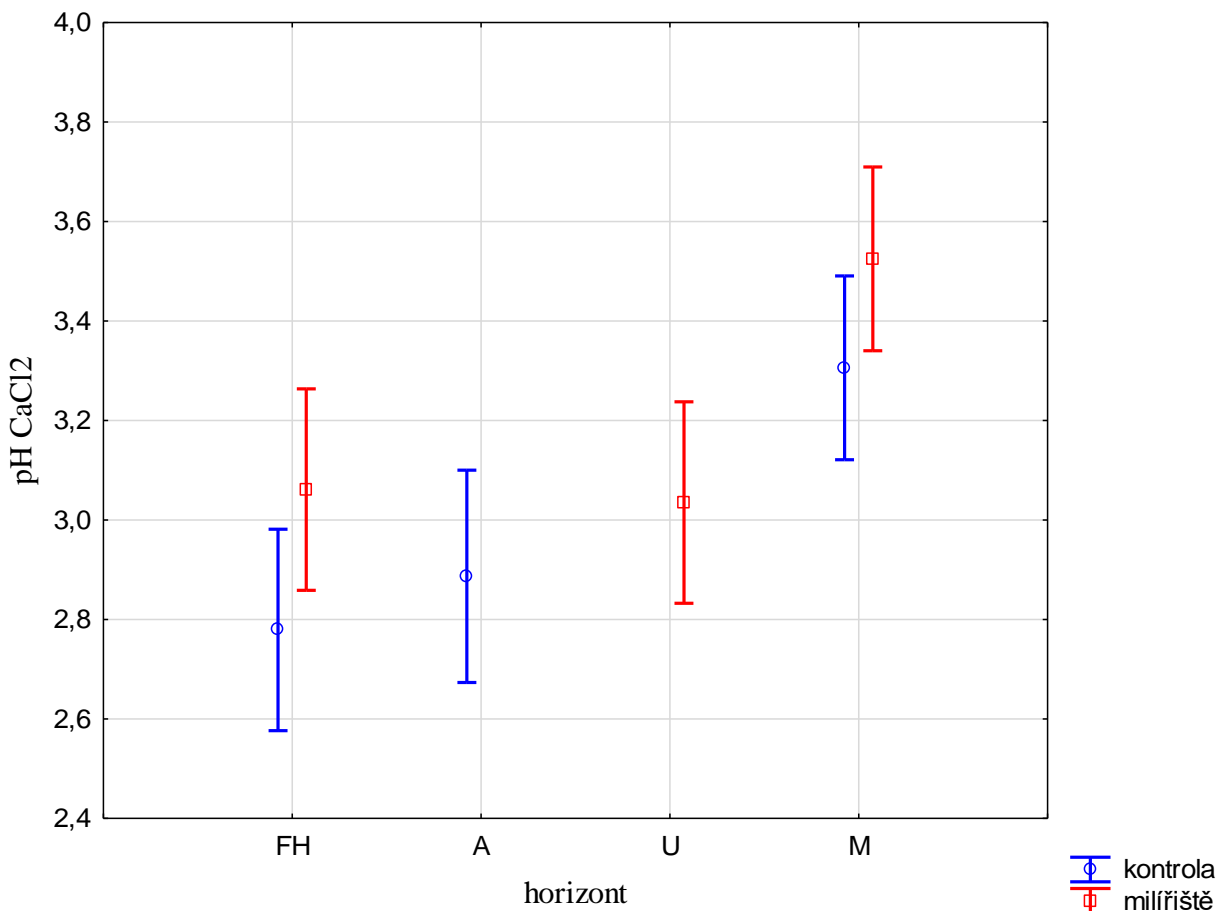


Graf 1: Porovnání pH_{H_2O} milíříšť a kontrol (průměrné hodnoty a 95 % interval spolehlivosti, $n = 63$).

5.1.2 pH_{CaCl_2}

U pH_{CaCl_2} pozorujeme stejný trend, jako u pH_{H_2O} . Horizonty milíříšť mají vyšší pH_{CaCl_2} než kontrolní půdy, rozdíly jsou v tomto případě mírně nižší než u pH_{H_2O} , horizont (FH) se liší v průměru o 0,23 a horizont (M) o 0,25. Podobný trend zaznamenáváme u horizontu (A a

U) jako u $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, statisticky nevýznamné vyšší $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, rozdíl o 0,12. Celkově je $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ nižší oproti $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$. Porovnání $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ milíříšť a kontrolních půd nalezneme v grafu 2.



Graf 2: Porovnání $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ milíříšť a kontrol (průměrné hodnoty a 95 % interval spolehlivosti, $n = 63$).

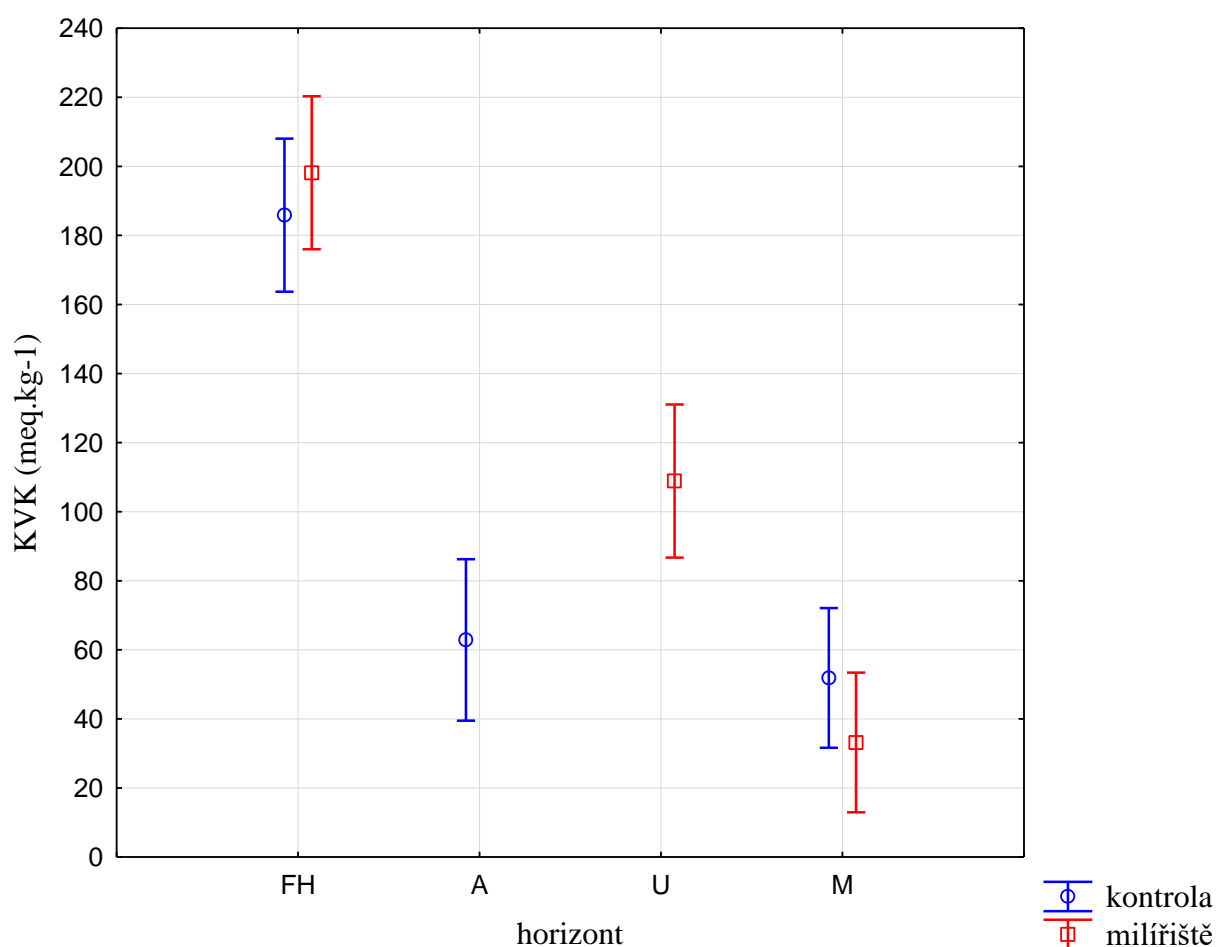
5.2 Kationtová výměnná kapacita a výměnné kationty

Kationtová výměnná kapacita je v případě milíříšť v průměru vyšší u horizontu (FH) o $12,3 \text{ meq. kg}^{-1}$ ($\text{mmol} + \text{kg}^{-1}$) v porovnání s kontrolou. U horizontu (M) pozorujeme opačný efekt, milíříště zde mají o $18,7 \text{ meq. kg}^{-1}$ nižší KVK než kontrolní půdy. Celkově je KVK u horizontu (FH) výrazně vyšší než u horizontu (M). Porovnáme-li horizont (A) kontrol s horizontem (U) milíříšť, zjistíme výrazný rozdíl v KVK o 46 meq. kg^{-1} vyšší u horizontu (U) milíříšť. Porovnání průměrných hodnot KVK kontrol a milíříšť zobrazuje graf 3.

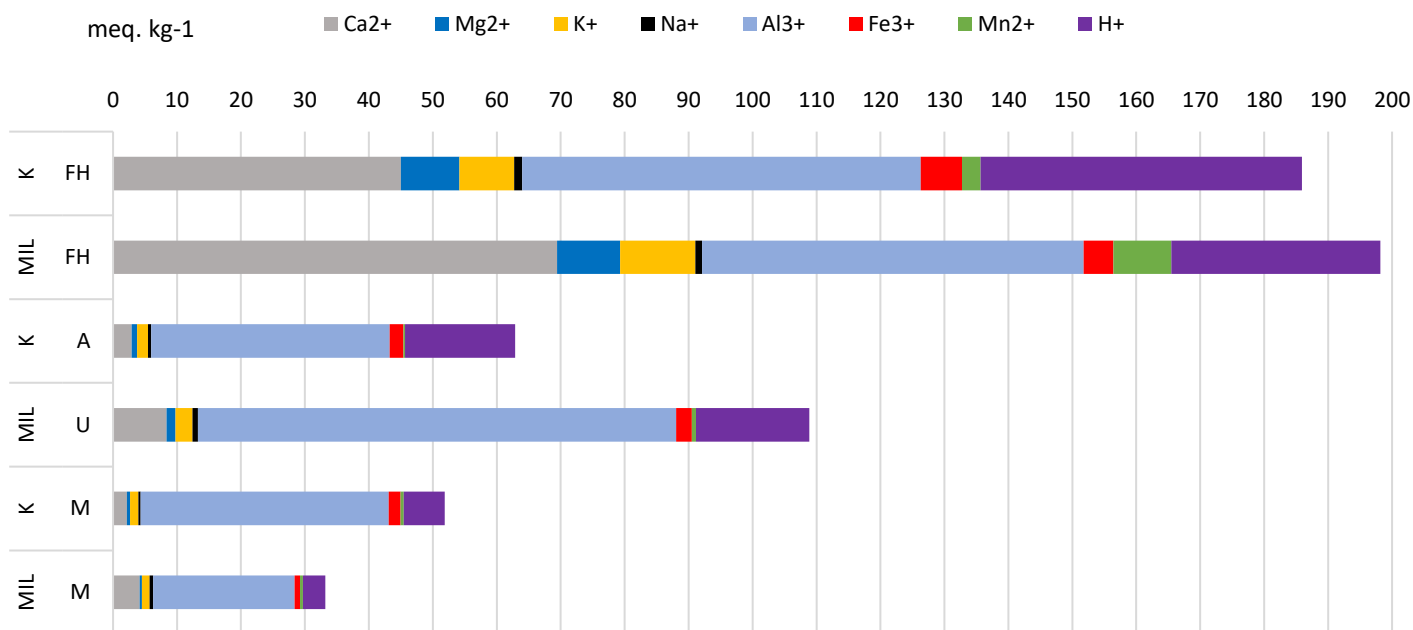
Průměrné zastoupení jednotlivých kationtů milíříšť a kontrol pak vidíme v grafu 4. Součet těchto kationtů dává celkovou průměrnou KVK. Téměř u všech horizontů, jak milíříšť, tak kontrol, je nejvyšší zastoupení kationtu Al^{3+} , pouze u horizontu (FH) u milíříšť je vyšší zastoupení Ca^{2+} . Nejvyšší zastoupení Al^{3+} najdeme u horizontu (U) u milíříšť $74,8 \text{ meq. kg}^{-1}$. Nejnižší pak u horizontu (M) u milíříšť $22,1 \text{ meq. kg}^{-1}$. Porovnání Al^{3+} milíříšť a kontrol nalezneme v grafu 7. Nejvyšší množství Ca^{2+} je u horizontu (FH) u milíříšť $69,4 \text{ meq. kg}^{-1}$, oproti tomu u kontrol nalezneme ve stejném horizontu množství 45 meq. kg^{-1} . U ostatních horizontů je množství Ca^{2+} stopové $<10 \text{ meq. kg}^{-1}$. Významné množství zaujímá také H^+ ,

který s hloubkou půdy viditelně klesá, u horizontu (FH) u kontrol dosahuje množství 50,2 meq. kg⁻¹, u stejného horizontu u milířišť 32,7 meq. kg⁻¹. U horizontu (A) kontrol a (U) milířišť dosahuje H⁺ téměř stejné hodnoty 17,2-17,7 meq. kg⁻¹. V horizontu (M) jak u kontrol, tak milířišť je H⁺ ve stopovém množství. Další kationty K⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Na⁺, Fe³⁺ se vyskytují ve stopovém množství a s hloubkou jejich množství většinou klesá.

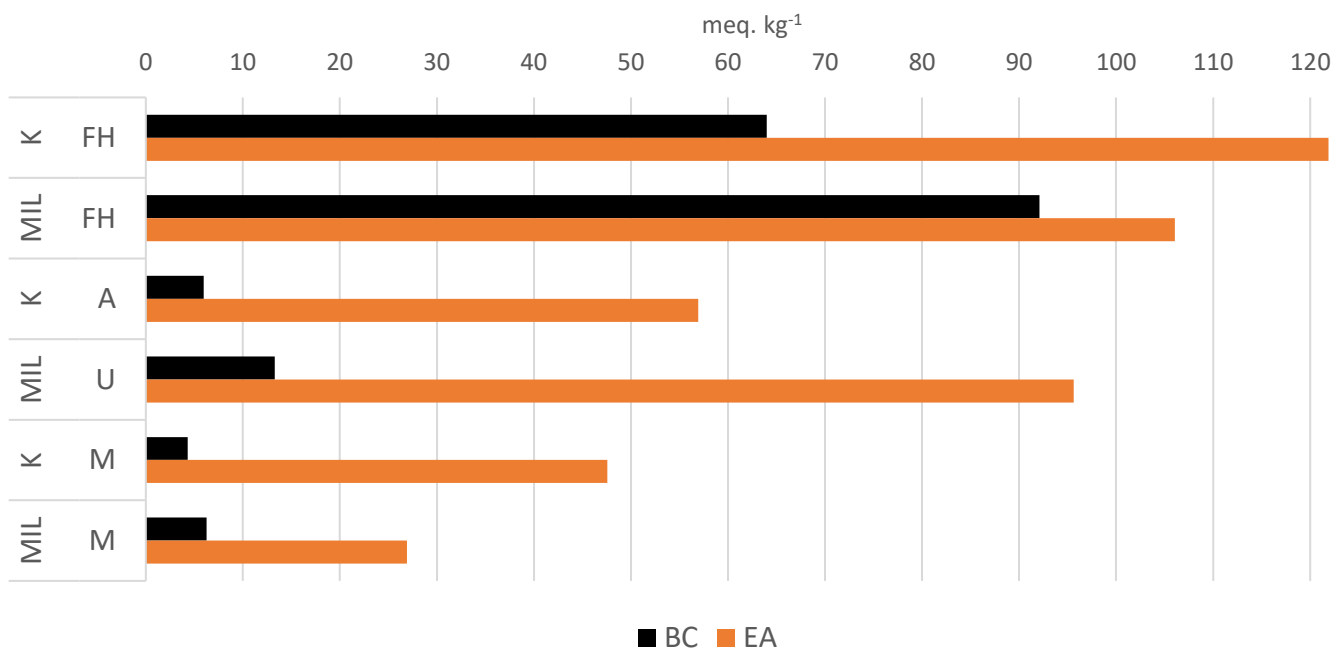
Porovnání celkového množství bazických kationtů a výměnné acidity nalezneme v grafu 5. U všech horizontů převládá výměnná acidita nad bazickými kationty (Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, Na⁺). Nicméně pokud porovnáme v pouze bazické kationty jednotlivých horizontů (FH, A, U, M) v % z celkové KVK na grafu 6, více bazických kationtů najdeme vždy u milířišť v porovnání s kontrolou. Nejvyšší množství z bazických kationtů zaujímá Ca²⁺, ostatní (K⁺, Mg²⁺, Na⁺) se vyskytují ve stopovém množství.



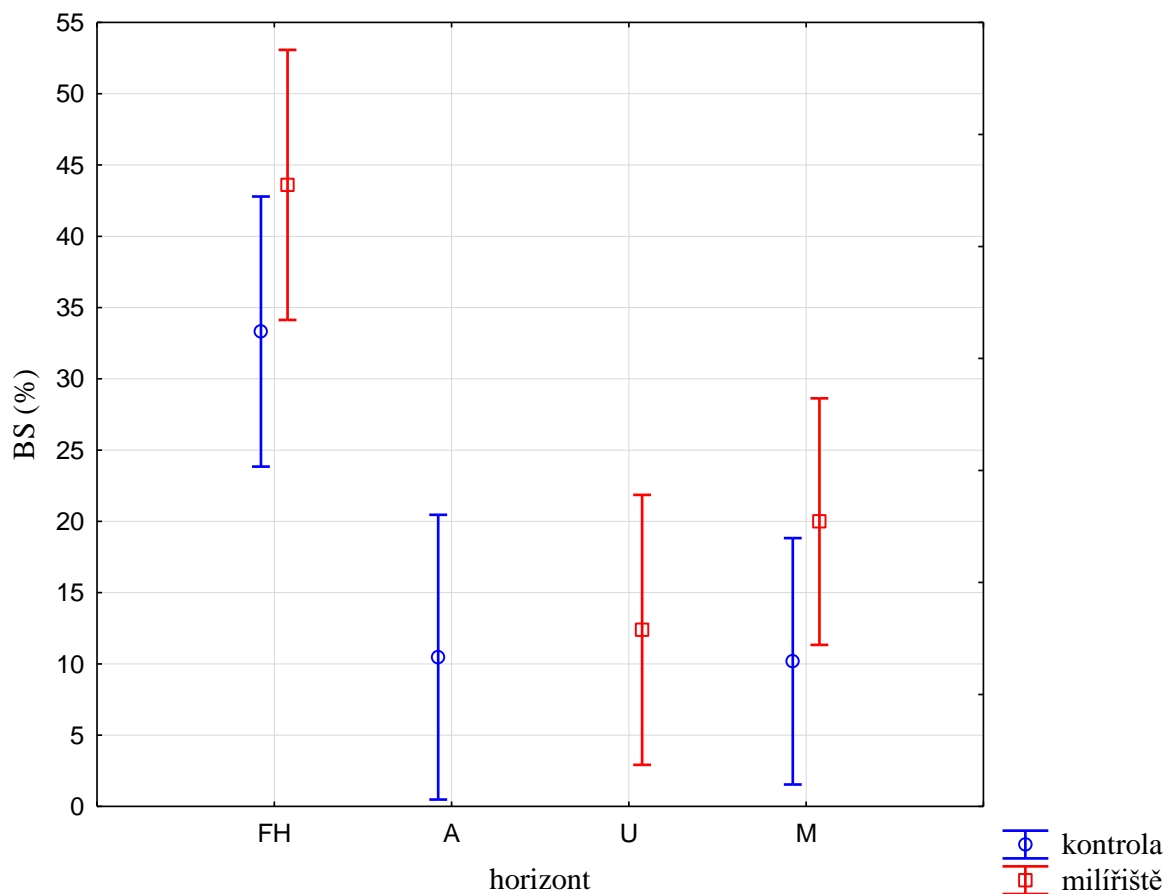
Graf 3: Porovnání KVK kontrol a milířišť v meq. kg⁻¹ (průměrné hodnoty a 95 % interval spolehlivosti, n = 63).



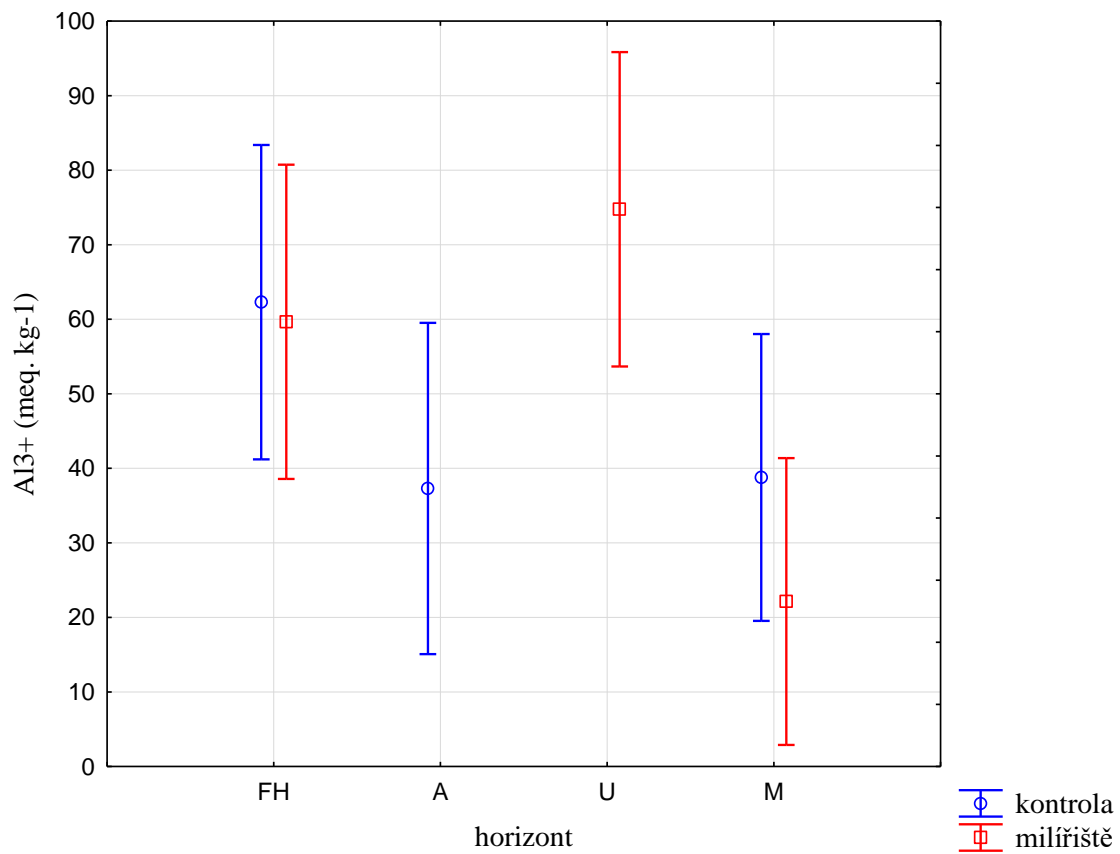
Graf 4: Zastoupení jednotlivých kationtů v horizontech milířišť a kontrol. Průměrné hodnoty v meq. kg⁻¹.



Graf 5: Průměrné hodnoty výměnné acidity (EA) a bazických kationtů (BC) v půdním profilu milířiště a kontroly v meq. kg⁻¹.



Graf 6 Nasycení sorpčního komplexu bazickými kationty (BS) v %. Porovnání milířišť a kontrol v horizontech (průměrné hodnoty a 95 % interval spolehlivosti, n = 63).



Graf 7: Koncentrace Al^{3+} v profilu milířišť a kontrol v $meq \cdot kg^{-1}$. (průměrné hodnoty a 95 % interval spolehlivosti, $n = 63$).

6 Diskuze

6.1 Klasifikace

Půdy historických milíříšť nemají jednoznačnou klasifikaci. S jistotou se však řadí mezi půdy silně ovlivněné lidskou činností, kam patří Anthrosoly a Technosoly (IUSS Working Group WRB 2015). Milíříště byly v tomto případě ovlivněny pálením dřevěného uhlí, což zahrnovalo shrabání svrchní vrstvy půdy, vyrovnání povrchu, někdy vyskládání kamenů (Carrari et al. 2017), odebrání zeminy ze svahu, navršení zeminy po svahu (Hirsch et al. 2017; Matoušek a Bobek 2017), samotné pálení dřevěného uhlí ovlivňovalo půdu i tepelně, v neposlední řadě hraje nejvýznamnější roli ponechaný popel a dřevěné uhlí. Všechny tyto aspekty vytvořené člověkem ovlivňují půdní prostředí těchto milíříšť (Hirsch et al. 2017) v našem případě cca 170 let. Faghih et al. (2019) tvrdí, že vlastnosti dřevěného uhlí mohou být stárnutím ovlivněny z důvodu podmínek prostředí, které vedou ke změnám dlouhodobých účinků dřevěného uhlí na půdu. Účinky dřevěného uhlí na půdu závisí na vlastnostech půdy, srážkách, teplotě vzduchu a lidských činnostech.

Anthrosoly jsou podle IUSS Working Group WRB (2015) definovány jako půdy dlouhodobě a intenzivně zemědělsky obhospodařované a Technosoly jako půdy obsahující značné množství artefaktů. Hirsch et al. (2017) doporučuje klasifikaci jako Technosol, protože v tomto případě dřevěné uhlí jako artefakty souvisejí s průmyslovou činností než s produktem zemědělského využití. Ale vzhledem k přítomnosti dřevěného uhlí vytvořeného člověkem je možné tyto půdy označit také jako Anthrosoly, i když téměř vždy nespĺňují, že by součet jejich vrstev, v němž by se vyskytovalo dřevěné uhlí, by byl mocný >50 cm (IUSS Working Group WRB 2015). Faghih et al. (2019) neklasifikovaly takovéto půdy jako Anthrosoly, právě z důvodu, že hloubka půdy ovlivněná produkcí dřevěného uhlí nebyla >50 cm. Jako Technosoly však tyto půdy také nelze jednoznačně klasifikovat, protože neobsahují souvislou, velmi málo propustnou až nepropustnou vrstvu (IUSS Working Group WRB 2015).

Pokud zařadíme milíříště do Pretických Antrosolů podle IUSS Working Group WRB (2015), pretic horizont je minerální povrchový horizont, který je výsledkem lidské činnosti, včetně přídavku dřevěného uhlí. Charakteristická je tmavá barva, přítomnost artefaktů (fragменты keramiky, kamenných, kostěných či mušlových nástrojů) a vysoký obsah organického uhlíku, fosforu, vápníku, hořčíku a stopových prvků (zejména zinku a manganu), obvykle kontrastující s přírodními půdami v blízkém okolí. Typicky rovněž obsahuje viditelné zbytky dřevěného uhlí. Typickým zástupcem jsou zde půdy *terra preta* a jí podobné půdy. Na grafu 4 můžeme vidět, že naše milíříště mají zvýšený obsah vápníku a stopového prvku manganu. Uhelný horizont s dřevěným uhlím dosahuje od 4–30 cm v námi sledované lokalitě Brdy. Pretické Antrosoly jsou však nejbližší ke klasifikaci milíříšť, proto by bylo vhodné zvolit tuto klasifikaci.

6.2 Acidita

Biouhel má schopnost zvyšovat pH půdy. Tento efekt je pravděpodobně způsoben tím, že biouhel obsahuje vysoké množství alkalických kovů (základních kationtů – Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+}), což přispívá k neutralizaci půdní kyselosti (Novak et al. 2009). Také se na povrchu biouhlu

tvoří záporně nabitě funkční skupiny, což zvyšuje adsorpční kapacitu kationtů (Gaskin et al. 2008; Atkinson et al. 2010). Z tohoto důvodu mají nejspíš naše zájmové milířiště vyšší pH, než kontrolní půdy, i když to v porovnání s některými autory není tak výrazné zvýšení. Například Hirsch et al. (2017) zkoumali půdy historických milířišť v Connecticutu ve Spojených státech. U milířišť se zde pohybovalo pH od 4,07 do 4,63 a referenční půdy měli pH od 3,32 do 4,19. Faghieh et al. (2019) v mírných oblastech severního Íránu naměřili cca o 0,5 jednotek vyšší pH u milířišť oproti kontrolním půdám. Podobné zvýšení pH jako naše zájmové milířiště (0,23–0,25) měli Hardy et al. (2016) ve Valonsku v Belgii o 0,2–0,4 jednotky vyšší pH u milířiště oproti referenční půdě, avšak když změřili pH krátce po výrobě dřevěného uhlí, naměřili až o 2,8 vyšší pH díky vysokému obsahu bazických kationtů. Účinek ponechaného dřevěného uhlí s popelem na zvýšení pH půdy má tendenci s časem zeslabovat díky vyluhování bazických kationtů do podloží. Avšak tento efekt je patrný i po jednom, či dvou stoletích, ale již v menší míře. Na vápenatých kambisolech Hardy et al. (2016) zjistili, že pH zkoumaných milířišť se buďto neměnilo nebo naopak bylo nižší než v referenčních půdách. Všichni tito autoři však zkoumali výhradně v listnatých lesích, oproti naší zájmové lokalitě, kde se vyskytuje pouze jehličnatý porost a rovněž je zde i extrémně chudé podloží v podobě křemenců, proto může být naše pH oproti ostatním autorům celkově nižší. U půd terra preta a jí podobným půdám lze nalézt výrazně vyšší pH než u jejich kontrolních půd. Je však nutné podotknout, že tyto půdy se většinou vyskytují v jiných klimatických pásmech s úplně odlišnými podmínkami a jinou tvorbou vzniku. Oproti milířištím na půdu terra preta a jí podobným půdám byl většinou přidáván nejen biouhel, ale i jiné organické materiály (hnůj, rostlinné zbytky, kosti a další) (Glaser 2007). Také stáří těchto půd je o mnoho vyšší než půd historických milířišť, například terra preta mezi 60-1640 n. l. (Heckerberger et al. 2003) a 2500-500 př. n. l. (Neves et al. 2003). Naše zkoumané milířiště jsou staré přibližně 170 let. Proto nelze jednoznačně srovnávat půdy terra preta a jí podobné s půdami historických milířišť. Je však možné zde hledat inspiraci. Např. u půdy terra preta v Amazonii bylo pH vyšší oproti kontrolním půdám o 1,4 jednotky i více (Glaser et al. 2000), Nordic Dark Earth v Severním Německu o 1,2–1,4 jednotky pH (Wiedner et al. 2015), Terra Preta Australis v Jihovýchodní Austrálii o 1,3 jednotky pH (Downie et al. 2011), stejně tak African Dark Earths o 1,3 jednotky pH (Solomon et al. 2016) a půdy Sambaquis v Brazílii rozdíl o 2,6 jednotek pH. Půdy Sambaquis mají ale takto vysoký rozdíl v pH kvůli vysokému obsahu schránek měkýšů, které jsou bohaté na CaCO_3 , (Kern et al. 2019). Protože je biouhel většinou alkalické povahy (Zhang et al. 2021), přispívá k vyššímu pH půdy, a tím pádem i k nižší rozpustnosti Al^{3+} (Falcao et al. 2009). Hliník je potenciálně rizikový prvek, který se v horninách a půdách běžně vyskytuje, je to třetí nejrozšířenější prvek v litosféře. Pokud ale půdy nejsou okyseleny, vyskytuje se ve formě nerozpustných sloučenin, které nejsou škodlivé, protože je organismy nedokážou přijmout. Jakmile se ale půdní prostředí okyselí, hliník se velmi rychle rozpouští. Pokud kyselost klesne, rychle se opět sráží do nerozpustných sloučenin. S hloubkou půdy přirozeně množství Al^{3+} klesá, protože klesá i KVK, a naopak s hloubkou půdy stoupá pH a tím může být Al^{3+} méně rozpustné (Hruška 2020). Z grafu 7, kde je porovnávána koncentrace Al^{3+} je vidět, že se vyšší množství Al^{3+} vyskytuje právě u kontrolních půd v horizontech (FH a M). Statisticky významné snížení u milířišť je však pouze u horizontu M. Nižší koncentrace Al^{3+} u milířišť může být způsobena z důvodu mírně vyššího pH u milířišť. Celkově je ale koncentrace Al^{3+} ve všech horizontech velmi

vysoká právě z důvodu velmi kyselého prostředí, $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ v horizontu FH bylo cca v průměru u kontrolní půdy 2,8 a u milířiště 3.

6.3 Kationtová výměnná kapacita

Kationtová výměnná kapacita je důležitým ukazatelem schopnosti půd poutat živiny, ale i rizikové prvky (Sáňka, Materna 2004). Půdy s vysokou KVK pravděpodobněji adsorbují bazické kationty, což může účinně zlepšit využití iontů v půdě a snížit ztrátu živin (Liang et al. 2006). Z grafu 3 bylo vidět, že KVK byla na našich zkoumaných milířištích vyšší oproti kontrolním půdám u horizontu FH a také u horizontu U v porovnání s horizontem A. Hardy et al. (2016) píše o tom, že krátce po pyrolýze a obohacení půdy o dřevěné uhlí měla půda milířišť nízkou KVK oproti >150 let starému milířišti, kde byla KVK vyšší. V průběhu času se KVK značně zvyšuje díky oksidování povrchu částic dřevěného uhlí. Borchard et al. (2014) zkoumali stará místa po pálení uhlí v Německu a nezjistili žádnou významnou změnu v KVK na těchto místech a přilehlých půdách. Faghih et al. (2019) měli na místech pálení dřevěného uhlí v hloubce půdy 0-20 cm KVK přibližně $59 \text{ cmol} + \text{kg}^{-1}$ a referenčních půdách $44,5 \text{ cmol} + \text{kg}^{-1}$ to je rozdíl $15,5 \text{ cmol} + \text{kg}^{-1}$, nárůst celkem o 35 %. Oproti naší zájmové lokalitě, kde je nárůst v KVK přibližně o 7,5 % v horizontu FH, ale když bychom porovnali horizont A kontroly s horizontem U milířiště, je to nárůst v KVK o 70 %. *Terra preta* v profilu 0–10 cm ve srovnání se sousedním oxisolem měla KVK vyšší o $13,3 \text{ cmol} + \text{kg}^{-1}$ a v hloubce 30–40 cm došlo také k výraznému rozdílu o $9,0 \text{ cmol} + \text{kg}^{-1}$ (Glaser et al. 2000). Kationtová výměnná kapacita u *Terra Preta Australis* v hloubce půdy 20-30 cm byla oproti okolím půdám vyšší o $31,2 \text{ cmol} + \text{kg}^{-1}$ (Downie et al. 2011). Kationtová výměnná kapacita byla u *African Dark Earths* byla 1,4–3,6x vyšší než v okolní půdě s hodnoty 9–18 $\text{cmol} + \text{kg}^{-1}$.

Na grafu 5 bylo znázorněno, že pokud se zaměříme pouze na bazické kationty a porovnáme jednotlivé horizonty milířišť a kontrol, vyšší zastoupení najdeme u milířišť oproti kontrolám. Ponechaný biouhel, zde dřevěné uhlí, většinou obsahuje více bazických kationtů, a proto můžeme v horizontech milířišť najít jejich vyšší zastoupení (Hardy et al. 2016).

6.4 Potenciál milířišť

Milířiště představují dlouhodobý pokus s biouhlem trvající většinou více jak 170 let. Převážně se vyskytují v lesních půdách a pokud jsou milířiště umístěné ve chráněné lokalitě nebo tam, kde ještě neprobíhala těžba, nejsou téměř dotčeny a vlastnosti těchto půd ovlivňuje pouze biouhel, zde dřevěné uhlí. Oproti půdám *terra preta* a jí podobným půdám, kde vlastnosti půdy ovlivňuje biouhel a organická hmota a většinou i jejich kultivace a jiné. Nevýhodou milířišť však může být extrapolace výsledků na zemědělské půdy, které jsou na rozdíl od milířišť kultivovány, hnojeny a celkově je na zemědělských půdách jiné prostředí (pH, druh půdy, matečná hornina, vlhkost, srážky, teplota, plodina a jiné).

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo stanovit základní chemické vlastnosti vybraných půd milířišť Brd. Posoudit vliv historického biocharu na půdní prostředí a porovnat s půdami bez vlivu biocharu. Potvrdilo se, že na takto uloženém biocharu přibližně 170 let, lze sledovat změnu chemických vlastností a ovlivnění půdního prostředí.

Hodnoty pH půdy milířišť byly oproti kontrolním půdám mírně zvýšeny ve všech sledovaných horizontech z důvodu ponechání biouhlu.

Zvýšení pH u milířišť má pravděpodobně za následek snížení rozpustnosti Al^{3+} a tím pádem jeho menší koncentraci v půdách milířišť v horizontech (FH a M) oproti půdám kontrolním. Statisticky významný rozdíl je ale pouze u horizontu M (minerální).

Kationtová výměnná kapacita milířišť byla u horizontu FH (fermentační s humifikačním) zvýšena. Naopak nižší kationtovou výměnnou kapacitu měli milířiště u horizontu M oproti kontrolám.

Nasycení sorpčního komplexu bázemi bylo u všech jednotlivě sledovaných horizontů vyšší u milířišť než u kontrolních půd, avšak statisticky významné bylo pouze u horizontu FH a M.

Významný rozdíl je v množství Ca^{2+} u horizontu (FH) u milířišť $69,4 \text{ meq. kg}^{-1}$, oproti kontrolním půdám, kde nalezneme ve stejném horizontu (FH) množství 45 meq. kg^{-1} . U ostatních horizontů je množství Ca^{2+} nižší $<10 \text{ meq. kg}^{-1}$, avšak vždy vyšší u milířišť oproti kontrolám.

8 Literatura

- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JDM, Sparovek G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, **22.6**: 711-728.
- ArcGis. Mapa klimatu, klimatické oblasti. Dostupné z: <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?layers=4a8650ca71524c1aaa57995c742578b7>
- Atkinson CJ, Fitzgerald JD, Hipps NA. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and soil*, **337.1**: 1-18.
- Julierme Zimmer Barbosa, Antônio Carlos Vargas Motta, Rodrigo Studart Corrêa, Vander de Freitas Melo, Aleksander Westphal Muniz, Gilvan Coimbra Martins, Lucas de Carvalho Ramos Silva, Wenceslau Geraldes Teixeira, Scott D. Young, Martin R. Broadley. 2020. Elemental signatures of an Amazonian Dark Earth as result of its formation process. *Geoderma*, **361**: 114085.
- Barrow CJ. 2012. Biochar: potential for countering land degradation and for improving agriculture. *Applied Geography*, **34**: 21-28.
- Borchard N, Ladd B, Eschemann S, Hegenberg D, Möselers BM, Amelung W. 2014. Black carbon and soil properties at historical charcoal production sites in Germany. *Geoderma*, **232**: 236-242.
- Bonhage A, et al. 2020. Long term anthropogenic enrichment of soil organic matter stocks in forest soils—detecting a legacy of historical charcoal production. *Forest Ecology and Management*, **459**: 117814.
- Břendová K, a spol. 2015. Využití biouhlí (biocharu) k úpravě půdních vlastností. *Biom. cz.*
- Carrari E, et al. 2017. The old charcoal kiln sites in Central Italian forest landscapes. *Quaternary International*, **458**: 214-223.
- Cools N, De Vos B. 2016. Part X: sampling and analysis of soil. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. *Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany*, 115.
- Cyrus M, Matoušek V. 2009. Lhota 2007—Experimentální pálení milíře tradiční technologií. *Archeologia technica*, **20**: 54-60.

- ČHMÚ. Dlouhodobý průměr 1981–2010 pro průměrnou roční teplotu vzduchu a průměrné roční srážky. Dostupné z <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mapy-charakteristik-klimatu>
- Dai Z, et al. 2017. Potential role of biochars in decreasing soil acidification-a critical review. *Science of the Total Environment*, **581**: 601-611.
- Downie AE, et al. 2011. Terra Preta Australis: Reassessing the carbon storage capacity of temperate soils. *Agriculture, ecosystems & environment*, **140.1-2**: 137-147.
- Faghieh F, Emadi M, Sadegh-Zadeh F, Mohammad Ali B. 2019. Long-term charcoal-induced changes to soil properties in temperate regions of northern Iran. *Journal of Forestry Research*. **30**, 1063–1071
- Falcão NPS, et al. 2009. Pedology, fertility, and biology of central Amazonian Dark Earths. In: *Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision*. Springer, Dordrecht, p. 213-228.
- Fletcher AJ, et al. 2014. Production factors controlling the physical characteristics of biochar derived from phytoremediation willow for agricultural applications. *BioEnergy Research*, **7.1**: 371-380.
- Ganie MA, et al. 2015. Biochar for sustainable soil health: a review of prospects and concerns. *Pedosphere*, **25.5**: 639-653.
- Gaskin JW, Steiner C, Harris K, Das KC, Bibens B. 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the ASABE*, **51.6**: 2061-2069
- Giani L, Makowsky L, Mueller K. 2014. Plaggic Anthrosol: Soil of the Year 2013 in Germany: An overview on its formation, distribution, classification, soil function and threats. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **177.3**: 320-329.
- Glaser B, et al. 2000. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. *Organic Geochemistry*, **31.7-8**: 669-678.
- Glaser B, et al. 2001. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, **88.1**: 37-41.
- Glaser B, 2007. Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **362**(1478): 187-196.
- Glaser B, Knorr KH. 2008. Isotopic Evidence for Condensed Aromatics From Non-Pyrogenic Sources in Soils--Implications for Current Methods for Quantifying Soil Black Carbon. *Rapid communications in mass spectrometry: RCM*, **22.7**: 935-942.

- Glaser B, Birk JJ. 2012. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). *Geochimica et Cosmochimica acta*, **82**: 39-51.
- Glaser B. 2014. From Molecular to Ecosystem Level Using Terra Preta and Biochar as Examples. *Agroecology, Ecosystems, and Sustainability*, **20**: 1.
- Hardy B, et al. 2016. The effect of pre-industrial charcoal kilns on chemical properties of forest soil of Wallonia, Belgium. *European Journal of Soil Science*, **67.2**: 206-216.
- Heckenberger MJ, et al. 2003. Amazonia 1492: pristine forest or cultural parkland? *Science*, **301.5640**: 1710-1714.
- Hirsch F, et al. 2017. Soils on historic charcoal hearths: Terminology and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal*, **81.6**: 1427-1435.
- Hruška J, Cienciala E, Moravčík P, Navrátil T, Hofmeister J. 2001. Dlouhodobá degradace a nutriční acidifikace lesních půd. *Lesnická práce č. 12/01. Ročník 80 (2001)*.
- Hruška J, Oulehle F, Chuman T. 2020. Acidifikace lesních půd jako přetrvávající dědictví „špinavého“ 20. století. *Fórum ochrany přírody 03/2020*.
- Hubbe A, et al. 2007. Evidence of plaggen soils in European North Russia (Arkhangelsk region). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **170.3**: 329-334.
- Kadera J. 2014. Technologie výroby dřevěného uhlí pod nestabilním příkrovem. *Archeologia technica* **25**: 40–48.
- Kambo HS, Dutta A. 2015. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **45**: 359-378.
- Kern DC, et al. 2003. Distribution of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. In: Lehmann J, Kern DC, Glaser B, Wados WI (eds) *Amazonian Dark Earths*. Springer, Dordrecht.
- Kern J, et al. 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.
- Kim JS, et al. 2007. Bacterial diversity of terra preta and pristine forest soil from the Western Amazon. *Soil Biology and Biochemistry*, **39.2**: 684-690.
- Kočica a spol. 2004. Vlastnosti biomasy jako paliva. *Lesnická práce. Ročník 83, číslo 3/04*. Dostupné z <http://www.lesprace.cz/casopis-lesnicka-prace-archiv/rocnik-83-2004/lesnicka-prace-c-3-04/vlastnosti-biomasy-jako-paliva>
- Kořan J. 1946. Staré české železářství. *Práce*.

- Kumar A, Saini K, Bhaskar T. 2020. Hydrochar and biochar: Production, physicochemical properties and techno-economic analysis. *Bioresource technology*, 123442.
- Kuzyakov Y, et al. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41.2**: 210-219.
- Li Y, et al. 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.
- Liang B, et al. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, **70.5**: 1719-1730.
- Lima H, et al. 2002. Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian black earth”) of Western Amazonia. *Geoderma* **110**: 1-17.
- Lehmann J, et al. 2003. Soil fertility and production potential. In: *Amazonian dark earths*. Springer, Dordrecht, p. 105-124.
- Lehmann J, et al. 2011. Biochar effects on soil biota—a review. *Soil biology and biochemistry*, **43.9**: 1812-1836.
- Lehmann J, Joseph S (ed.). 2015. Biochar for environmental management: science, technology and implementation. *Routledge*.
- Ludemann T. 2010. Past fuel wood exploitation and natural forest vegetation in the Black Forest, the Vosges and neighbouring regions in western Central Europe. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **291.1-2**: 154-165.
- Luo Ch, et al. 2020. Effect of biochar on soil properties on the Loess Plateau: Results from field experiments. *Geoderma*, **369**: 114323.
- Madari BE, et al. 2017. Properties of a sandy clay loam Haplic Ferralsol and soybean grain yield in a five-year field trial as affected by biochar amendment. *Geoderma*, **305**: 100-112.
- Mary B, et al. 1996. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. *Plant and soil*, **181.1**: 71-82.
- Matoušek V., Bobek P. 2017. Mokřinka a Čenkov-Komorsko. Srovnání výsledků systematického mezioborového studia pozůstatků pálení dřevěného uhlí na Křivoklátsku a v Brdech. *Archeologie ve středních Čechách*. **21**. 425-435.
- Matějka K. 2005, Information and data systems. Mapy přírodních podmínek horských a podhorských lesních oblastí. Dostupné z <https://www.infodatasys.cz/lesnioblasti/07.htm>
- mistopis.eu. 2008. Svatá Dobrotivá. Dostupné z http://www.mistopis.eu/mistopiscr/podbrdsko/horovicko/svata_dobrotiva.htm

- Mumme J, et al. 2011. Hydrothermal carbonization of anaerobically digested maize silage. *Bioresource technology*, **102.19**: 9255-9260.
- Novak JM, et al. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil science*, **174.2**: 105-112.
- Sáňka M, Materna J. 2004. Indikátory kvality zemědělských a lesních půd ČR. Ministerstvo životního prostředí.
- Schnepel C, et al. 2014. Evidence of plaggen soils in SW Norway. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **177.4**: 638-645.
- Schmidt MJ, et al. 2014. Dark earths and the human built landscape in Amazonia: a widespread pattern of anthrosol formation. *Journal of archaeological science*, **42**: 152-165.
- Solomon D, et al. 2016. Indigenous African soil enrichment as a climate-smart sustainable agriculture alternative. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **14.2**: 71-76.
- Sombroek W, et al. 2002. Terra preta and terra mulata: pre-columbian Amazon Kitchen middens and agricultural fields, their sustainability and their replication. In: *Embrapa Amazônia Oriental-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: SYMPOSIUM ANTHROPOGENIC FACTORS OF SOIL FORMATION, 18.; WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 17., Bangkok. Trabalho apresentado... Bangkok
- Ok YS, et al., eds. 2015. Biochar: Production, characterization, and applications. *CRC press*.
- Palace MW, et al. 2017. Ancient Amazonian populations left lasting impacts on forest structure. *Ecosphere*, **8.12**: e02035.
- Qambrani NA, et al. 2017. Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **79**: 255-273.
- Ren X, et al. 2018. Effect of aging in field soil on biochar's properties and its sorption capacity. *Environmental Pollution*, **242**: 1880-1886.
- Taghizadeh-Toosi A, et al. 2012. Biochar adsorbed ammonia is bioavailable. *Plant and soil*, **350.1**: 57-69.
- Tan Z, et al. 2017. Returning biochar to fields: A review. *Applied Soil Ecology*, **116**: 1-11.
- Wang QK, et al. 2005. Active soil organic matter and its relationship with soil quality. *Acta Ecologica Sinica*, **25.3**: 513-519.

- Wang T, et al. 2018. A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: Process conditions, fundamentals, and physicochemical properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **90**: 223-247.
- Wang J, et al. 2021. Analysis of the long-term effectiveness of biochar immobilization remediation on heavy metal contaminated soil and the potential environmental factors weakening the remediation effect: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **207**: 111261.
- Weber K, Quicker P. 2018. Properties of biochar. *Fuel*, **217**: 240-261.
- Wiedner K, et al. 2015. Anthropogenic dark earth in northern Germany—The nordic analogue to terra preta de indio in Amazonia. *Catena*, **132**: 114-125.
- Weatherzone. 2021. Australia climate. Echuca long term average. Dostupné z <https://www.weatherzone.com.au/climate/station.jsp?lt=site&lc=80015>
- IUSS Working group WRB. 2015 World reference base for soil resources 2014, update 2015: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. <https://pedologie.czu.cz/dokumenty/WRB2014.pdf>
- Yang H, et al. 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, **86.12-13**: 1781-1788.
- Yang CD, Lu SG. 2021. Effects of five different biochars on aggregation, water retention and mechanical properties of paddy soil: A field experiment of three-season crops. *Soil and Tillage Research*, **205**: 104798.
- Zhang Y, Wang J, Feng Y. 2021. The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: A review. *CATENA*, **202**: 105284.
- Zwieten VL, et al. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and soil*, **327.1**: 235-246.

9 Seznam použitých zkratek a symbolů

AfDE – African Dark Earth

BC – saturace báží

EA – výměnná acidita

HTC – hydrotermální karbonizace

KVK – kationtová výměnná kapacita

SOM – půdní organická hmota

NDE – Nordic Dark Earth

PAH – polycyklické aromatické uhlovodíky

pH_{CaCl2} – výměnné pH

pH_{H2O} – aktivní pH

TPA – *Terra Preta Australis*

TOC – celkový organický uhlík

10 Samostatné přílohy

Příloha 1: Tabulka vzorků a jejich pH (lokalita Brdy).

LES	Č.	Stanoviště	horizont	vzorek	číslo	porost	pHH ₂ O	pHCaCl ₂	pHBaCl ₂
BR	1	K	FH	BR 1 K FH	501	Smrk	3,61	2,81	2,48
BR	1	K	A	BR 1 K A	502	Smrk	3,53	2,86	2,88
BR	1	K	E	BR 1 K E	503	Smrk	3,5	2,98	3,05
BR	1	K	B	BR 1 K B	504	Smrk	3,72	3,47	3,47
BR	1	M	FH	BR 1 M FH	505	Smrk	4,71	3,95	3,49
BR	1	M	U	BR 1 M U	506	Smrk	3,99	3,26	3,07
BR	1	M	C	BR 1 M C	507	Smrk	4,17	3,72	3,62
BR	2	K	FH	BR 2 K FH	508	Smrk	3,44	2,68	2,33
BR	2	K	E	BR 2 K E	510	Smrk	3,64	3	3,3
BR	2	K	B	BR 2 K B	511	Smrk	3,5	2,98	3,18
BR	2	M	FH	BR 2 M FH	512	Smrk	3,53	2,8	2,47
BR	2	M	U	BR 2 M U	513	Smrk	3,52	2,79	2,65
BR	2	M	BC	BR 2 M BC	514	Smrk	4,95	4,15	3,79
BR	3	K	FH	BR 3 K FH	515	Smrk	3,33	2,61	2,27
BR	3	K	A	BR 3 K A	516	Smrk	3,52	2,57	2,59
BR	3	K	E	BR 3 K E	517	Smrk	3,52	2,76	3,01
BR	3	K	B	BR 3 K B	518	Smrk	3,61	2,79	2,97
BR	3	M	FH	BR 3 M FH	519	Smrk	3,27	2,55	2,2
BR	3	M	U	BR 3 M U	520	Smrk	3,41	2,73	2,56
BR	3	M	E	BR 3 M E	521	Smrk	3,67	3,27	3,27
BR	3	M	B	BR 3 M B	522	Smrk	4,15	3,73	3,67
BR	4	K	FH	BR 4 K FH	523	Smrk	3,79	2,77	2,42
BR	4	K	A	BR 4 K A	524	Smrk	3,5	2,71	2,87
BR	4	K	C	BR 4 K C	525	Smrk	3,57	2,94	3,12
BR	4	M	FH	BR 4 M FH	526	Smrk	4,04	3,03	2,87
BR	4	M	U	BR 4 M U	527	Smrk	3,71	3,08	3,02
BR	4	M	Přechod	BR 4 M přechod	528	Smrk	3,77	3,18	3,34
BR	4	M	C	BR 4 M C	529	Smrk	3,93	3,36	3,53
BR	5	K	FH	BR 5 K FH	530	Smrk	3,31	2,52	2,18
BR	5	K	A	BR 5 K A	531	Smrk	3,51	2,71	2,83
BR	5	K	E	BR 5 K E	532	Smrk	3,59	2,99	3,26
BR	5	K	B	BR 5 K B	533	Smrk	3,61	3,27	3,32
BR	5	M	FH	BR 5 M FH	534	Smrk	3,7	2,82	2,47
BR	5	M	U	BR 5 M U	535	Smrk	3,82	3,06	3
BR	5	M	C	BR 5 M C	536	Smrk	4,1	3,47	3,56
BR	6	K	FH	BR 6 K FH	537	Smrk	3,41	2,6	2,27
BR	6	K	A	BR 6 K A	538	Smrk	3,49	2,67	2,8
BR	6	K	C	BR 6 K C	539	Smrk	3,71	2,98	3,3

BR	6	M	FH	BR 6 M FH	540	Smrk	3,33	2,64	2,41
BR	6	M	U	BR 6 M U	541	Smrk	3,64	2,88	2,89
BR	6	M	E	BR 6 M E	542	Smrk	4,01	3,43	3,6
BR	6	M	BC	BR 6 M BC	543	Smrk	3,84	2,98	3,61
BR	7	K	FH	BR 7 K FH	544	Smrk	3,64	2,91	2,77
BR	7	K	A	BR 7 K A	545	Smrk	3,54	2,86	3,03
BR	7	K	M	BR 7 K M	546	Smrk	3,68	2,99	3,29
BR	7	M	FH	BR 7 M FH	547	Smrk	4,16	3,02	2,75
BR	7	M	A	BR 7 M A	548	Smrk	3,58	2,93	2,92
BR	7	M	M1	BR 7 M M1	549	Smrk	3,74	3,36	3,45
BR	7	M	U	BR 7 M U	550	Smrk	3,84	3,25	3,2
BR	7	M	M2	BR 7 M M2	551	Smrk	4,06	3,48	3,56
BR	9	K	FH	BR 9 K FH	552	Smrk	3,62	2,88	2,68
BR	9	K	A	BR 9 K Ahe	553	Smrk	3,41	2,88	2,91
BR	9	K	E	BR 9 K Ew	554	Smrk	3,76	3,32	3,43
BR	9	K	B	BR 9 K Bm	555	Smrk	3,86	3,69	3,73
BR	9	M	FH	BR 9 M FH	556	Smrk	3,94	3,17	3,04
BR	9	M	U	BR 9 M U	557	Smrk	3,73	3,29	3,26
BR	9	M	RED	BR 9 M RED	558	Smrk	3,79	3,41	3,47
BR	9	M	C	BR 9 M Cg	559	Smrk	3,82	3,45	3,54
BR	10	K	FH	BR 10 K FH	560	Smrk	3,96	3,25	3,07
BR	10	K	A	BR 10 K A	561	Smrk	3,87	3,42	3,35
BR	10	K	B	BR 10 K B	562	Smrk	4	3,67	3,61
BR	10	K	C	BR 10 K C	563	Smrk	4,13	3,85	3,75
BR	10	M	FH	BR 10 M FH	564	Smrk	4,5	3,69	3,14
BR	10	M	U	BR 10 M U	565	Smrk	3,58	2,85	2,68
BR	10	M	E	BR 10 M E	566	Smrk	4,18	3,64	3,7
BR	10	M	B	BR 10 M B	567	Smrk	4,14	3,76	3,78
BR	11	K	FH	BR 11 K FH	568	Smrk	3,51	2,76	2,51
BR	11	K	A	BR 11 K A	569	Smrk	3,65	3,3	3,32
BR	11	K	B	BR 11 K B	570	Smrk	3,63	3,23	3,22
BR	11	K	C	BR 11 K C	571	Smrk	3,86	3,81	3,75
BR	11	M	FH	BR 9 M FH	572	Smrk	3,82	2,94	2,71
BR	11	M	U	BR 9 M U	573	Smrk	3,6	3,16	3,15
BR	11	M	RED	BR 9 M RED	574	Smrk	4	3,6	3,63
BR	11	M	E	BR 9 M E	575	Smrk	3,89	3,45	3,52
BR	11	M	B	BR 9 M B	576	Smrk	3,9	3,66	3,82

Příloha 2: Tabulka vzorků s jednotlivými kationty (lokalita Brdy).

vzorek	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	Fe ³⁺	Mn ²⁺	H ⁺
	meq + kg-1	meq + kg-1	meq + kg-1	meq + kg-1	meq + kg-1	meq + kg-1	meq + kg-1	meq + kg-1
BR 1 K FH	93,273	14,759	8,793	0,826	27,875	3,833	6,929	45,115
BR 1 K A	2,666	0,638	1,692	0,173	25,334	2,287	0,070	17,932
BR 1 K E	1,913	0,304	1,273	0,067	33,173	2,317	0,069	12,101
BR 1 K B	1,889	0,426	1,564	0,275	62,853	3,664	0,262	4,499
BR 1 M FH	193,901	17,670	13,276	0,802	3,221	0,059	19,846	4,373
BR 1 M U	26,560	2,521	3,839	0,677	68,724	2,149	2,881	11,533
BR 1 M C	3,262	0,283	1,095	0,139	14,292	0,059	1,563	3,208
BR 2 K FH	72,098	10,564	8,281	1,501	47,177	5,856	1,731	63,742
BR 2 K E	2,021	0,213	0,918	0,067	11,402	0,339	0,016	6,789
BR 2 K B	1,939	0,295	1,338	0,327	24,504	1,563	0,066	8,957
BR 2 M FH	92,364	11,801	11,109	1,261	45,783	6,375	12,204	46,165
BR 2 M U	13,973	2,153	3,416	1,000	98,293	3,896	1,302	30,472
BR 2 M BC	26,903	0,963	1,726	0,067	4,626	0,059	1,223	2,163
BR 3 K FH	56,149	11,709	7,575	1,508	56,238	8,182	1,101	73,192
BR 3 K A	4,650	0,853	1,794	0,453	23,380	1,004	0,041	35,012
BR 3 K E	2,175	0,324	1,129	0,067	10,550	0,489	0,012	13,286
BR 3 K B	1,778	0,296	1,083	0,067	19,270	0,800	0,013	14,568
BR 3 M FH	39,820	6,562	6,785	1,542	55,948	9,147	0,380	86,000
BR 3 M U	4,954	1,445	3,120	0,484	87,318	6,754	0,072	37,508
BR 3 M E	1,792	0,291	1,192	0,067	49,595	3,325	0,044	7,245
BR 3 M B	1,651	0,280	1,407	0,067	39,783	1,700	0,032	2,793
BR 4 K FH	58,689	15,475	17,771	0,828	37,879	5,278	2,075	51,804
BR 4 K A	2,898	0,815	1,522	0,067	25,731	1,001	0,025	18,351
BR 4 K C	2,770	0,416	0,754	0,299	18,462	0,860	0,019	10,298
BR 4 M FH	18,834	7,515	12,831	0,942	156,848	12,725	0,488	18,305
BR 4 M U	6,753	1,746	2,469	0,304	77,705	1,525	0,145	12,949
BR 4 M přechod	1,800	0,289	0,796	0,067	15,622	0,495	0,018	6,182
BR 4 M C	1,889	0,256	0,796	0,067	15,729	0,257	0,015	3,964
BR 5 K FH	34,073	3,856	5,791	0,897	38,329	5,090	1,015	90,057
BR 5 K A	2,119	0,448	1,314	0,557	14,715	1,289	0,059	20,130
BR 5 K E	1,640	0,154	0,725	0,270	17,223	0,981	0,032	7,444
BR 5 K B	3,111	0,545	1,486	0,067	100,131	6,791	0,386	6,394
BR 5 M FH	49,322	12,518	16,202	1,374	80,333	3,269	4,309	46,160
BR 5 M U	3,299	0,566	1,910	0,638	64,339	1,320	0,281	13,571
BR 5 M C	1,741	0,187	0,926	0,319	18,148	0,059	0,930	3,690
BR 6 K FH	40,128	9,688	8,262	1,419	61,006	8,396	1,113	73,191
BR 6 K A	4,031	0,674	1,219	0,740	7,109	0,577	0,056	21,575
BR 6 K C	1,677	0,203	0,892	0,339	17,915	0,557	0,012	6,783
BR 6 M FH	23,552	4,919	7,757	1,393	67,102	5,688	0,551	53,008
BR 6 M U	5,032	0,941	1,829	1,009	167,069	1,831	0,091	17,471

BR 6 M E	2,622	0,224	1,184	0,507	23,913	0,691	0,060	3,346
BR 6 M BC	3,727	0,446	1,461	0,067	54,124	2,658	0,166	3,209
BR 7 K FH	9,419	2,460	4,590	1,081	76,963	10,995	0,700	23,102
BR 7 K A	2,266	0,557	1,191	0,476	19,754	1,187	0,031	12,681
BR 7 K M	2,378	0,399	1,222	0,910	18,033	0,481	0,023	6,942
BR 7 M FH	45,609	6,524	13,116	0,799	28,780	2,504	5,930	24,207
BR 7 M A	3,356	1,263	2,948	0,391	77,164	8,077	0,206	16,329
BR 7 M M1	1,845	0,274	0,930	4,151	27,824	2,430	0,023	4,767
BR 7 M U	2,251	0,458	1,247	1,166	51,805	0,632	0,114	8,530
BR 7 M M2	2,153	0,242	0,932	0,453	36,818	0,296	0,585	3,658
BR 9 K FH	26,834	10,726	8,428	1,468	96,510	6,616	3,575	28,434
BR 9 K Ahe	1,957	0,827	1,570	0,594	50,076	4,119	0,059	16,722
BR 9 K Ew	1,713	0,319	1,002	0,365	30,920	3,696	0,029	4,992
BR 9 K Bm	1,619	0,202	0,747	0,201	13,304	0,291	0,024	2,471
BR 9 M FH	9,180	4,096	7,235	1,058	127,320	3,840	1,542	12,336
BR 9 M U	2,392	0,707	2,316	1,709	35,363	0,912	0,212	7,428
BR 9 M RED	1,758	0,405	0,917	0,629	25,961	1,388	0,334	4,550
BR 9 M Cg	1,708	0,379	0,980	0,380	20,637	1,715	0,310	3,864
BR 10 K FH	16,038	4,943	8,991	0,848	123,364	4,657	4,791	11,503
BR 10 K A	3,314	1,608	3,011	0,726	85,988	4,382	0,735	5,966
BR 10 K B	2,226	0,812	1,892	0,513	41,437	0,059	2,551	3,233
BR 10 K C	2,158	0,611	1,536	0,335	30,998	0,059	2,115	2,308
BR 10 M FH	187,350	19,037	19,328	0,576	1,290	0,127	39,648	9,843
BR 10 M U	15,879	3,196	4,838	0,694	55,110	2,499	1,197	28,443
BR 10 M E	1,682	0,174	0,916	0,364	10,215	0,059	0,428	2,662
BR 10 M B	1,706	0,187	1,140	0,424	9,133	0,059	0,446	2,202
BR 11 K FH	43,279	7,362	7,372	2,153	57,619	5,518	6,269	42,097
BR 11 K A	2,497	0,922	2,048	0,670	83,574	3,709	1,210	6,410
BR 11 K B	2,365	1,107	2,264	0,791	93,215	6,614	0,546	8,109
BR 11 K C	2,240	0,355	1,149	0,067	25,193	0,548	0,083	2,324
BR 11 M FH	34,519	7,958	9,822	0,744	30,001	2,926	5,424	26,547
BR 11 M U	2,474	0,540	1,576	0,637	41,906	3,043	0,180	9,591
BR 11 M RED	1,714	0,198	0,925	0,171	27,311	1,687	0,041	3,107
BR 11 M E	1,643	0,170	1,147	0,301	24,463	1,648	0,013	4,045
BR 11 M B	1,650	0,133	2,536	0,327	8,846	0,530	0,019	2,002

Příloha 3: Tabulka vzorků a jejich hodnoty bazických kationtů (BC), výměnné acidity (EA), kationtové výměnné kapacity (CEC) a saturací bází (BS) (lokalita Brdy).

vzorek	BC	EA	CEC	BS
	meq + kg- 1	meq + kg- 1	meq + kg- 1	%
BR 1 K FH	117,65	83,75	201,40	58,42
BR 1 K A	5,17	45,62	50,79	10,18
BR 1 K E	3,56	47,66	51,22	6,94
BR 1 K B	4,15	71,28	75,43	5,51
BR 1 M FH	225,65	27,50	253,15	89,14
BR 1 M U	33,60	85,29	118,88	28,26
BR 1 M C	4,78	19,12	23,90	19,99
BR 2 K FH	92,44	118,51	210,95	43,82
BR 2 K E	3,22	18,55	21,77	14,79
BR 2 K B	3,90	35,09	38,99	10,00
BR 2 M FH	116,53	110,53	227,06	51,32
BR 2 M U	20,54	133,96	154,50	13,29
BR 2 M BC	29,66	8,07	37,73	78,61
BR 3 K FH	76,94	138,71	215,65	35,68
BR 3 K A	7,75	59,44	67,19	11,54
BR 3 K E	3,70	24,34	28,03	13,18
BR 3 K B	3,22	34,65	37,88	8,51
BR 3 M FH	54,71	151,48	206,18	26,53
BR 3 M U	10,00	131,65	141,65	7,06
BR 3 M E	3,34	60,21	63,55	5,26
BR 3 M B	3,40	44,31	47,71	7,14
BR 4 K FH	92,76	97,04	189,80	48,87
BR 4 K A	5,30	45,11	50,41	10,52
BR 4 K C	4,24	29,64	33,88	12,51
BR 4 M FH	40,12	188,37	228,49	17,56
BR 4 M U	11,27	92,32	103,60	10,88
BR 4 M přechod	2,95	22,32	25,27	11,68
BR 4 M C	3,01	19,97	22,97	13,09
BR 5 K FH	44,62	134,49	179,11	24,91
BR 5 K A	4,44	36,19	40,63	10,92
BR 5 K E	2,79	25,68	28,47	9,80
BR 5 K B	5,21	113,70	118,91	4,38
BR 5 M FH	79,42	134,07	213,49	37,20
BR 5 M U	6,41	79,51	85,92	7,46
BR 5 M C	3,17	22,83	26,00	12,21
BR 6 K FH	59,50	143,71	203,20	29,28
BR 6 K A	6,66	29,32	35,98	18,52
BR 6 K C	3,11	25,27	28,38	10,96
BR 6 M FH	37,62	126,35	163,97	22,94

BR 6 M U	8,81	186,46	195,27	4,51
BR 6 M E	4,54	28,01	32,55	13,94
BR 6 M BC	5,70	60,16	65,86	8,66
BR 7 K FH	17,55	111,76	129,31	13,57
BR 7 K A	4,49	33,65	38,14	11,77
BR 7 K M	4,91	25,48	30,39	16,16
BR 7 M FH	66,05	61,42	127,47	51,81
BR 7 M A	7,96	101,78	109,73	7,25
BR 7 M M1	7,20	35,04	42,24	17,04
BR 7 M U	5,12	61,08	66,20	7,74
BR 7 M M2	3,78	41,36	45,14	8,38
BR 9 K FH	47,46	135,13	182,59	25,99
BR 9 K Ahe	4,95	70,98	75,92	6,52
BR 9 K Ew	3,40	39,64	43,04	7,90
BR 9 K Bm	2,77	16,09	18,86	14,68
BR 9 M FH	21,57	145,04	166,61	12,95
BR 9 M U	7,12	43,92	51,04	13,96
BR 9 M RED	3,71	32,23	35,94	10,32
BR 9 M Cg	3,45	26,53	29,97	11,50
BR 10 K FH	30,82	144,31	175,14	17,60
BR 10 K A	8,66	97,07	105,73	8,19
BR 10 K B	5,44	47,28	52,72	10,32
BR 10 K C	4,64	35,48	40,12	11,57
BR 10 M FH	226,29	50,91	277,20	81,64
BR 10 M U	24,61	87,25	111,86	22,00
BR 10 M E	3,14	13,36	16,50	19,01
BR 10 M B	3,46	11,84	15,30	22,60
BR 11 K FH	60,17	111,50	171,67	35,05
BR 11 K A	6,14	94,90	101,04	6,07
BR 11 K B	6,53	108,48	115,01	5,67
BR 11 K C	3,81	28,15	31,96	11,92
BR 11 M FH	53,04	64,90	117,94	44,97
BR 11 M U	5,23	54,72	59,95	8,72
BR 11 M RED	3,01	32,15	35,16	8,56
BR 11 M E	3,26	30,17	33,43	9,76
BR 11 M B	4,65	11,40	16,04	28,96