

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Zemědělská fakulta

Studijní program: B4131 – Zemědělství

Studijní obor: Agroekologie

Katedra: Katedra rostlinné výroby a agroekologie

Vedoucí katedry: prof. Ing. Vladislav Čurn, Ph.D.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Procesy sequestrace půdního uhlíku na rekultivovaných  
plochách Velké podkrušnohorské výsypky

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lubomír Bodlák

Autor: Martina Kobesová

České Budějovice, duben 2011

Prohlášení:

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury. Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě (v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Zemědělskou fakultou JU) elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích dne 5. 4. 2011

---

Martina Kobesová

### Poděkování:

Děkuji Ing. Lubomíru Bodlákovi, vedoucímu bakalářské práce, za odborné vedení, cenné rady a připomínky a za trpělivost a ochotu. Také bych chtěla poděkovat všem, kteří mi pomáhali při práci v laboratoři. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat rodině a přátelům za jejich podporu a trpělivost.

## **Abstrakt**

Hlavním cílem bakalářské práce bylo na základě odebraných vzorků z daných lokalit zjistit procesy sequestrace půdního uhlíku na rekultivovaných plochách Velké podkrušnohorské výsypky a výsledky zhodnotit v návaznosti na fyzikálně chemické vlastnosti půd. V odebraných vzorcích bylo měřeno množství půdního uhlíku a byl proveden rozbor základních fyzikálně chemických parametrů půdy. Největší koncentrace půdního uhlíku byla naměřena v olšových porostech.

### **Klíčová slova:**

půdní organická hmota, Podkrušnohorská výsypka, sequestrace, zásoba uhlíku

## **Abstract**

The main objective of this thesis was based on samples from the localities to determine the processes of soil carbon sequestration in reclaimed areas of the Velké podkrušnohorské dump and to evaluate the results in relation to physical and chemical properties of soil. The amount of soil carbon was measured from the collected samples and the soil was analyzed of basic physical and chemical soil parameters. The largest concentration of soil carbon was measured in the alder stands.

### **Key words:**

soil organic matter, Podkrušnohorská dump, sequestration, carbon pool

## Obsah

1.	ÚVOD .....	- 7 -
2.	CÍL.....	- 8 -
2.1	Dílčí cíle .....	- 8 -
3.	LITERÁRNÍ PŘEHLED.....	- 9 -
3.1	Půda.....	- 9 -
3.1.1	Vznik a vývoj půdy .....	- 10 -
3.1.2	Mineralogické složení půd.....	- 13 -
3.1.3	Živá složka půdy.....	- 14 -
3.2	Půdní organická hmota .....	- 14 -
3.2.1	Základní třídění půdní organické hmoty .....	- 15 -
3.2.2	Pochody přeměn organické hmoty v půdě a tvorba humusu..	- 16 -
3.3	Fyzikální vlastnosti půd.....	- 18 -
3.3.1	Základní fyzikální vlastnosti .....	- 19 -
3.3.2	Hydrofyzikální a aerační vlastnosti.....	- 21 -
3.3.3	Teplotní vlastnosti .....	- 22 -
3.3.4	Fyzikálně mechanické vlastnosti.....	- 23 -
3.4	Chemické vlastnosti půd.....	- 24 -
3.4.1	Makroelementy.....	- 24 -
3.4.2	Mikroelementy.....	- 25 -
3.4.3	Půdní koloidy.....	- 26 -
3.4.4	Formy reakce půdy .....	- 27 -
3.5	Uhlík .....	- 28 -
3.6	Velká podkrušnohorská výsypka .....	- 30 -
3.6.1	Vývoj a tvorba půdy na výsypkách .....	- 33 -
4.	METODIKA .....	- 35 -
4.1	Vlastní metodický postup .....	- 35 -
4.1.1	Odběr vzorků pro základní pedologický rozbor .....	- 35 -
4.1.2	Základní zpracování půdních vzorků .....	- 37 -
4.2	Stanovení půdního uhlíku .....	- 37 -
4.2.1	Stanovení TC (celkový uhlík).....	- 38 -
4.2.2	Stanovení IC (anorganický uhlík) .....	- 38 -
4.2.3	Použité chemikálie.....	- 38 -
4.2.4	Pracovní postup.....	- 39 -
4.2.5	Kalibrace.....	- 39 -
4.3	Výpočet zásoby uhlíku .....	- 39 -
5.	VÝSLEDKY .....	- 40 -
6.	DISKUSE .....	- 44 -
7.	ZÁVĚR.....	- 47 -
8.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	- 48 -

## 1. ÚVOD

Povrchová těžba nerostných surovin způsobuje devastaci území, což negativně ovlivňuje nejen krajinu a přírodu, ale i sociálně ekonomickou oblast v postiženém regionu (Svoboda, 2000). Těžbou uhlí dochází k poškození nebo úplnému zničení dané lokality. Devastaci však nezpůsobuje pouze samotná těžba, ale také překrývání skrývkovou zeminou z nadloží uhelných slojí při tvorbě výsypek.

Antropogenní krajina není schopná plnit základní funkce ekosystémů. Vráblíková et al. (2008), která se zabývá revitalizací v Podkrušnohoří, definuje výsypky jako extrémně suché plochy. Na výsypkách není půda vyvinutá, fyzikální substrát neobsahuje organické látky a nenalezneme na nich vegetaci ani edafon. Piha et al. (1995) označuje tyto oblasti za náchylné k vodní i větrné erozi a k nežádoucímu vymývání látek. Výsypky jsou též na první pohled velmi nevzhledné. Je důležité obnovit ekologické funkce krajiny v těžbou postižených oblastech v co nejkratším možném čase (Häge et al., 1996). Na postižených územích se proto provádějí rekultivace.

Dimitrovský a Kupka (2006) se zabývají lesnickou rekultivací výsypek v severozápadních Čechách. Rozhodujícími faktory v tomto procesu jsou vlastnosti substrátů a ekologické požadavky vysazovaných dřevin.

Rozvoj a tvorba půdy jsou jedny z nejvýznamnějších složek obnovy funkčních ekosystémů na výsypkách. Po lesnické rekultivaci dochází k oživení původního mrtvého substrátu. S rozvojem vegetace dochází k vytvoření vrstvy humusu a k významné akumulaci organické hmoty v půdním profilu. Šimek (2003) uvádí, že uhlík je v suchozemských ekosystémech akumulován v půdě, v opadu a jiných zbytcích rostlin a živočichů a v jejich biomase.

## **2. CÍL**

Cílem bakalářské práce bylo, na základě odebraných půdních vzorků, stanovit schopnost půd akumulovat (sequestrovat) uhlík na území Velké podkrušnohorské výsypky na Sokolovsku.

### **2.1 Dílčí cíle**

Cíl 1: Odebrání půdních vzorků, jejich rozbor a statistické zpracování

Cíl 2: Stanovení schopnosti půd sequestrovat uhlík

Cíl 3: Zhodnocení výsledků z výše jmenovaných cílů v návaznosti na fyzikálně chemické vlastnosti půd

Cíl 4: Podchycení a popsání procesu ukládání uhlíku při tvorbě půdního profilu na daném území

### 3. LITERÁRNÍ PŘEHLED

#### 3.1 Půda

Půda tvoří svrchní část zemského povrchu – pedosféru (Tomášek, 2007), vzniká rozpadem podložní horniny působením biologických, chemických a fyzikálních vlivů (Forman, Godron, 1993). Podle Šantrůčkové (2001) je půda směs zvětralé zemské kůry a organického materiálu. Je prostředím, ve kterém žije velké množství různých organismů, ale je zároveň jejich produktem, organismy tedy půdu spoluvytvářejí. Bez organismů by Země měla kůru, atmosféru i vodu, avšak neměla by půdu. Půda je také prostředím, které umožňuje růst a zakotvení rostlin, a je též zdrojem jejich minerální výživy.

Lhotský et al. (1994) uvádí, že půda je důležitá k výrobě potravin. Řadí se k neobnovitelným přírodním zdrojům a je též významnou složkou krajiny, jejíž charakter a ekologickou hodnotu do značné míry určuje. Rekultivace půd se podle něj stala povinností v okamžiku, kdy člověk začal půdu poškozovat svými činnostmi.

Pro člověka je stále nejdůležitější úrodnost půdy. Vztaženo pouze na zemědělsky využívané půdy to znamená, aby poskytovala sklizně pěstovaných plodin. V současné době se však hovoří i o mimoprodukční funkci – stabilizační, krajino tvorná, hygienická (Tomášek, 2007).

Šarapatka (1996) uvádí, že půda vzniká a vyvíjí se na styku a při vzájemném působení litosféry, atmosféry, biosféry, hydrosféry a činnosti člověka. Obecně si tedy půdu můžeme představit jako výsledek společného působení podnebí, organismů a zejména rostlinstva na horniny zemského povrchu (Šantrůčková, 2001).



### 3.1.1 Vznik a vývoj půdy

Milerski (2005), který se zabývá vývojem půdy, uvádí, že vývoj půdy je ovlivňován několika různými faktory. Jedná se o trvale působící a rozhodující faktory a faktory náhodné a bezvýznamné.

Základními pedogenetickými faktory jsou:

- matečný substrát (hmotný základ)
- podnebí (regionální vliv)
- reliéf terénu (místní vliv)
- organismy
- podzemní voda
- činnost člověka

Někdy se uvádí jako sedmý faktor čas. Tyto pedogenetické faktory na sebe působí různými procesy a vzniká tak půda.

Šimek (2005) uvádí členění půd na minerální a organické. Minerální půdy jsou tvořeny především minerálními částicemi, obsah organických látek je nízký. Organické půdy jsou z 15 – 20 %, někdy i více, tvořeny organickými látkami.

#### Organické půdy

Podle Šantrůčkové (2001) jsou organické půdy rozšířeny hlavně v arktických a boreálních oblastech. Rozklad organické hmoty je zde značně omezen nízkými teplotami, zamokřením, silnou kyselostí půd a nedostatkem živin. Je zde velké množství částečně rozložených organických zbytků.

#### Minerální půdy

Rajchard et al. (2002) uvádí, že půdotvorný proces při tvorbě minerálních půd je iniciován fyzikálním a chemickým zvětráváním hornin. Ty se rozpadají a současně dochází k uvolňování živin, vzniká půdotvorný substrát.

Fyzikální zvětrávání je vyvoláno působením změn teploty, vody, větru, ledu a později i působením vegetace.

Chemické zvětrávání je nejprve vyvoláno hlavně vodou, atmosférickým kyslíkem, oxidem uhličitým a rozpuštěnými minerálními látkami. V počátku jsou půdy chudé na uhlík a dusík. Tento jev však není dlouhodobý, neboť jako první kolonizují půdotvorný substrát hlavně sinice, řasy, lišejníky a bakterie, které mají schopnost fixovat  $\text{CO}_2$  a  $\text{N}_2$  ze vzduchu. Vytvoření surové půdy nastává po osídlení zvětrávajících hornin rostlinami. Rostliny urychlují rozvoj půdní struktury i celý půdotvorný proces.

Podle Šantrůčkové (2001) dochází během půdotvorného procesu k rozlišování půdního profilu. Vyvinuté půdy mají dobře znatelnou vertikální strukturu. Jednotlivé půdní typy tak mají charakteristické jednotlivé horizonty (Obrázek 1). Svrchní organický horizont (O), který podrobněji dělíme na opad (L), fermentační (F) a humusovou (H) vrstvu, vzniká hromaděním zbytků rostlin a z části exkrementů drobných živočichů. Tak zvaný A-horizont je zóna vymývání. Minerální látky jsou v něm rozpouštěny a vymývány vodou do spodních horizontů. Na vrcholu se nachází opad, pod nímž nalezneme humus. B-horizont je zónou akumulace, je obohacován látkami vyplavovanými ze svrchního horizontu. C-horizont je zónou zvětrávání, kde půda přechází v matečnou horninu (Forman, Godron, 1993).

Němeček et al. (2001) uvádí, že v závislosti na složení vegetace, vlhkostních a teplotních podmínkách a na složení půdotvorného substrátu se vytváří organický horizont různé kvality.

### Mor

- vytváří se na minerálně chudých půdách v chladném a vlhkém klimatu
- vzniká při nepříznivých podmínkách pro rozklad a transformaci organických látek
- k tvorbě přispívá kyselý opad jehličí a hromadění odumřelých částí acidofilních druhů rostlin
- vyskytuje se pod bory, pod smrkovými a borovými monokulturami

### Moder

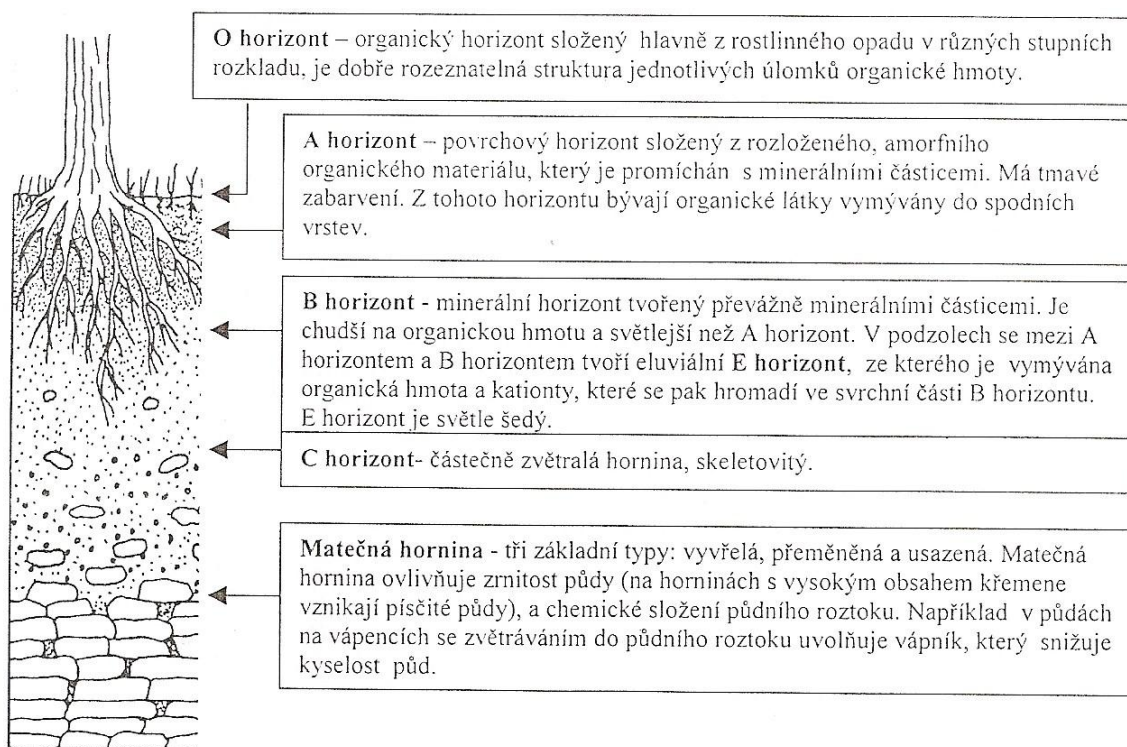
- vzniká v příznivějších klimatických a půdních podmínkách než mor
- při rozkladu a transformaci se významně uplatňují houby, aktinomycety a půdní fauna (kromě dešťovek)
- zaujímá přechodné postavení mezi morem a mulem
- vyskytuje se pod listnatými a jehličnato-listnatými porosty

### Mul

- vytváří se na půdách dobře provzdušněných, čerstvě vlhkých až vlhkých, bohatých na živiny
- vzniká v širokém rozmezí klimatických podmínek, častější je v teplých a mírně teplých oblastech
- organická hmota je do horizontu vpravována činností půdních organismů, především žížal
- podmínky pro rozklad a transformaci organických látek jsou velmi příznivé
- vyskytuje se převážně pod listnatými porosty

Obrázek 1: Znázornění jednotlivých horizontů v půdním profilu

Převzato od: Šantrůčková, 2001



### 3.1.2 Mineralogické složení půd

Podle Šarapatky (1996) je množství minerálního podílu půd rozdílné. Záleží na tom, zda se jedná o půdy minerální nebo organické. Minerální půdy obvykle obsahují 1 – 6 % organických látek, organické půdy obsahují více než 50 % objemových organických látek (nejméně 20 % váhových).

Minerální půdy se skládají ze čtyř hlavních komponentů. Jedná se o minerální podíl půdy, organický podíl půdy, vodu a vzduch. Asi 50 % objemových tvoří pevná část půdy (45 % minerální a 5 % organická). Voda a vzduch tvoří 20 – 30 % a vyplňují póry nacházející se mezi pevnou částí půdy.

### 3.1.3 Živá složka půdy

Rajchard et al. (2002) uvádí, že živou složku půdní organické hmoty tvoří kořeny rostlin, bakterie, aktinomycety, houby a živočichové. Kořeny rostlin zajišťují příjem vody a živin a ukotvení rostlin v půdě. Půdní mikroorganismy a živočichové transformují a mineralizují organickou hmotu v půdě. Většina půdních organismů (až 80 %) se vyskytuje ve svrchních horizontech půdního profilu (20 cm).

Na povrchu nebo v horním horizontu půdy jsou průběžně ukládány rostlinné a živočišné zbytky, které jsou zpracovány půdními mikroorganismy. Organické látky mohou být rozloženy až na  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ , jednoduché anorganické sloučeniny, nebo může dojít k rozkladu a následné syntetizaci do forem zvaných humus.

Půdní mikroflóra rozkládá organickou hmotu, která se do půdy dostane formou opadu, odumřelých kořenů, dřeva, těl živočichů i mikroorganismů, na jednodušší chemické sloučeniny a minerální látky, které jsou přístupné pro rostliny (Šarapatka, 1996).

Podle Rajcharda et al. (2002) spočívá činnost půdních živočichů hlavně v přemísťování organických zbytků, jejich rozměňování a tím zpřístupňování dalších látek. Též se jedná o natrávení složitějších látek a o vytváření vhodného prostředí pro růst a rozvoj některých skupin mikroorganismů. Mikroorganismy jsou přitom funkčně spojeny s půdními živočichy a vytvářejí složitou strukturu potravních, symbiotických, konkurenčních a dalších vztahů. Půda by bez těchto organismů nebyla půdou, ale pouze mrtvým substrátem, který by nemohl plnit důležité funkce v ekosystému (Šarapatka, 1996).

## 3.2 Půdní organická hmota

Ledvina et al. (2000) označují půdní organickou hmotu jako soubor všech neživých organických látek nacházejících se v půdě či na jejím povrchu. Má rozhodující vliv na půdní vlastnosti a tím i na půdní úrodnost. Coleman,

Johnston a Poulton (2009) uvádějí, že půdní organická hmota nemá vliv jen na úrodnost půdy, ale je též důležitá ve vztahu k trvale udržitelnému rozvoji a produkci plodin. Množství organické hmoty v půdě závisí na vstupu organického materiálu, úrovni rozkladu, na mineralizaci, struktuře půdy a podnebí. Tyto faktory na sebe vzájemně působí, proto se množství organické hmoty mění a tak směřuje k vyvážené specifické hodnotě pro určitý půdní typ.

Neživými složkami půdy se zabývá Šimek (2005). Uvádí, že půdní organickou hmotu tvoří půdní organismy a různé organické látky. Organická hmota ovlivňuje fyzikální a chemické vlastnosti půd mnohem více, než by odpovídalo jejímu relativně nízkému obsahu v půdě. Pro většinu organismů je organická hmota hlavním zdrojem energie a živin.

### **3.2.1 Základní třídění půdní organické hmoty**

Půdní organická hmota (soubor neživých organických látek):

- 1) Humusotvorný materiál (odumřelé zbytky rostlin, živočichů a mikroorganismů nepodléhající dosud transformačním pochodům).
- 2) Meziprodukty rozkladu a syntézy (mezistupně přeměn humusotvorného materiálu – látky nesespecifické).
- 3) Humus (organická hmota prošlá humifikačními pochody – látky specificky půdní), (Ledvina et al., 2000).

Organickou hmotu, která se dostává do půdy, tvoří:

- 1) Jednodušší cukry a organické kyseliny, které jsou lehce rozpustné ve vodě a jsou snadno rozkládány jak mikrobiálně, tak chemickými a fyzikálně chemickými procesy.
- 2) Pryskyřice, tuky, vosky a třísloviny, které jsou rozpustné v organických rozpouštědlech. Ve srovnání s cukry a aminokyselinami jsou to látky těžko rozložitelné chemickou cestou a více vzdorují mikrobiálnímu rozkladu.

3) Celulóza a hemicelulóza. Celulóza je dominující složkou rostlin v přírodě a je důležitým zdrojem energie pro edafon. Celulóza je chemicky rozkládána až vlivem koncentrovaných kyselin a louhů. Mikrobiální cestou se poměrně snadno rozkládá. Hemicelulóza je k rozkladu kyselinami a louhy méně odolná než celulóza. Rovněž při mikrobiálním rozkladu dochází k jejímu snadnějšímu odbourávání.

4) Lignin představuje jednu z hlavních součástí dřevní hmoty a pokládá se za látku odolávající rozkladné činnosti mikroorganismů. V přirozeném materiálu se nevyskytuje volný, ale tvoří komplexy zejména s celulózou.

5) Organické dusíkaté látky, kterých je v organických odpadech asi třetina až polovina tvořena bílkovinami, ostatní podíl tvoří nukleoproteiny, nukleové kyseliny atd.

Po dodání organické hmoty do půdy nastává:

1) enzymatická oxidace značné části materiálu s produkcí CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O a uvolňování energie a tepla,

2) uvolňování esenciálních prvků jako N a P a/nebo jejich imobilizace řadou specifických reakcí,

3) rozklad, modifikace a mikrobiální syntéza složek, které jsou vůči mikrobiálnímu rozkladu rezistentnější (tyto složky zahrnují půdní humus), (Šarapatka, 1996).

### **3.2.2 Pochody přeměn organické hmoty v půdě a tvorba humusu**

Odumřelé organické látky v půdě podléhají odlišným přeměnám. Charakter těchto přeměn, doba nutná na kompletní transformaci organických zbytků i povaha výsledných produktů závisí na jejich původu a prostředí, v němž tyto pochody probíhají. Dochází tak k rozkladu na výchozí anorganické složky s uvolňováním energie = mineralizaci, k vytváření složitějších a stabilnějších organických látek většinou aromatické povahy = humifikaci. Může dojít též k produkci a hromadění

energeticky bohatých sloučenin = unifikaci, karbonizaci, ale tyto pochody jsou méně časté (Ledvina et al., 2000).

#### Mineralizace v aerobních podmínkách

Šarapatka (1996) uvádí, že mineralizace probíhá na dobře propustných půdách, kde je optimální poměr vody a vzduchu v pórech. Účastní se jí hlavně aerobní bakterie. Dochází k enzymatické oxidaci organických látek až na jednoduché sloučeniny – CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O a oxidy prvků. Při rozkladu bílkovin vznikají též aminokyseliny, které podléhají následně dalším změnám až po produkci anorganických iontů, jako NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> a SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Meziprodukty mineralizace jsou částečně humifikovány, čímž dochází k redukci humusu.

#### Rozklad organických látek za nepřístupu vzduchu

Probíhá v extrémních podmínkách za omezeného přístupu vzduchu nebo za anaerobních podmínek. Tomuto procesu přispívá nízká teplota, nedostatek živin a kyselá reakce. Mikrobiální činnost je slabá, uplatňují se převážně anaerobní bakterie. Organické látky se hromadí ve vrstvách jako rašelina.

#### Humifikace

Určitou část substrátu využívají mikroorganismy na syntézu vlastních bílkovin, tuků, sacharidů a složitých aromatických komplexních sloučenin. První fáze tvorby humusu končí vznikem rozkladných produktů s následnou mikrobiální resyntézou.

Druhá fáze představuje tvorbu humusových látek. Mají zde vliv mimo mikroorganismů i fyzikální a chemické vlastnosti půd. Podstatou procesu tvorby vysokomolekulárních humusových látek je kondenzace a polymerace aromatických sloučenin s aminokyselinami a bílkovinami. Vzniklé humusové látky jsou pak stabilnější vůči mikrobiálnímu rozkladu. Při tvorbě humusu je nezbytný přísun energie. Podle Ledviny, Horáčka a Šindelářové (2000) mohou humusové látky tvořit 60 – 80 % půdní organické hmoty.



Na základě odolnosti vůči mikrobiálnímu rozkladu a rozpustnosti v alkáliích a kyselinách se humusové látky člení na skupiny:

#### Fulvokyseliny

- mají nejnižší molekulovou hmotnost, nejsvětlejší barvu, jsou rozpustné ve vodě a v kyselinách
- jsou nejméně odolné vůči mikrobiálnímu rozkladu
- lehce se rozkládají a zároveň se poměrně rychle obnovují v procesu mineralizace a humifikace

#### Huminové kyseliny

- mají tmavší barvu
- řadí se mezi vysokomolekulární dusíkaté organické sloučeniny s cyklickou stavbou
- jsou rozpustné v alkáliích, v kyselinách se vysráží

#### Humin

- má nejvyšší molekulovou hmotnost a tmavou barvu
- je nerozpustný v kyselinách i zásadách a je nejodolnější k mikrobiálnímu rozkladu

### **3.3 Fyzikální vlastnosti půd**

Šarapatka (1996), který se zabývá fyzikálními vlastnostmi půd, uvádí, že se jedná o soubor vlastností, které jsou podmíněné vzájemnými vztahy mezi pevnou fází půdy, půdním roztokem a vzduchem v půdě.

Fyzikální vlastnosti půd se člení na:

- základní fyzikální vlastnosti (zrnitost půdy, měrná a objemová hmotnost, pórovitost a struktura půdy),
- hydrofyzikální a aerační vlastnosti (vlhkost, vodní kapacita, propustnost, vzlínavost, vzdušná kapacita atd.),
- teplotní vlastnosti (tepelná a teplotní vodivost, teplota),
- fyzikálně mechanické vlastnosti (soudržnost, přilnavost, konzistence, uléhavost, hutnost, hrudovatění atd.), (Šarapatka, 1996).

### 3.3.1 Základní fyzikální vlastnosti

#### Zrnitost půdy

Vyjadřuje relativní zastoupení půdních částic jednotlivých velikostních kategorií (Forman, Godron, 1993). Šimek (2005) uvádí, že velikost minerálních částic v půdě zásadně ovlivňuje fyzikální a chemické vlastnosti půdy. Částice se třídí podle velikosti na kategorie štěrk, písek, prach a jíl (Tabulka 1).

Tabulka 1: Třídění půdních částic podle velikosti používaný v ČR podle Kopeckého

Převzato od: Šimek, 2005

Název	Průměr částic	Kategorie
jíl	pod 0,002 mm	
jemný prach	0,001 – 0,01 mm	I. (jílkaté částice)
prach	0,01 – 0,05 mm	II.
práškovitý písek	0,05 – 0,1 mm	III.

písek	0,1 – 2 mm	IV.
skelet	nad 2 mm	

Podle zastoupení hlavních zrnitostních frakcí v hmotnostních procentech (textury) rozlišujeme půdní druhy. Členíme je na půdy písčité (lehké), hlinité (střední) a jílovité (těžké) a přechody mezi nimi (Tabulka 2).

Tabulka 2: Třídění půdních druhů podle Nováka pro půdy bez CaCO<sub>3</sub>

Převzato od: Šimek, 2005

Skupina půd	Půdní druh	Obsah jílnatých částic (pod 0,01 mm) (% hmotnostní)
Těžké	Jíl	Nad 75
	Jílovitá zemina	60 – 75
	Jílovitohlinitá zemina	45 – 60
Střední	Hlinitá zemina	30 – 45
	Písčitohlinitá zemina	20 – 30
lehké	Hlinitopísčitá zemina	10 – 20
	Písčitá zemina	0 - 10

#### Měrná hmotnost a objemová hmotnost půdy

Ledvina et al. (2000) uvádí, že měrná hmotnost půdy  $M_z$  ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) je hmotnost objemové jednotky pevné fáze bez pórů. Hodnota závisí na obsahu organických látek a minerálů s různou hustotou.

Objemová hmotnost půdy  $O$  ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) je hmotnost objemové jednotky v neporušeném stavu. Jedná se tedy o půdu s vyplněnými póry momentním obsahem vody a vzduchu. Hodnota závisí na měrné hmotnosti, na podílu pórů a míře jejich zaplnění vodou.

### Pórovitost

Podle Šarapatky (1996) není půda kompaktní hmotou. Volnými prostory mezi pevnými půdními částicemi (póry) vniká do půdy voda a vzduch, ovlivňují tedy zvětrávací a půdotvorné pochody. Pórovitost půdy vyjadřuje celkový objem pórů, jejich tvar, velikost a rozmístění.

Póry můžeme členit do dvou hlavních skupin:

- 1) kapilární póry s rozměrem pod 0,2 mm. Neumožňují výměnu vzduchu, omezují pohyb vody, ale zajišťují její vztlínání.
- 2) nekapilární póry s rozměrem nad 0,2 mm. Jsou většinou vyplněné vzduchem a rychle propouští gravitační vodu.

### Struktura půdy

Struktura půdy patří k nejvýznamnějším fyzikálním charakteristikám půdy (Šimek, 2005). Materna a Sánka (2004) zabývající se strukturou půdy uvádí, že se hodnotí velikost, tvar, vyvinutost a stav povrchu půdních agregátů a prostory mezi nimi. Struktura půdy je určována faktory fyzikálními (vysychání, zvlhčování, mrznutí, tání), faktory chemickými (minerologická skladba, chemické vazby, tvorba agregátů) a v neposlední řadě faktory biologickými (působení kořenů, půdních mikroorganismů a živočichů).

### **3.3.2 Hydrofyzikální a aerační vlastnosti**

#### Voda v půdě

Podle Rajcharda et al. (2002) je hlavní složkou všech organismů voda. Je také prostředím, ve kterém probíhají všechny životní pochody. Voda zaplňuje v půdě volné prostory mezi pevnými částicemi, určuje tedy růst rostlin i biologickou aktivitu půdy. Termínem půdní voda se označuje veškerá voda obsažená v půdě. Ta může být v kapalném, plynném či pevném skupenství (Ledvina et al., 2000).

### Vzduch v půdě

Půdní vzduch vyplňuje půdní póry, které nejsou zaplněny vodou (Šimek, 2005). Rajchard et al. (2002) uvádí, že hlavními plyny půdního vzduchu jsou  $N_2$ ,  $O_2$  a  $CO_2$ . Aerace půdy je řízena obsahem vody, tvarem, rozdělením a obsahem pórů, difúzí a rozpustností plynů ve vodě, difúzí plynů ve vzduchu, teplotou a biologickou aktivitou. Vzdušná kapacita půdy je schopnost půdy jímat vzduch do půdních pórů. Momentální obsah vzduchu v pórech představuje provzdušněnost půdy (Šarapatka, 1996).

### **3.3.3 Teplotní vlastnosti**

#### Teplota

Rajchard et al. (2002), který se zabývá teplotou půdy, zjistil, že půdní teplota je významným faktorem pro biologickou aktivitu. Má přímý vliv na fyziologické funkce a ovlivňuje biologické procesy i nepřímo (difúzí a rozpustností plynů v půdním roztoku, rychlostí zvětrávání hornin, povrchovým napětím nebo strukturou vody). Zdrojem tepla v půdě je sluneční energie a biologická aktivita. Ledvina et al. (2000) uvádí, že se krátkovlnné světelné záření v půdě transformuje na dlouhovlnné světelné záření. Tepelná energie se v půdě akumuluje, zpětným vyzařováním se tedy regulují tepelné poměry. Podle Rajcharda et al. (2002) závisí množství energie potřebné k ohřátí půdy na teplotní kapacitě půdy a hlavně na množství vody v půdě. Teplotní režim půdy je řízen sezónním a denním střídáním teplot, vegetací, vlhkostí a hloubkou profilu.

### 3.3.4 Fyzikálně mechanické vlastnosti

#### Barva půdy

Materna a Sánka (2004) uvádějí, že barva je důležitou charakteristikou při popisu půdního profilu. Jednotlivé horizonty mají rozdílnou barvu. Rozhodujícím činitelem určujícím barvu půdy v povrchových humusových horizontech je obsah organické hmoty, v podpovrchových horizontech záleží na přítomnosti minerálů a oxidačně-redukčních podmínkách.

#### Soudržnost a přilnavost

Podle Šarapatky (1996) je soudržnost definována jako vzájemné poutání půdních částic působením vnitřních sil. Je ovlivňována zrnitostním složením, strukturou agregátů, obsahem humusu a vlhkostí.

Přilnavost spočívá v působení přitažlivých sil mezi půdními částicemi a povrchem tělesa vnikajícího do půdy. Vzrůstá s obsahem koloidů v půdě a s vlhkostí.

#### Konzistence zemin

Materna a Sánka (2004) uvádějí, že konzistence zemin udává stupeň vzájemného poutání částic mezi sebou a lpění zeminy k cizím tělesům.

Klasifikuje se podle:

- stupně lepivosti: nelepivá → silně lepivá
- stupně plasticity: neplastická → silně plastická
- stupně pevnosti: kyprá → velmi tuhá

### 3.4 Chemické vlastnosti půd

Zemská kůra i půda se vyznačují velmi nevyváženým složením jednotlivých prvků. Z 92 přirozeně se vyskytujících prvků je jich pouze 8 s podílem vyšším jak 1 % (Ledvina et al., 2000).

Šarapatka (1996) dělí složky půdy na minerální, organické a organominerální. Horní část litosféry je zdrojem minerálních látek. Podléhá zvětrávání a půdotvornými procesy v ní vzniká půda. Od litosféry se půda odlišuje obsahem organických a minerálních látek. Jedná se o důsledek činnosti rostlin a živočichů.

#### 3.4.1 Makroelementy

Ledvina et al. (2000) uvádějí, že mikroelementy tvoří převážnou část půdní hmoty. Prvky, které jsou k dispozici rostlinám, se uvolňují do půdního roztoku rozkladem horninových minerálů.

##### Kyslík, křemík, hliník a železo

Tvoří více než 90 % obsahu všech elementů a jsou tedy v půdě nejvíce zastoupeny.

Kyslík v půdě tvoří 50 % a nachází se v anorganické i organické části půdy. V anorganické části je zastoupen v primárních i sekundárních minerálech, oxidech a hydroxidech. Je také součástí půdní vody a vzduchu.

Křemík v půdě tvoří asi jednu třetinu. Společně s hliníkem a železem tvoří kostru půdní hmoty. Nejčastěji se nachází ve formě křemene a silikátů.

Hliník v půdě tvoří v průměru přes 7 % a je obsažen v primárních a sekundárních minerálech.

Průměrný obsah železa ve srovnání s hliníkem je zhruba poloviční. Nachází se v primárních a sekundárních minerálech, v podobě hydroxidů, oxidů i solí a ve formě organominerálních komplexů.

### Dusík

Dusík, fosfor a draslík v půdě popisuje Šarapatka (1996).

Zásoby dusíku v půdě souvisejí s obsahem organických látek, zejména humusu. Nachází se v bílkovinách, je součástí chlorofylu, enzymů a nukleových kyselin. Obsah v půdě závisí na akumulaci z atmosféry. Půdy se také obohacují o dusík dešťovými srážkami.

### Fosfor

Fosfor je významným biogenním prvkem. Je složkou ATP, ADP, fosfoproteinů, nukleoproteinů, rytinu a je nezbytný pro řadu metabolických procesů. V půdě se nachází v anorganické i organické formě.

### Draslík

Draslík zajišťuje důležité fyziologické funkce v organismech a podporuje syntézu chlorofylu. Nachází se v primárních a sekundárních minerálech. Značná část draslíku se projevuje malou přístupností pro rostliny.

## **3.4.2 Mikroelementy**

V půdě i živých organismech se mnohé prvky nachází v mikro množstvích. Tvoří tak skupinu mikroelementů, do které se může zařadit B, Mn, Mo, Cu, Zn, Co, J, F a další.



Mikroelementy se vyskytují ve třech hlavních formách. Jedná se o anorganickou formu, která je součástí minerálů, organickou formu nebo jsou mikroelementy přítomny v půdním roztoku např. ve formě  $Mn^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Zn(OH)^+$ ,  $Cl^-$  apod.

Bór a molybden bývá přítomen v aniontové formě. Chlór je ve srovnání s dalšími mikroelementy přijímán ve větším množství. Většina Cl je v půdě ve formě chloridů, které bývají v humidních regionech vyplavovány.

Přijatelnost dalšího prvku, bóru, je dána reakcí prostředí, kdy v kyselejších půdách je přístupnější. V mnoha půdách dochází k akumulaci tohoto prvku v humusu a ve vrstvách s vyšším obsahem organických látek (Ledvina et al., 2000).

### **3.4.3 Půdní koloidy**

Půdními koloidy se zabývá Šimek (2005). Uvádí, že termínem koloid se označuje stav látky, který je dán velikostí částic a jejich diskontinuitou. Jsou nehomogenní soustavy. Velikost dispergovaných částice se pohybuje v rozmezí  $10^{-9} - 10^{-6}$  m (5 nm – 2  $\mu$ m). Vyskytují se v plynném, kapalném i pevném skupenství. Půdní koloidy jsou velmi proměnlivé v čase. Koloidní částice mají velký měrný povrch a obvykle nesou negativní nebo pozitivní náboj, negativní náboj se vyskytuje častěji.

Koloidy vznikají z menších částic koagulací (sbalování menších částíček na větší) nebo vznikají z větších částic asociací, polymerací nebo polykondenzací. V půdě vznikají z větších částic organické koloidy.

### 3.4.4 Formy reakce půdy

1) u aktivní půdní reakce  $H^+$  ionty jsou v půdním roztoku,

2) u potenciální reakce  $H^+$  ionty jsou absorbovány a do roztoku se uvolňují výměnou. Podle použitého elektrolytu může být tato reakce buď výměnná, nebo hydrolytická.

#### Aktivní reakce

Aktivní reakce je způsobena volnými  $H^+$  ionty, které se do půdního roztoku uvolnily disociací z organických i minerálních kyselin, z koloidních částic apod.

#### Výměnná reakce

Vedle volných  $H^+$  iontů, které způsobují aktivní kyselost, se v půdě vyskytují i výměnně adsorbované  $H^+$  ionty, které se do roztoku mohou uvolnit výměnou za bazické ionty, pokud na půdu působíme roztokem neutrálních solí.

#### Hydrolytická reakce

Vedle výměnných  $H^+$  iontů, které lze vytěsnit roztokem neutrálních solí, jsou v půdách  $H^+$  ionty, k jejichž vytěsnění dojde až v alkalickém prostředí.

#### Okyselování půd

Jak u zemědělského, tak zejména u lesního půdního fondu převládá u našich půd reakce směrem do kyselé oblasti. Je možné konstatovat, že tyto půdy se nacházejí v humidnějších oblastech a jsou promývány slabou kyselinou uhličitou.

K okyselování půd přispívá například:

- tvorba kyseliny uhličitě při dýchání kořenů a činnosti mikroorganismů,

- odběr kationtů rostlinami s náhradou H<sup>+</sup> ionty z povrchu kořenů,
- tvorba organických kyselin, zejména silných vysokomolekulárních kyselin ze skupiny fulvokyselin,
- oxidace (např. S, ale i N),
- používání tzv. fyziologicky kyselých hnojiv – rostliny přijímají přednostně kationty a ze zbývajících aniontů vznikají minerální kyseliny (Šarapatka, 1996).

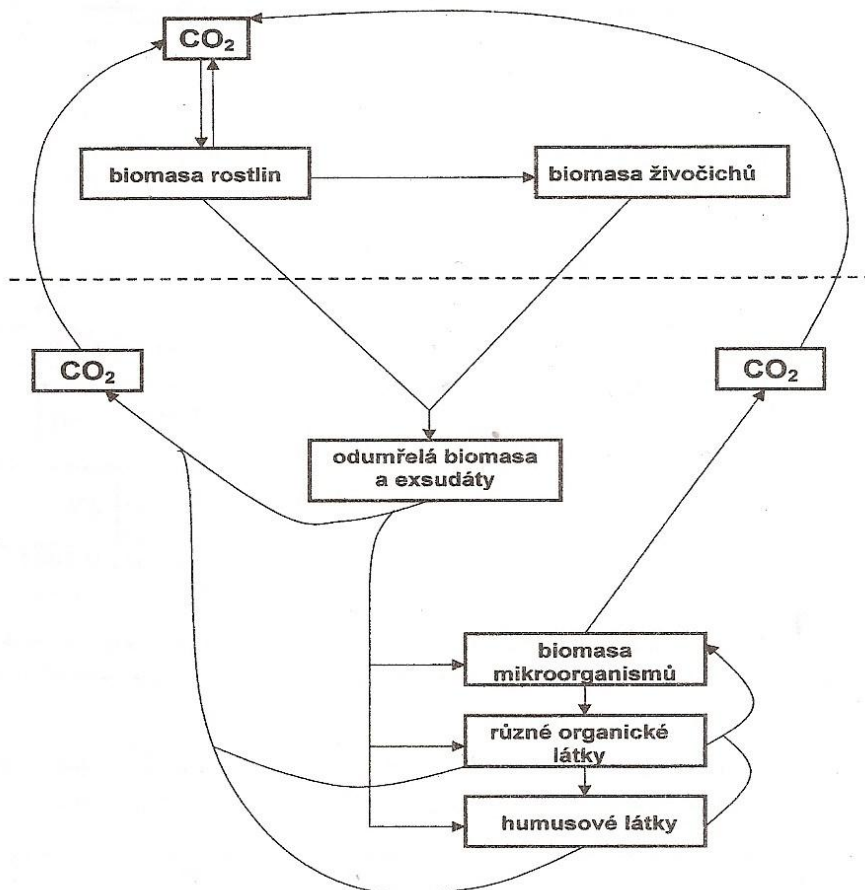
### 3.5 Uhlík

Uhlík přijímaný z atmosféry a oceánů poskytuje palivo pro většinu procesů týkajících se živé hmoty (Chapin et al., 2002). Brady et al. (2002) uvádí, že uhlík je základem všeho živého, nalezneme ho v rostlinách, u živočichů i u člověka. Podle Kutílka (2001) je obsah uhlíku v půdě pevnin asi trojnásobný oproti obsahu uhlíku v nadzemních částech vegetace. Podle jednotlivých půdních typů se obsah uhlíku mění.

Podle Amthora (1995) je přibližně 15 % atmosférického zásobníku uhlíku každoročně asimilováno suchozemskými rostlinami a přibližně stejné množství je vráceno do atmosféry v podobě CO<sub>2</sub> (Obrázek 2), a to dýcháním rostlin, rozkladem půdní organické hmoty a rostlinného opadu. Cykly uhlíku a kyslíku na Zemi jsou tedy nerozlučitelně spojeny (Schlesinger, 1997).

Obrázek 2: Propojení cyklu uhlíku v půdě s atmosférou prostřednictvím CO<sub>2</sub>

Převzato od: Ellis, Mellor, 1995



Půdní organická hmota představuje podle Šantrůčkové (2001) největší světovou zásobu uhlíku a energie v suchozemských ekosystémech. Zásoba organického uhlíku v půdě je přibližně 5x větší než zásoba v atmosféře a v živých organismech. Poměr půdního organického uhlíku je spjatý s osvojením doporučovaných technologií záviselých na půdní textuře a struktuře, srážkách, teplotě, způsobu hospodaření a hospodaření s půdou (Lal, 2004).

V cyklu uhlíku hrají mimořádnou úlohu mikroorganismy, které zabezpečují mineralizaci odumřelých tkání všech organismů. Uhlík, dusík a ostatní živiny se takto zpřístupňují pro nové organismy a tvorbu nové biomasy (Šimek, 2003). Brady et al. (2002) uvádí, že narušení koloběhu uhlíku by znamenalo katastrofu pro živé organismy.

### **3.5.1 Sequestrace uhlíku**

Spalováním fosilních paliv dochází ke zvyšování koncentrace CO<sub>2</sub> a dalších plynů, což vede ke globálním změnám klimatu. Během 19. století byla narušena rovnováha koloběhu CO<sub>2</sub> a jeho atmosférická koncentrace tedy začala stoupat (Nátr, 2000).

LeCain et al. (2002) navrhuje vyřešit tento problém sequestrací uhlíku. Jedná se o vázání atmosférického uhlíku do rostlinné biomasy během procesu fotosyntézy a následnému vázání uhlíku v půdě. Významný podíl na sequestraci uhlíku mají především lesní porosty.

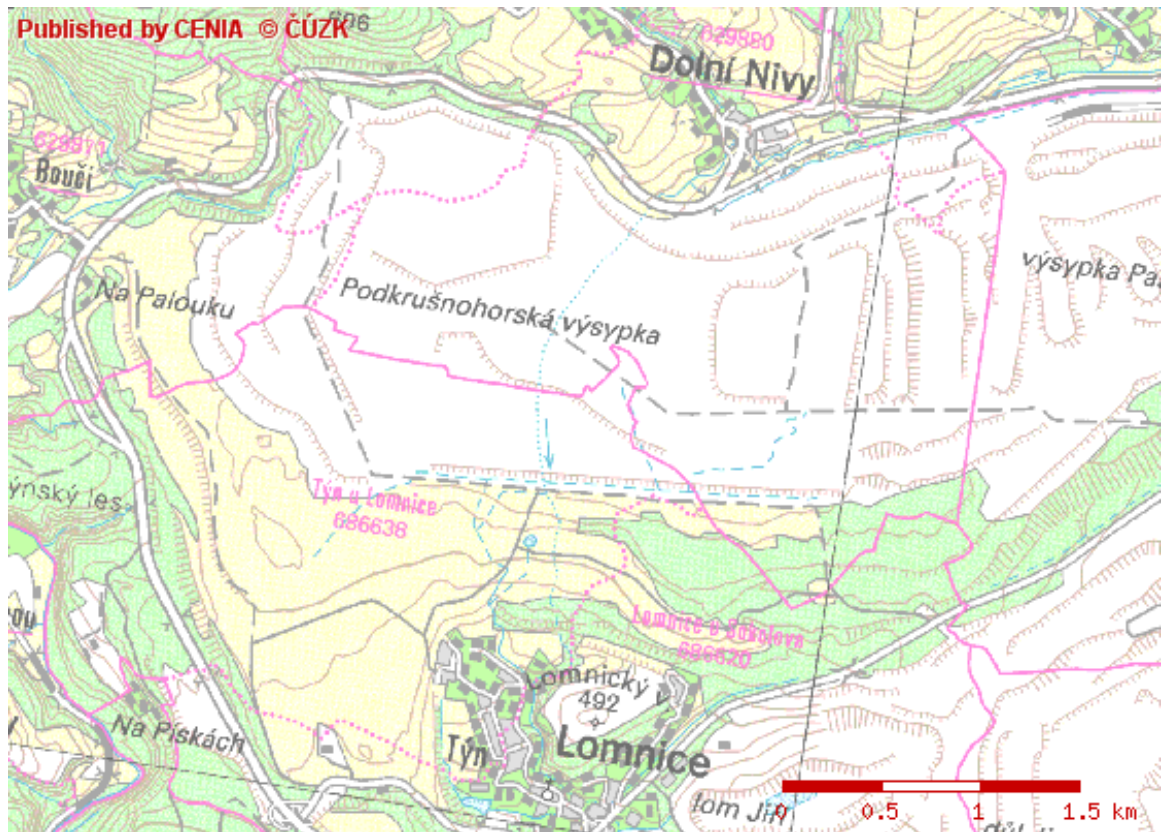
Dle Nátra (2000) je z hlediska sequestrace uhlíku nejvýhodnějším opatřením zalesňování. V podzemní biomase a v dřevní hmotě je vázáno velké množství uhlíku relativně dlouhodobě. Körner (2003) však uvádí, že zalesňování je problematické z jiných hledisek, např. se jedná o vynětí půdy ze zemědělského půdního fondu.

## **3.6 Velká podkrušnohorská výsypka**

Velká podkrušnohorská výsypka se nachází severně od Sokolova. Je obklopena několika obcemi: Vintířov, Vřesová, Lomnice, Dolní Nivy, Horní Rozmyšl a Stará Chodovská (Mapa 1).

Mapa 1: Velká podkrušnohorská výsypka

Převzato z: [http://www.cenia.cz/\\_C12571B20041F1F4.nsf/index.html](http://www.cenia.cz/_C12571B20041F1F4.nsf/index.html)



Piha et al. (1995) uvádí, že výsypky hluchiny z povrchové těžby hnědého uhlí představují rozsáhlá území, kde došlo k devastaci celých ekosystémů. Vzniklá krajina není chráněna před nežádoucími vlivy prostředí, které způsobují např. vodní erozi a s tím související vyplavování látek. Působení těchto nežádoucích vlivů musíme snížit nebo jim zcela zabránit.

Tvorba výsypek a jejich rekultivace začíná vlastním vytvořením tělesa výsypky. Substrát z nadloží uhelných slojí je pásovými dopravníky dopraven na vybrané místo. Na Velké podkrušnohorské výsypce se používá technologie zakládání prstů pomocí kolejových zakladačů. Taková výsypka se ponechá 5 – 10 let bez dalších úprav, poté se urovná povrch a podle vypracovaného plánu rekultivací se provede samotná rekultivace. Speciální technologické postupy jsou vypracovány pro klasické rekultivace, nelze je však použít univerzálně. Je nutné vždy přihlídnout ke

specifickým charakteristikám každé oblasti. Jedná se hlavně o klimatické podmínky, nadmořskou výšku nebo kvalitu substrátu (Štýs et al., 1981).

Podle Vráblíkové et al. (2008) se lesnická rekultivace využívá tam, kde nejsou vhodné podmínky pro zemědělské využití. Nejdůležitějším faktorem pro uskutečnění lesnické rekultivace je vhodná volba druhové skladby dřevin, nejvíce by měly převažovat dřeviny původní. Dále se jedná o ošetřování porostu a probírky mladého porostu. Vhodnou výsadbou dřevin a keřů se zakládá trvalý lesní porost. Nepřevažuje však produkční funkce lesa, nýbrž půdoochranná či rekreační.

V rámci lesnické rekultivace jsou prováděny technické a biotechnické fáze.

#### Technická fáze:

= terénní úpravy, odstranění překážek, odvodnění, úprava vodních toků a ploch

#### Biotechnická fáze:

= zalesnění, lesní pásy, větrolamy, umístění porostů, výsadba do jamek či brázd

Lesnická rekultivace sestává ze 3 etap:

#### I. etapa: diagnostika příčin

- vytipování ploch vhodných pro zalesnění (větší svažitost – cca 30 %), horší kvalita zemin (šedé jíly s překryvem sprašových hlín)

#### II. etapa: odstranění příčin devastace

- upravení ploch k výsadbě, urovnání povrchu, odstranění překážek

#### III. etapa: výsadba dřevin

- odpovídající zemině a způsobu devastace

Štýs et al. (1981) uvádí, že k vývoji půdy a osidlování výsypek dochází samovolně bez lidské pomoci na základě mechanismů primární sukcese. Mezi dosypáním výsypky a její rekultivací uplyne 5 – 10 let, za tu dobu se na výsypkách

vyvine samovolně zajímavá biocenóza. Semenáčky náletových dřevin se uchytávají převážně v místech lokálních depresí, protože poskytují lepší mikroklimatické podmínky pro jejich vývoj, především se jedná o vyšší vlhkost. Podle Bradshawa (1983) je však v mnoha případech samovolná sukcese pomalá. Důvodem bývá častá toxicita substrátu výsypek (vysoký obsah těžkých kovů, extrémně nízké pH) a nedostatek základních živin.

### **3.6.1 Vývoj a tvorba půdy na výsypkách**

Sklenička (2003) uvádí, že tvorba a vývoj půdy jsou jedním ze základních předpokladů obnovy ekosystémů na výsypkách. Po nasypání jsou výsypky tvořeny holým substrátem, který je mrtvý. Neobsahuje žádnou organickou hmotu a půdní organismy a povrch není kryt žádnou vegetací. V tomto substrátu nalezneme pouze zbytky fosilních kousků uhlí. Půda není dosud vytvořena.

Dle Vaculíka (1983) ovlivňuje půda svými vlastnostmi pohyb vody a dalších látek. Sorpcí či uvolňováním živin vytváří prostředí pro růst rostlin a vývoj organismů. Má funkci významného rezervoáru a probíhá zde mnoho procesů spojených s koloběhem látek. Mezi nejdůležitější procesy patří fixace vzdušného dusíku, dekompozice mrtvé organické hmoty a vznik humusu.

Mezi nejvýznamnější faktory ovlivňující vznik a vývoj půdního profilu patří dle Štýse et al. (1981) matečná hornina, klima, reliéf, typ vegetace a s tím související množství a kvalita opadu, aktivita půdních organismů a člověka. Odum (1977) uvádí, že působením půdotvorných faktorů na půdotvorný substrát dochází ke členění původního jednolitého substrátu na jednotlivé horizonty půdního profilu. Dle Vaculíka et al. (1983) se na vzniku půdy podílejí dva procesy. Jedná se o fyzikální, chemické a biologické zvětrávání a o humifikaci.

K fyzikálnímu zvětrávání dochází u vrchních vrstev půdotvorného substrátu vlivem teploty, erozí nebo přemísťování a ukládáním materiálů vodou, větrem a ledem. Při tomto typu zvětrávání dochází k rozpadu horniny beze změny



v chemickém složení. Vytvořené hrubé úlomky se rozpadají v písek a dále na jemný prach.

Dalším typem je chemické zvětrávání, při kterém dochází ke změnám fyzikálních i chemických vlastností hornin. Výsledným produktem chemického zvětrávání je v našich oblastech půdní jíl.

Posledním typem je biologické zvětrávání, které probíhá v důsledku činnosti půdních organismů a vegetace. Organismy se účastní půdotvorného procesu jak mechanickým rozrušováním substrátu, tak tvorbou chemických látek. Jedná se hlavně o rozrušování organické hmoty a sloučenin půdního humusu (Ledvina et al., 2000).

Němeček et al. (1990) uvádí, že procesy humifikace v sobě zahrnují postupné obohacování půdotvorného substrátu o organickou hmotu a vytváření sloučenin půdního humusu.

## **4. METODIKA**

### **4.1 Vlastní metodický postup**

Pro možnost stanovení dlouhodobého procesu sequestrace nebo mineralizace půdního uhlíku byl základním krokem výběr reprezentativních území. Ta byla vybrána tak, aby se jednalo o oblasti se shodnými klimatickými, geologickými a pedologickými charakteristikami.

#### **4.1.1 Odběr vzorků pro základní pedologický rozbor**

V roce 2008 byl proveden odběr půdních vzorků pomocí Kopeckého válečků (neporušený půdní vzorek) na níže zmíněných stanovištích. Odběry byly provedeny z vrchních 10 cm půdního profilu, u lesních půd byla před odběrem samotným odstraněna nadzemní humusová vrstva. Celkem bylo odebráno 7 vzorků základních (lokalita S1 – S7) na území výsypky a 3 zkušební (KL, KB, KO), které byly odebrány mimo území výsypky. (Mapa 2). Analyzovány byly základní pedologické veličiny, objemová hmotnost, zrnitost a půdní uhlík.

Lokalita S1 - zemědělská rekultivace - travní porosty

Lokalita S2 - jehličnatý les - borovice - věk < 5 let

Lokalita S3 - listnatý les - olše - věk < 5 let

Lokalita S4 - listnatý les - olše - věk > 30 roků

Lokalita S5 - jehličnatý les - borovice – věk > 30 roků

Lokalita S6 - paseka - počáteční fáze sukcese

Lokalita S7 - listnatý les - přírodní dědictví - věk > 30 roků

KL - referenční plocha - travní porosty

KB - referenční plocha - jehličnatý les - borovice

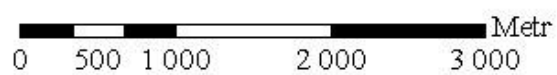
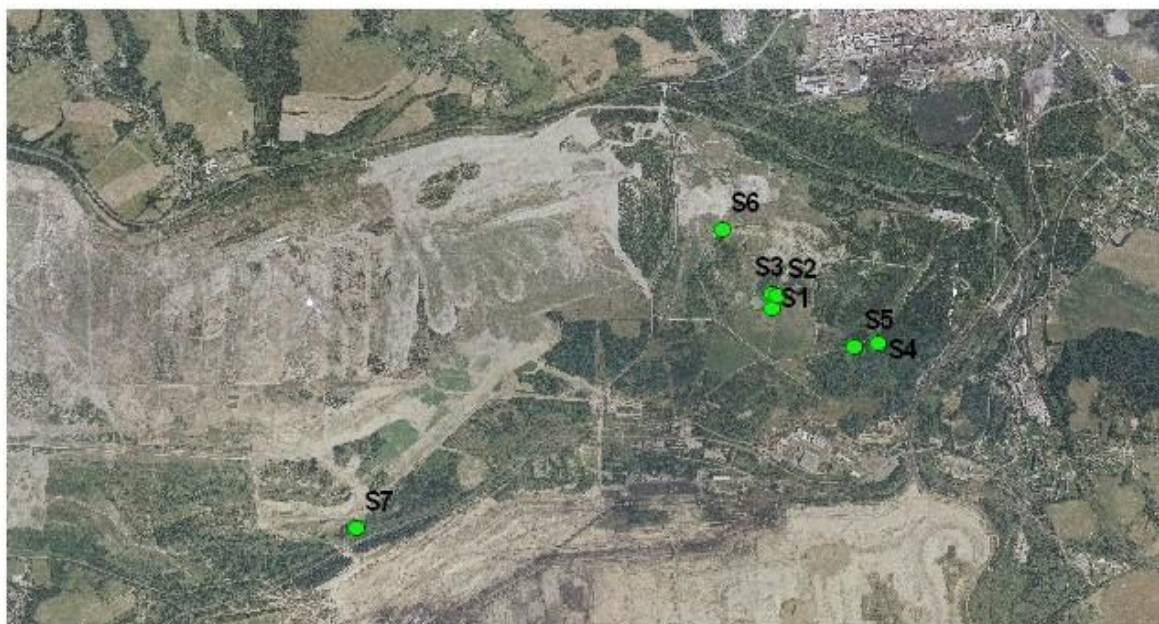
KO - referenční plocha - listnatý les – olše

Mapa 2: Odběrová místa

Velká podkrušnohorská výsypka - odběrová místa



KBKL  
KO



#### 4.1.2 Základní zpracování půdních vzorků

Vzorky byly v laboratoři vysušeny na vzduchu bez přímého účinku slunečních paprsků (AD frakce). Z vysušených půdních vzorků se odstranily větší částice skeletu, rostlinné a živočišné zbytky a vzorky se následně homogenizovaly. Částice skeletu větší než 2 mm se oddělily při prosívání sítím o velikosti otvorů 2 mm. Odvážená část (~2g) AD frakce byla sušena v sušárně při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti (OD frakce). Pro vodné výluhy byla používána AD frakce, stanovený obsah látek byl přepočítán na obsah těchto látek v sušině.

### 4.2 Stanovení půdního uhlíku

V odebraných vzorcích půdy byly přístrojem FORMACS<sup>HT</sup> TOC/TN ANALYZER; fa Skalar – CARBON Instruments s.r.o. (Obrázek 3) měřeny hodnoty TC (celkový uhlík) a IC (anorganický uhlík).

Obrázek 3: Přístroj FORMACS<sup>HT</sup> TOC/TN ANALYZER; fa Skalar – CARBON Instruments s.r.o.

Převzato z: <http://www.skalar.com/page/formacs-series-toc-tn-analyzers>



#### 4.2.1 Stanovení TC (celkový uhlík)

Vzorek je nastříknut pomocí integrovaného dávkovače do vysokoteplotního reaktoru. V reaktoru je při 950°C (kobaltový katalyzátor) veškerý organický a anorganický uhlík oxidován na plynný CO<sub>2</sub>. Katalyzátor zabezpečuje úplnou oxidaci. Proud vzduchu nese tyto produkty do detektorů, do infračerveného detektoru, kde je stanoven CO<sub>2</sub>.

#### 4.2.2 Stanovení IC (anorganický uhlík)

Druhý nástřik vzorku se provede do nízkoteplotního kapalinového reaktoru, v kyselém prostředí (2% kyselina fosforečná) při laboratorní teplotě je veškerý anorganický uhlík převeden na CO<sub>2</sub>. Proud vzduchu transportuje oxid uhličitý do IR detektoru pro měření.

Organický uhlík je počítán z rozdílů výsledků měření při nízké a vysoké teplotě:

$$\text{TOC} = \text{TC} - \text{IC}$$

#### 4.2.3 Použité chemikálie

Hydrogenftalan draselný C<sub>8</sub>H<sub>5</sub>KO<sub>4</sub>, zásobní roztok **TC** 1000 mg C/l (1 ml = 1 mg C) - 2,125 g C<sub>8</sub>H<sub>5</sub>KO<sub>4</sub> se rozpustí v 1 l destilované vody

Uhličitán sodný Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, hydrogenuhličitán sodný NaHCO<sub>3</sub>, zásobní roztok **IC** 1000 mg/l (1 ml = 1 mg C) - 4,415 g Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + 3,5 g NaHCO<sub>3</sub> do 1 l destilované vody

Pracovní roztok TC – 100 mg C/l - 10 ml základního roztoku TC; doplnit do 100 ml destilovanou vodou.

Pracovní roztok IC – 100 mg C/l - 10 ml základního roztoku IC; doplnit do 100 ml destilovanou vodou.

Pracovní roztok TN – 100 mg N/l - 5 ml základního roztoku TN<sub>A</sub> + 5 ml základního roztoku TN<sub>B</sub>; doplnit do 100 ml destilovanou vodou.

#### 4.2.4 Pracovní postup

Před vlastním stanovením se provozuschopnost přístroje ověřuje slepým stanovením a stanovením se standardním roztokem. Do přístroje se podle pokynů výrobce dávkuje stejné objemy vzorků a standardních roztoků, každé stanovení se opakuje nejméně třikrát. Z těchto hodnot se vypočítá průměr, k výpočtu koncentrace uhlíku ve vzorku se použije kalibrační křivka.

#### 4.2.5 Kalibrace

K přípravě kalibračních roztoků se používají pracovní roztoky (viz. Chemikálie) dávkované podle očekávaného koncentračního rozsahu uhlíku a dusíku ve vzorku. Kalibrační roztoky se připravují tentýž den.

### 4.3 Výpočet zásoby uhlíku

Výpočet zásoby uhlíku byl proveden dle vzorce (MEERSMANS, 2010):

$$C_{pool} = \rho \frac{SOC}{1000} h \left( 1 - \frac{G}{100} \right)$$

$C_{pool}$  = zásoba uhlíku [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

$\rho$  = objemová hmotnost půdy [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

SOC = koncentrace organického uhlíku [ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

$h$  = hloubka půdy (0,1 m)

$G$  = obsah hrubozrnných částic (%)

Veškerá získaná data byla statisticky zpracována programem Statistica CZ 6.

## 5. VÝSLEDKY

Tabulka 3 udává naměřené hodnoty přístrojem. Na všech lokalitách převládá organický uhlík (SOC), což je dáno i stářím porostu. Čím starší porost je, tím méně anorganického uhlíku obsahují půdy a stoupá množství SOC.

Tabulka 3: Hodnoty TC (celkový uhlík), IC (anorganický uhlík), TOC (organický uhlík) z různých lokalit

	TC	IC	TOC
	%	%	%
S1	3.5	0	3.5
<b>S2</b>	<b>4.82</b>	<b>0.18</b>	<b>4.64</b>
<b>S3</b>	<b>4.44</b>	<b>0.28</b>	<b>4.16</b>
<b>S4</b>	<b>10.24</b>	<b>0.25</b>	<b>9.99</b>
<b>S5</b>	<b>7.12</b>	<b>0.2</b>	<b>6.92</b>
S6	4.22	0.6	3.62
<b>S7</b>	<b>12.1</b>	<b>0.04</b>	<b>12.06</b>

V tabulce 4 jsou uvedeny hodnoty základních pedologických analýz z jednotlivých lokalit – SOC, objemová hmotnost a zrnitost. V tabulce jsou též uvedeny výpočty zásoby uhlíku –  $C_{POOL}$ .

Zásoba uhlíku se v mladém porostu (věk < 5 let) pohybuje okolo  $1,29 \text{ kg.m}^{-2}$ , ve starším lese (věk > 30 let) se pohybuje okolo  $4,39 \text{ kg.m}^{-2}$  a v přírodním dědictví (lokalita S7 – listnatý les, věk > 30 let) je celková zásoba uhlíku  $5.4 \text{ kg.m}^{-2}$ . Lokalita S1 (zemědělská rekultivace – travní porosty) není uvedena, neboť na tuto lokalitu byla dovezena vrstva ornice z jiných zemědělsky využívaných míst. Jedná se tedy o jiný proces rekultivace. Lokalita S6 (paseka – počáteční fáze sukcese) obsahuje historický uhlík, hodnota zásoby uhlíku sloužila pro odečet historického uhlíku z ostatních lokalit.

Ze stanovišť, kde je listnatý les, se nejlépe vyvíjí půdy v lokalitě S7, kde zásoba uhlíku skoro trojnásobně překročila zásobu uhlíku v kontrolním území KO. Též půdy z lokality S4 mají výborný vývoj, zásoba uhlíku je dvakrát vyšší než zásoba uhlíku v kontrolním stanovišti KO.

Ze stanovišť, kde je les jehličnatý, se nejlépe vyvíjejí půdy v lokalitě S5, kde zásoba uhlíku dosáhla již poloviny zásoby uhlíku v kontrolním území KB.

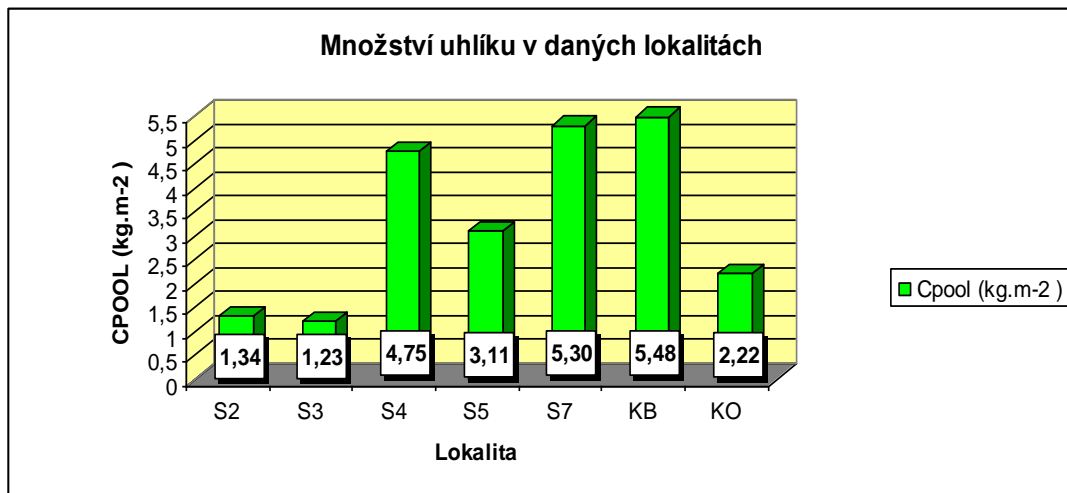
Tabulka 4: Hodnoty základních pedologických analýz z daných lokalit a výpočet uhlíku

LOKALITA	SOC (%)	$\rho$ (g.cm <sup>-3</sup> )	ZRNITOST 0,25-2,0mm (%)	C <sub>POOL</sub> (kg.m <sup>-2</sup> ) hloubka 10cm)
S1	2,61±0,14	1,24±0,13	24,27±0,51	2,47±0,40
<b>S2</b>	<b>3,52±1,03</b>	<b>1,14±0,09</b>	<b>6,07±2,03</b>	<b>1,34±1,13</b>
<b>S3</b>	<b>3,33±0,02</b>	<b>1,24±0,06</b>	<b>4,20±1,32</b>	<b>1,23±0,03</b>
<b>S4</b>	<b>8,17±2,68</b>	<b>1,02±0,03</b>	<b>20,77±6,15</b>	<b>4,75±2,17</b>
<b>S5</b>	<b>6,74±1,357</b>	<b>0,85±0,07</b>	<b>19,23±3,06</b>	<b>3,11±1,20</b>
S6	2,29±0,27	1,24±0,05	1,63±0,21	0,00
<b>S7</b>	<b>11,30±1,09</b>	<b>0,76±0,01</b>	<b>23,20±7,79</b>	<b>5,3±0,95</b>
KL	6,70±1,74	1,03±0,18	48,37±3,74	3,74±1,89
<b>KB</b>	<b>7,71±0,44</b>	<b>1,11±0,15</b>	<b>35,63±2,25</b>	<b>5,48±0,44</b>
<b>KO</b>	<b>3,65±1,38</b>	<b>0,95±0,14</b>	<b>33,57±2,02</b>	<b>2,22±0,51</b>

Z grafu 1 vyplývá, že se půdy vyvíjejí rychleji na stanovištích, kde je listnatý les. Zásoba uhlíku zde přesahuje zásobu z kontrolních stanovišť. Naopak tam, kde se nachází les jehličnatý, nejsou zásoby uhlíku tak převyšující zásobu z kontrolní lokality KB.

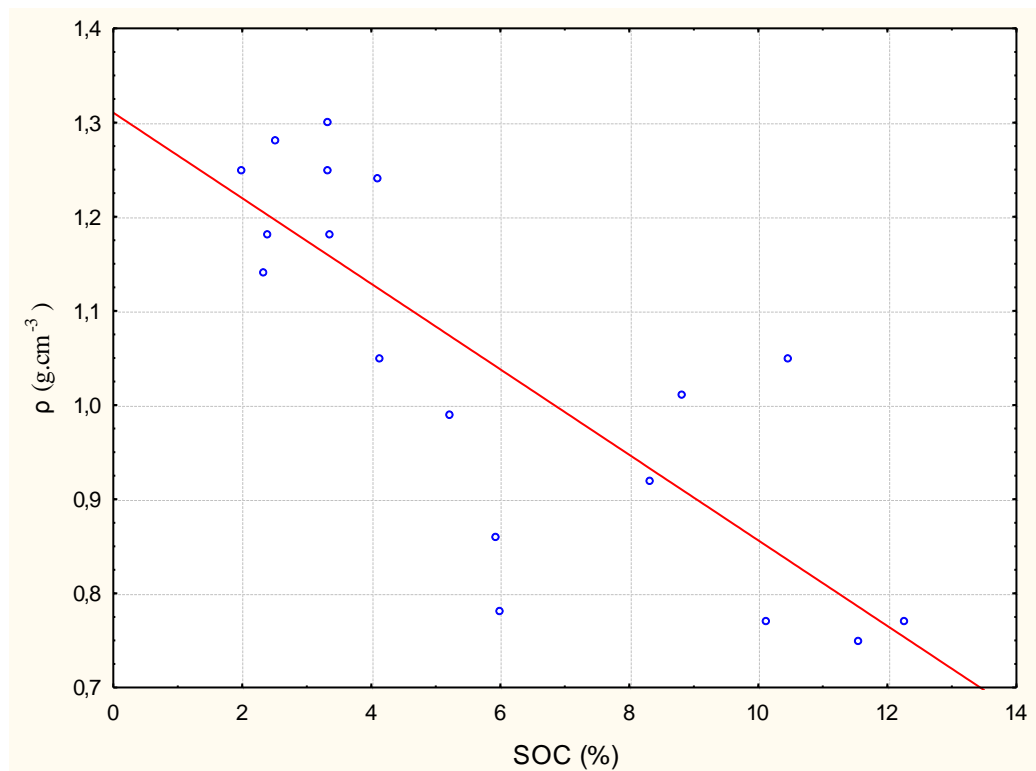


Graf 1: Množství uhlíku v daných lokalitách



Na obrázku 4 je znázorněna vzájemná korelace mezi objemovou hmotností a SOC. Je zřejmé, že se zvyšujícím se množstvím SOC v půdě dochází ke snížení objemové hmotnosti.

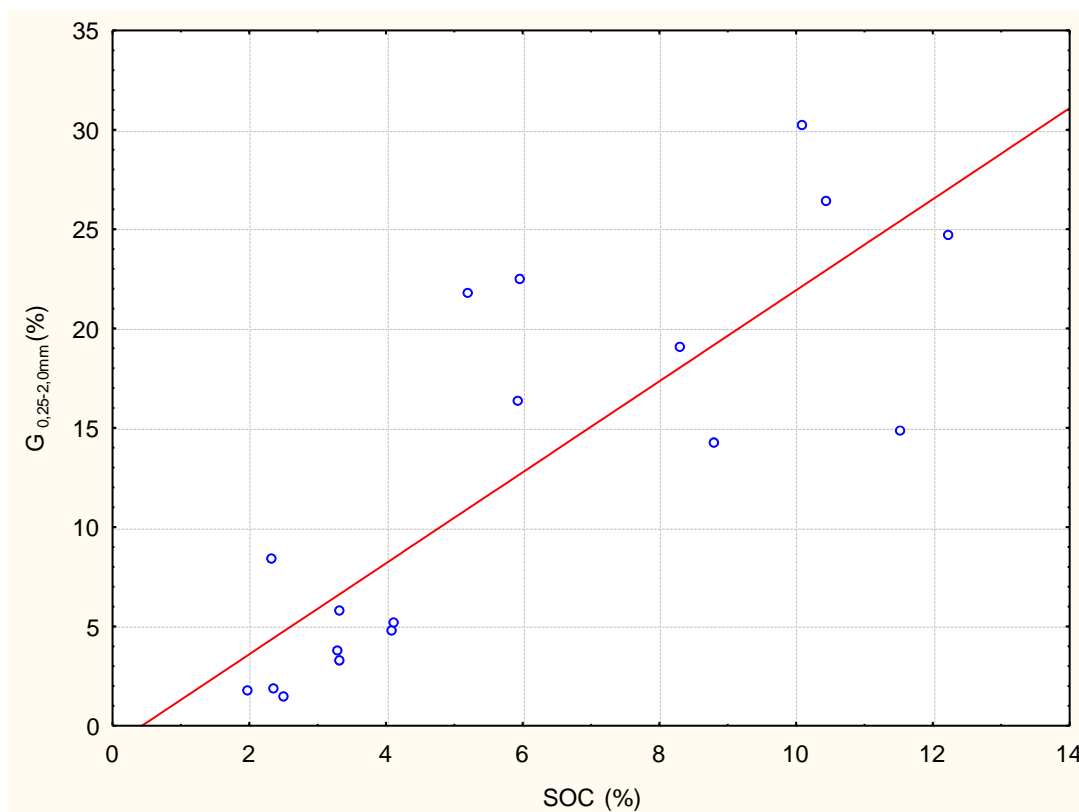
Obrázek 4: Vzájemná korelace organického uhlíku a objemové hmotnosti



SOC:  $\rho: r^2 = 0,6455; r = -0,8034, p < 0,5; y = 1,31047178 - 0,0454189095 * x$

Na obrázku 5 je znázorněna vzájemná korelace SOC a hrubozrnné frakce. Je zřejmé, že se zvyšujícím se množstvím SOC v půdě dochází ke zvyšující se zrnitosti půdy.

Obrázek 5: Vzájemná korelace organického uhlíku a hrubozrnné frakce



$$G_{0,25-2,0\text{ mm}} = -0,9853 + 2,2908 \cdot x$$

$$r^2 = 0,6686; r = 0,8177, p < 0,5; y = -0,985271784 + 2,29083695 \cdot x$$

## 6. DISKUSE

Rekultivované plochy Velké podkrušnohorské výsypky byly bezprostředně po svém vzniku tvořeny jen mrtvým substrátem. Po lesnické rekultivaci olšemi a borovicemi došlo k vytvoření zapojeného lesního porostu. Vývoj porostu zajistil přísun organické hmoty a živin do ekosystému, přispěl ke zlepšení mikroklimatických podmínek a tím k rozvoji půdních organismů (Frouz et al., 2001). Rusek (2000) uvádí, že činností půdních organismů byly postupně vytvořeny organické vrstvy nadložního humusu. Došlo k akumulaci organické hmoty v půdě a k jejímu promíchání s minerálními částicemi půdy. Také došlo ke změnám ve fyzikálních vlastnostech půdy, jako je objemová hmotnost a zrnitost, tedy její hrubozrná část. Ke změnám došlo v důsledku tvorby půdní organické hmoty a činností organismů.

Podle Begona et al. (1997) je organická hmota v opadové vrstvě postupně osidlována organismy, které se podílejí na mineralizaci. Napomáhají také tvorbě stabilnějších a hůře rozložitelných sloučenin humusu. Rychlost mikrobiálního rozkladu je z velké části ovlivňována kvalitou mrtvého organického materiálu. Kvalitní mrtvý organický materiál souvisí s množstvím dusíku, tedy poměrem uhlíku a dusíku (C:N), a se zastoupením snadno a hůře rozložitelných organických sloučenin.

Větší množství organického uhlíku bylo zjištěno v olšových porostech. Souvisí to s aktivitou symbiotických bakterií, které jsou schopny prostřednictvím kořenových hlízek vázat vzdušný dusík. Dochází tak obohacování půdy sloučeninami dusíku (Kremer, 1995). Cyklus uhlíku a dusíku na sebe vzájemně působí. Organická hmota může porostu dodávat dusík, avšak rostlinné zbytky mohou někdy dostupnost dusíku omezovat. Důležitý je poměr C:N, který se používá jako indikátor množství uhlíku a dusíku v organické hmotě. Pro dostatečně rychlý rozklad je nejlepší poměr 25:1. Při poměru 10:1 dochází k vyrovnání mineralizace a využívání rostlin mikroorganismy (Vance et. al., 1987).

Dostupnost dusíku je tedy primární, neboť ho potřebují bakterie k rozkladu organického materiálu. Poměr C:N umožňuje mineralizaci, která nastává působením dalších organismů, hlavně bakterií, hub a aktinomycet

(<http://www.agronavigator.cz/>). Díky symbióze plísni je v olšových porostech dostatek dusíku pro mineralizaci a probíhá tak rychleji rozklad organického materiálu. Do půdy se tímto způsobem dostává větší množství uhlíku než u borových porostů chudších na dusík. Olšové porosty mají také rychlejší vývoj než borovice. V olšových porostech proto probíhá rychleji koloběh látek, olše potřebují větší množství živin pro rychlejší růst a i fotosyntéza je oproti borovým porostům rozdílná. Díky tomu se do půdy dostává kořenovým systémem větší množství exsudátů, v našem případě se jedná hlavně o uhlík. Olše též každý rok opadá a do půdy se dostává více organického materiálu než u borovic, který je mikroorganismy přeměňován na organickou hmotu. Listnatý opad je obecně snadněji rozložitelný než jehličnatý, obsahuje nízké množství těžko rozložitelného ligninu v listech (Wedderburn & Carter, 1999).

Dále bylo zjištěno, že s větším množstvím organického uhlíku dochází v půdách ke snížení objemové hmotnosti. Svědčí to o zlepšování fyzikálních vlastností půdy, jako je struktura a pórovitost. Šarapatka (1996) uvádí, že vyšší objemová hmotnost je obvykle dána nižším obsahem organických látek, tvorbou agregátů a tedy utužeností půdy. Znamená to, že s vyšším obsahem organických látek dochází k vylehčování půd.

Dalším jevem, kromě snižování objemové hmotnosti, je závislost uhlíku a hrubozrnné frakce. Byla zjištěna vzájemná souvislost mezi množstvím organického uhlíku a hrubozrnné frakce půdy. To zásadně ovlivňuje fyzikální a chemické vlastnosti půdy. Hrubozrnná frakce půdy (0,25 – 2 mm) se označuje jako písek. Písek zajišťuje dobrou drenáž půdy. Voda mezi částicemi se rychle vsákne, za sucha však písčité půdy snadno vysychají. Při vysokém obsahu písku jsou půdy dobře propustné. Znamená to však, že voda v určité hloubce narazí na nepropustnou vrstvu půdy a je odvedena na jiná místa, kde se může dostat do vodního řečiště, nebo může dojít až k dočasnému lokálnímu zamokření půdy. Písčité půdy se též vyznačují dostatečným provzdušněním.

Vlivem textury půdy na obsah uhlíku v půdě se zabývá Plante et al. (2006). Zjistili, že s rostoucím podílem jílu v půdě roste i množství uloženého uhlíku. Výzkum byl však zaměřen pouze na organickou hmotu, která se váže na jemný jíl.

Begon et al. (1997) uvádí, že změny ve fyzikálních vlastnostech půdy souvisejí s akumulací organické hmoty. Podle Frouze et al. (2001) souvisí také s rozrušováním substrátu kořeny rostlin a významnou měrou také s aktivitou společenstva půdních organismů, především půdní makrofauny. Ta se svou činností podílí na rozrušování půdotvorného substrátu, provzdušňování půdy, promíchávání minerálních částic s organickými a tvorbě organominerálního komplexu.

## 7. ZÁVĚR

Na rekultivovaném území Velké podkrušnohorské výsypky byla sledována sequestrace půdního uhlíku na vybraných lokalitách. Na území, kde byla provedena lesnická rekultivace a vysazeny olšové a borové porosty, došlo během několikaletého vývoje olší a borovic k oživení původního mrtvého substrátu. V souvislosti s rozvojem vegetace došlo k vytvoření vrstvy humusu a k významné akumulaci organické hmoty v půdním profilu.

Převážná část uhlíku je uložena v organické hmotě půdy. Z výsledků vyplývá, že půdní uhlík je ve větším množství zastoupen v půdách olšových porostů. Důvodem je pravděpodobně pomalejší vývoj borových porostů, menší množství opadu a v něm obsažený těžko rozložitelný lignin. Olšové porosty mají také schopnost vázat vzdušný dusík, probíhá tak rychleji mineralizace a do půdy se může dostat větší množství organického uhlíku.

Korelaci organického uhlíku a objemové hmotnosti jsme předpokládali. Se stářím porostu přibývá organický uhlík a objemová hmotnost půdy se snižuje, dochází tak k vylehčování půd. Překvapivá však byla korelace organického uhlíku a hrubozrnné zrnitostní frakce. Výsledky ukázaly, že zvyšující se množství organického uhlíku je doprovázeno zvyšujícím se podílem hrubých zrn (písku), což zásadně ovlivňuje fyzikální a chemické vlastnosti půdy.

## 8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- Amthor J. S.** (1995): Terrestrial higher-plant response to increasing atmospheric [CO<sub>2</sub>] in relation to the global carbon-cycle. *Global change biology*, 1 (4): 243 - 274.
- Begon M., Harper J. L. & Townsend C. R.** (1997): *Ekologie: jedinci, populace a společenstva*. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, 949 s.
- Bradshaw A. D.** (1983): The reconstruction of ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 20: 1 - 17.
- Brady N. C. et al.** (2002): *The Nature and Properties of soils*. Pearson Education, New Jersey, 498 - 501.
- Coleman K., Johnston E. A., Poulton P. R.** (2009): Soil organic matter: Its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. *Advances in Agronomy*, 101: 1 - 57.
- Dimitrovský K., Kupka I.** (2006): Silvicultural assessment of reforestation under specific spoil bank conditions. *Journal of forest science*, 410 - 416.
- Ellis S., Mellor A.** (1995): *Soils and environment*. Routledge, 364 s.
- Forman R. T. T., Godron M.** (1993): *Krajinná ekologie*. Academia, Praha, 49.
- Frouz J. et al.** (2001): Soil Biota and upper soil layer development in two contrasting post-mining chronosequences. *Ecological Engineering*, 17: 275 - 284.
- Häge K. et al.** (1996): Landscaping and ecology in the lignite mining area of maritz-east. *Water, air and soil pollution*, 91: 135 - 144.
- <http://www.agronavigator.cz/default.asp?ch=15&typ=1&val=12101&ids=0>, staženo dne 28. 3. 2011.
- [http://www.cenia.cz/\\_C12571B20041F1F4.nsf/index.html](http://www.cenia.cz/_C12571B20041F1F4.nsf/index.html), staženo dne 12. 3. 2011.
- <http://www.skalar.com/page/formacs-series-toc-tn-analyzers>, staženo dne 2. 3. 2011.
- Chapin F. S. III., Matson P. A., Mooney H. A.** (2002): *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer Science and Business Media, New York, 335 - 337.
- Körner C.** (2003): Ecological impacts of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on terrestrial ecosystems. *Philosophical transaction of the Royal society of London series A: mathematical, physical and engineering science*, 361 (1810): 2023 - 2041.

- Kremer B. P.** (1995): Stromy: v Evropě zdomácnělé a zavedené druhy. Praha, Knižní klub Ikar, 287 s.
- Kutílek M.** (2001): Půda a bilance CO<sub>2</sub> v ovzduší. Vesmír, 80 (3): 153 - 155.
- Lal R.** (2004): Soil carbon sequestration impacts on climate change and food security. Science 304:1623 - 1627.
- LeCain D. R., Morgan J. A., Schuman G. E., Reeder J. D., Hart R. H.** (2002): Carbon exchange and species composition of grazed pastures and exclosures in the shortgrass steppe of Colorado. Agriculture Ecosystems & Environment, 93 (1-3): 421 - 435.
- Ledvina R., Horáček J., Šindelářová M.** (2000): Geologie a půdoznalství. České Budějovice, 203 s.
- Lhotský J. et al.** (1994): Kultivace a rekultivace půd. Praha 5 - Zbraslav, Tiskárna ÚJI, 198 s.
- Meersmans J., Wesemael B., Goidts E., Molle M., De Baets S., De Redder F.** (2011): Spatial analysis of soil organic carbon evolution in Belgian croplands and grassland, 1960 - 2006. Global change biology, 17: 466 - 479.
- Milerski R.** (2005): Nauka o krajině. VUT v Brně, Brno, 129 s.
- Nátr L.** (2000): Koncentrace CO<sub>2</sub> a rostliny. ISV nakladatelství, Praha, 257 s.
- Němeček J. et al.** (2001): Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. ČZU, VÚMOP Praha, 98 s.
- Němeček J., Smolíková L. & Kutílek M.** (1990): Pedologie a paleoekologie. Academia, Praha, 546 s.
- Odum E. P.** (1977): Základy ekologie. Academia, Praha, 736 s.
- Piha M. I. Et al.** (1995): A low input approach to vegetation establishment on mine and coal ash wastes in semi-arid regions II. Journal of Applied Ecology, 32: 382 - 390.
- Plante, A.F. et al.** (2006): Impact of Soil Texture on the Distribution of Soil Organic Matter in Physical and Chemical Fractions. Soil Science Society of America Journal 70: 287-296.
- Rajchard J. et al.** (2002): Ekologie III. České Budějovice, KOPP, 200 s.
- Rusek J.** (2000): Sukcesní vývoj půdy a ekosystémů. Živa 5, 217 - 221.
- Sáňka M., Materna J.** (2004): Indikátory kvality zemědělských a lesních půd. Planeta, XII: 11.



- Schlesinger W. H.** (1997): Biogeochemistry - an analysis of global change. Academic Press, San Diego, California, 359 - 367.
- Sklenička P.** (2003): Základy krajinného plánování. Naděžda Skleničková nakladatelství, Praha.
- Šantrůčková H.** (2001): Ekologie půdy. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 29 s.
- Šarapatka B.** (1996): Pedologie. Olomouc, Vydavatelství Univerzity Palackého, 233 s.
- Šimek M.** (2003): Základy nauky o půdě: 3. Biologické procesy a cykly prvků. České Budějovice, Johanus, 151 s.
- Šimek M.** (2005): Základy nauky o půdě: 1. Neživé složky půdy. České Budějovice, Johanus, 160 s.
- Štýs S. et al.** (1981): Rekultivace území postižených těžbou nerostných surovin. SNTL, Praha, 680 s.
- Tomášek M.** (2007): Půdy České republiky. Praha, Česká geologická služba, 68 s.
- Vaculík R. et al.** (1983): Půdoznalství II. SPN, Praha, 186 s.
- Vance E. D., Brookes P. C., Jenkinson D. S.,** 1987a: An extraction method for measuring soil micorbial biomass-C. Soil biology and biochemistry, 19, 703-707.
- Vráblíková J. et al.** (2008): Revitalizace antropogenně postižené krajiny v Podkrušnohoří: II. Část Teoretická východiska pro možnost revitalizace území modelové oblasti. Ústí nad Labem, Univerzita J. E. Purkyně, 154 s.
- Wedderburn M. E. & Carter J.** (1999): Litter decomposition by functional tree types for use in silvopastoral systems. Soil Biology and Biochemistry, 31: 455 - 461.