

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta

Katedra fyzické geografie a geoekologie



Kristýna Flašarová

Sekvestrace uhlíku a jeho zásoby v lesních půdách

Carbon sequestration and carbon stock in forest soils

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Tomáš Chuman, Ph.D.

Praha, 2013

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 20. 5. 2013

Podpis

Děkuji svému vedoucímu práce RNDr. Tomáši Chumanovi, Ph.D. za pomoc, ochotu, odborné vedení a trpělivost, které byla potřeba pro vypracování této bakalářské práce. Dále chci poděkovat mé rodině a všem, kteří mě během celého studia podporovali.

Zadání bakalářské práce

Název práce

Sekvestrace uhlíku a jeho zásoby v lesních půdách
Carbon sequestration and carbon stock in forest soils

Cíle práce

Stručná definice hlavního a případných dílčích cílů práce v rozsahu maximálně 3 řádky textu

Cílem bakalářské práce je vypracování rešerše na téma sekvestrace uhlíku a jeho zásoby v lesních půdách (rychlost sekvestrace, rozdíl dle půdního typu, vegetačního pokryvu, zásoby dle různých hloubek půdy)

Na vlastních datech je cílem srovnání rozdílů v obsahu uhlíku v různých hloubkách půdního profilu mezi bukovými a smrkovými porosty.

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

Výčet základních metodických přístupů, použitých pro úspěšné naplnění cílů, vymezení zájmového území, případně stanovení hlavních datových zdrojů, v rozsahu maximálně 10 řádek textu.

Těžiště bakalářské práce bude spočívat v rešerši literatury zaměřené na sekvestraci uhlíku. Na modelových datech bude provedeno srovnání obsahu uhlíku v různých hloubkách půdního profilu mezi bukovými a smrkovými porosty.

Využití dat:

CzechCarbo, CzechTerra, ICP Forest, FAO, NIL

Datum zadání: 11. 12. 2012

Jméno studentky: Kristýna Flašarová

Podpis studentky:

Jméno vedoucího práce: RNDr. Tomáš Chuman, Ph.D.

Podpis vedoucího práce:

Abstrakt: Sekvestrace uhlíku je jeden z velmi důležitých procesů, které probíhají v půdě. V půdě je uloženo 3 x více uhlíku než v atmosféře, z toho se podstatná část nachází v lesních půdách Severní Ameriky, Evropy a Asie. Půda má na rozdíl od biomasy schopnost uhlík dlouhodobě uložit a uchránit ho tak před rozložením a zpětným uvolněním do atmosféry. Sekvestraci uhlíku a jeho výsledné množství v půdě ovlivňuje mnoho faktorů (klíma, podloží, biologická aktivita, reliéf a využití půdy). Lesní půdy obsahují velké množství uhlíku a při vhodném hospodaření a druhovém zastoupení jsou schopny jeho množství ještě navýšit. Tato práce se, mimo jiné, zabývá problematikou měření půdního uhlíku do různých hloubek půdního profilu a výsledných rozdílů v celkovém množství uhlíku v půdním profilu. Praktická část se zabývá porovnáním množství půdního uhlíku v lesních půdách dvou hlavních dřevin českých horských lesů: bukem a smrkem. Právě v půdách horských lesů je na území České republiky největší množství půdního uhlíku

Abstract: Carbon sequestration is one of the most important processes in the soil. There is three times more carbon in soil than in the atmosphere, significant part of this soil carbon is deposited in the forest soils of North America, Europe and Asia. Soil, compared with biomass, is able to store carbon for a long time and protect it from decomposition and release back to the air. Carbon sequestration and its stock in soil are influenced by many factors (climate, bedrock, biological activity, relief and land use). Forest soils contain large amount of carbon and with adequate management and tree species composition is possible to increase final amount of soil carbon. This thesis is about, besides other things, measuring soil carbon in different depths and comparing the final results in total amount of carbon in soil. Practical part compare amount of carbon in forest soils of two main tree species in Czech mountain forests: beech and spruce, where the largest amount of soil carbon is stored in the Czech Republic.

Obsah

1. Úvod	8
2. Cyklus uhlíku	9
3. Proces ukládání uhlíku v půdě	10
4. Půdní uhlík	13
4.1. Faktory ovlivňující množství uhlíku v půdě	15
4.2. Stratigrafie půdního profilu	19
4.3. Množství uhlíku dle půdních typů	24
4.4. Množství uhlíku v různých ekosystémech	26
5. Uhlík v lesních půdách	28
5.1. Celosvětová bilance	28
5.2. Faktory ovlivňující množství uhlíku v lesních půdách	32
5.3. Uhlík v lesních půdách ČR	35
6. Vymezení a stručná charakteristika modelových lokalit, popis metodiky odběru vzorků	39
6.1. Modelové lokality	39
6.2. Metodika odběru vzorků a analýza dat	40
6.3. Výsledky	42
6.4. Diskuze	46
7. Závěr	47
8. Zdroje	48

Seznam tabulek

Tab. 1: Množství uhlíku v jednotlivých půdních typech	26
Tab. 2: Zásoby uhlíku v lesích dle regionů a subregionů v roce 2010	29
Tab. 3: Zásoby uhlíku ve světových biomech	30
Tab. 4: Vývoj v celkové zásobě uhlíku v lesích v letech 1990 – 2010	30
Tab. 5: Vývoj zásoby uhlíku v lesních půdách dle regionů a subregionů v letech 1990 – 2010	31
Tab. 6: Množství uhlíku pod různými druhy dřevin	34
Tab. 7: Celková zásoba uhlíku ve svrchních horizontech lesních půd	37
Tab. 8: Modelové lokality	40
Tab. 9: Modelové lokality a průměrný obsah uhlíku (%)	43
Tab. 10: Modelové lokality a směrodatné odchylky	43
Tab. 11: Celkový obsah C v modelových lokalitách	46

Seznam obrázků:

Obr. 1: Organický uhlík v hloubce do 1 m	9
Obr. 2: Globální cyklus uhlíku	10
Obr. 3: Koloběh uhlíku na úrovni ekosystému	13
Obr. 4: Závislost množství uhlíku v půdě na hustotě výskytu žížal	16
Obr. 5: Formy nadložního humusu	22
Obr. 6: Humusová forma na území ČR	23
Obr. 7: Schéma půdního profilu černozemě a nížinného podzolu	26
Obr. 8: Zásoba organického uhlíku v půdách	29
Obr. 9: Koncentrace uhlíku v půdách evropských lesů	33
Obr. 10: Množství uhlíku v nadložním humusu dle druhu dřevin	35
Obr. 11: Množství uhlíku v organominerálním horizontu dle druhu dřevin	36
Obr. 12: Bilance uhlíku v lesních půdách	36
Obr. 13: Stanovení zásob uhlíku v lesních ekosystémech	38
Obr. 14: Obsah C _{ox} v půdě (do 10 cm)	39
Obr. 15: Modelové lokality	40
Obr. 16: Modelové lokality a průměrný obsah uhlíku za celý profil (%)	45
Obr. 17: Obsah C v horizontu OL+OF (%)	45
Obr. 18: Obsah C v horizontu OH (%)	45
Obr. 19: Obsah C v hloubce 0 – 10 cm (%)	46
Obr. 20: Obsah C v hloubce 10 - 20 cm (%)	46
Obr. 21: Obsah C v hloubce 20 - 40 cm (%)	46
Obr. 22: Obsah C v hloubce 40 - 80 cm (%)	46

1. Úvod

Uhlík je základní stavební kámen veškerého života na Zemi. Nachází se v atmosféře, v rostlinách, v živočiších, v neživé organické hmotě, ve fosilních palivech, v horninách a také rozpuštěný v oceánech. Uhlík je šestý nejhojnější prvek ve Vesmíru, po vodíku, heliu, kyslíku, neonu a dusíku (Hillel 2005).

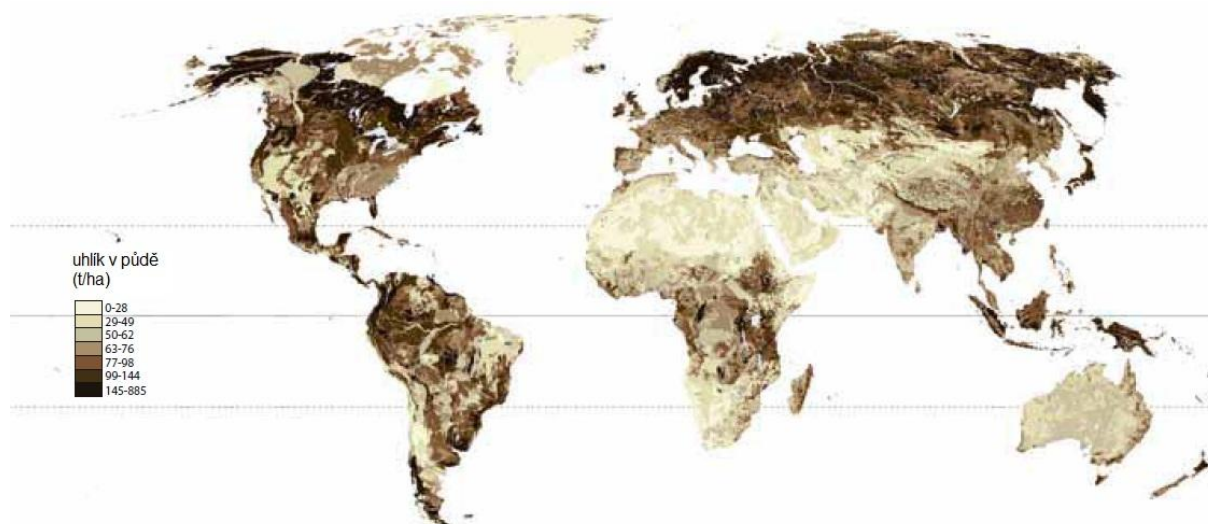
V současné době se slovo „uhlík“ skloňuje čím dál častěji. Důvodem je stále rostoucí množství oxidu uhličitého v atmosféře, který má jakožto jeden z hlavních skleníkových plynů významný podíl na globálním oteplování, asi 47 % (Forster a kol. 2007). Dne 9. 5. 2013 množství CO₂ v atmosféře přesáhlo hranici 400 ppmv (400,03 ppmv, NOAA 10. 5. 2013). Což je nejvyšší koncentrace za posledních 2,1 mil let (Hönish a kol. 2009).

Obsah CO₂ v atmosféře střídavě klesal a rostl dle dob ledových a meziledových, ale nikdy nedosáhl takových hodnot jako dnes. Množství CO₂ fluktovalo v glaciálech mezi 172 – 180 ppmv (100 000letý cyklus dob ledových) a 213 ppmv (40 000letý cyklus), naopak v interglaciálech bylo množství CO₂ srovnatelné u obou cyklů (283 ppmv pro kratší cyklus a 260 - 300 ppmv pro delší) (Hönish a kol. 2009).

Tyto okolnosti dostaly problematiku CO₂ do popředí zájmu nejen vědeckého, ale i politického. Zejména od přijetí Kjótského protokolu se začaly řešit možnosti sekvestrace uhlíku. Vzhledem k faktu, že půda celosvětově obsahuje ve svrchním metru půdního profilu okolo 2 000 Pg uhlíku (ve 2 metrech asi 2 500 Pg), což je 3x více než v atmosféře, a při vhodném hospodaření se jeho zásoba může ještě zvýšit, se jeví zkoumání půdy z hlediska sekvestrace uhlíku jako velmi přínosné (Robert 2002).

Z rozmístění zásob půdního uhlíku na Zemi (obr. 1) je patrné, že jeho výsledné množství v půdě ovlivňuje více faktorů. Jedním z hlavních faktorů je lesní pokryv a typ vegetace. Největší množství uhlíku se nachází v lesních půdách Severní Ameriky a Eurasie. Relativně hodně uhlíku je i v úrodných půdách euroasijských stepí a severoamerických prérií. Naopak překvapivě tropické deštné lesy Afriky, Jižní Ameriky a Jihovýchodní Asie jsou na uhlík, vzhledem k objemu biomasy, poměrně chudé.

V rešeršní části své práce jsem se věnovala cyklu uhlíku, průběhu ukládání uhlíku v půdě, faktory, které ovlivňují sekvestraci, a množství uhlíku v lesní půdě, jak ve světě, tak v České republice. Cílem praktické části bylo srovnání koncentrace uhlíku v půdě v různých hloubkách pod dvěma hlavními typy dřevin v lesích nad 700 m n. m. na území České republiky; smrkem a bukem. Smrk tvoří 79,3 % lesů nad 700 m n. m. a buk 11,3 % (Černý 2010).



Obr. 1: Organický uhlík v hloubce do 1 m

Zdroj: UNEP 2012

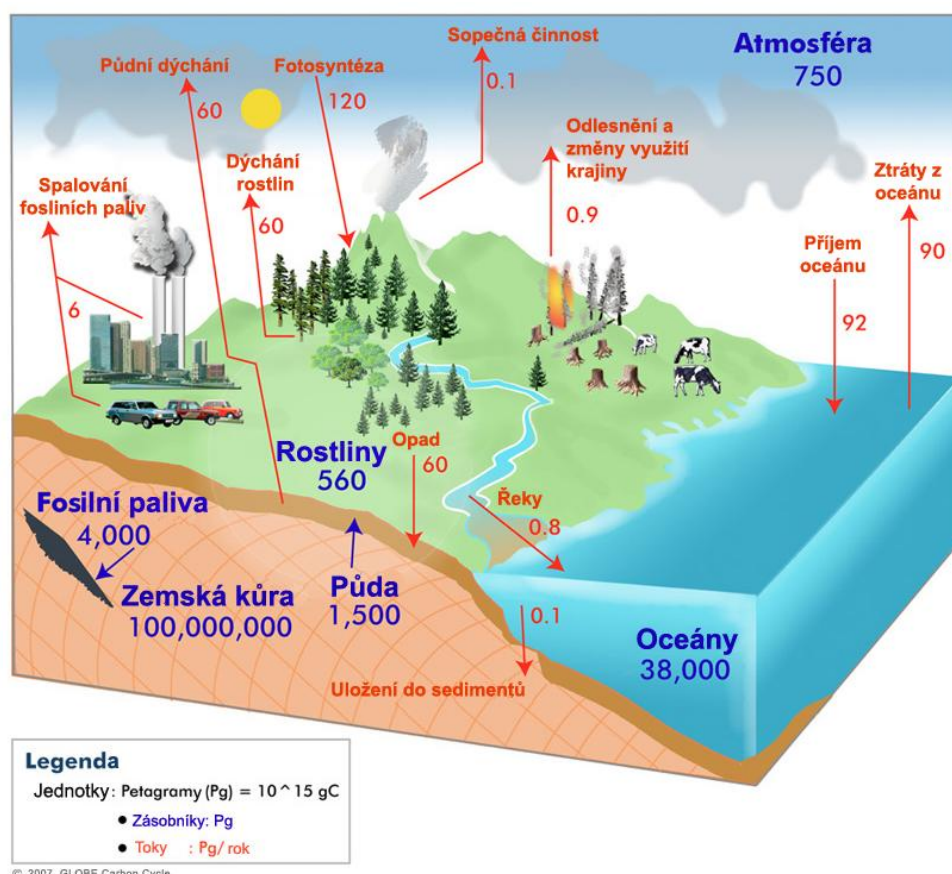
2. Cyklus uhlíku

Množství CO_2 v atmosféře se odvíjí od teploty oceánu a jeho schopnosti pohlcovat CO_2 . Ve studené slané vodě se CO_2 lépe rozpouští, tudíž studený oceán absorbuje více CO_2 . Teplé oceány naopak CO_2 uvolňují. Rozpuštěný CO_2 se pak může dále vázat zejména na vápník a v podobě karbonátových sedimentů se dlouhodobě ukládat. Mezi atmosférou a oceánem je výměna nejintenzivnější a nejrychlejší. Ročně si mezi sebou vymění 90 Pg v každém směru. Výměna CO_2 mezi vzduchem a vodou trvá v řádech dnů, naopak proces ukládání uhlíku v podobě sedimentů či fosilních paliv trvá desítky spíše stovky tisíc let. Zásoby anorganického uhlíku v oceánech jsou 50x větší než v atmosféře. Hromadí se zejména v hlubokých vodách chladných oceánů, kde je od opětovného vypaření zpět do atmosféry chráněn vrstvou lehčí sladší vody, kde nedochází k tak velké výměně CO_2 . Než se takto hluboce uložený rozpuštěný CO_2 dostane zpět k hladině, může tento proces trvat desítky až stovky let (Falkowski a kol. 2000). Proto často nekoreluje zvyšující se teplota se zvyšujícím se množstvím CO_2 v atmosféře (Hönish a kol. 2009).

Velmi rychle také dochází k výměně CO_2 mezi terestrickými ekosystémy a atmosférou. Díky fotosyntéze se CO_2 přeměňuje na organický uhlík, který se ukládá do rostlinné hmoty (120 Pg/rok). Rostliny jsou velmi důležitým úložištěm uhlíku (560 Pg), přičemž 37 % je fixováno v lesích tropického pásma (Marek 2011). Uhlík se uvolňuje z rostlin zpět do atmosféry zejména respirací a přírodními disturbancemi, např. požáry (Falkowski a kol. 2000).

Po odumření rostlinné hmoty se uhlík dále ukládá v půdě, která je po oceánu druhým největším úložištěm uhlíku v přímém kontaktu s atmosférou. Většina odumřelé rostlinné hmoty v půdě je díky činnosti mikroorganismů během několika let rozložena a uhlík je v podobě CO₂ uvolňován zpět do atmosféry (Heimann, Reichstein 2008). Se zvyšující se teplotou a vlhkostí se zvyšuje uvolňování uhlíku z půdy, nejvíce půdního uhlíku je tedy uvolňováno v tropickém pásmu, kde panují ideální podmínky pro rozvoj mikroorganismů (Schlesinger, Andrews 2000).

Globální cyklus uhlíku (obr. 2) je však za posledních 200 let značně narušen činností člověka, který během chvíle dokáže enormně změnit pochody probíhající tisíce let např. spalování fosilních paliv a odlesnění (Falkowski a kol. 2000). Další dramatickou změnu v cyklu uhlíku může přinést globální oteplování, které by mohlo způsobit oživení permafrostu a uvolnit až 400 Pg uhlíku uloženého v hluboce zmrzlých půdách (Heimann, Reichstein 2008).



Obr. 2: Globální cyklus uhlíku

Zdroj: Projekt koloběh uhlíku 2007

3. Proces ukládání uhlíku v půdě

Organický uhlík se kumuluje v půdě ve svrchních organominerálních horizontech a v horizontech nadložního humusu ve formě opadanky v různých stádiích rozkladu (Schulze, Freibauer 2005). Organická hmota se do půdy dostává různými způsoby. Hlavním zdrojem jsou rostliny, zejména opad nadzemních částí (listí). Velký podíl má rovněž i odumřelá podzemní biomasa (kořeny). Tato organická hmota je zpracována vyššími organismy, jako jsou savci, hmyz, žížaly a další bezobratlí, a rozkládána činností půdních mikroorganismů na humusové látky, minerální látky a další organické látky, které se dále mohou a nemusí rozkládat. Nejrychlejší fáze rozkladu probíhá krátce po odumření biomasy. Půdní mikroorganismy začnou velmi rychle rozkládat organickou hmotu, jež je pro ně zdrojem energie a živin. Takto jsou ovšem rozkládány jen nejsnáze rozložitelné látky jako jsou bílkoviny, škrob a celulóza, které tvoří základní složku potravy mikroorganismů. Poté se rychlost rozkladu zpomaluje a v půdě zůstávají více rezistentní kusy organické hmoty (Bohn 1985). Rychlost a průběh procesu rozkladu závisí na klimatických podmínkách. Ve vyšších nadmořských výškách je kvůli vysokým srážkám a nízké teplotě omezeno oživení půdy, které proces rozkladu viditelně zpomalí (Vaněk a kol. 2010). Během prvního roku je v půdách mírného pásu 50 – 80 % organické hmoty úplně rozloženo (Bohn 1985). Úplné rozložení organické hmoty v aerobním prostředí se nazývá mineralizace, při které vzniká hlavně voda a CO_2 , dále pak CH_4 , NH_3 , H_2S , SO_2 a minerální látky (Prát 1964). Při těchto rozkladných procesech se uvolňuje asi 10x více oxidu uhličitého než při spalování fosilních paliv člověkem (Frouz 2010). CO_2 v půdě může reagovat s vodou a vytvářet H_2CO_3 , z té pak vznikají uhličitany - vápenatý, draselný, hořečnatý či sodný. Tyto anorganické sloučeniny uhlíku jsou velmi stabilní zejména v aridních oblastech (Brady, Weil 2008). Plynné produkty mineralizace jsou uvolňovány do atmosféry nebo jsou vyluhovány do podzemních vod (Schulze, Freibauer 2005). Okysličení je velmi důležité pro vznik humusu a také usnadňuje jeho mineralizaci. Pokud však má být humus uchován před dalším rozkládáním, je potřeba anaerobního a vodního prostředí (např. rašeliniště) (Prát 1964). Výměna uhlíku mezi atmosférou, rostlinami a půdou je znázorněn na obr. 3.

Tvorba humusu je velmi složitý proces. Organickou hmotu v půdě tvoří různé organické sloučeniny, které se rozkládají různými procesy. Například lignin (dřevní hmota) je mikroorganismy velmi obtížně a pomalu rozkládán. Proto můžeme v půdě najít úlomky dřeva starého i 1 000 let (Bohn 1985). Oproti tomu jednoduché molekuly sacharidů (škrob, celulóza) a bílkovin jsou stěžejním zdrojem energie pro mikroorganismy a jsou rozkládány velmi rychle. Rozklad dalších látek (pryskyřice, vosky) vyžaduje složitější enzymatické a chemické procesy a proto nejsou rozkládány tak rychle (Bot, Benites 2005). Všechny tyto

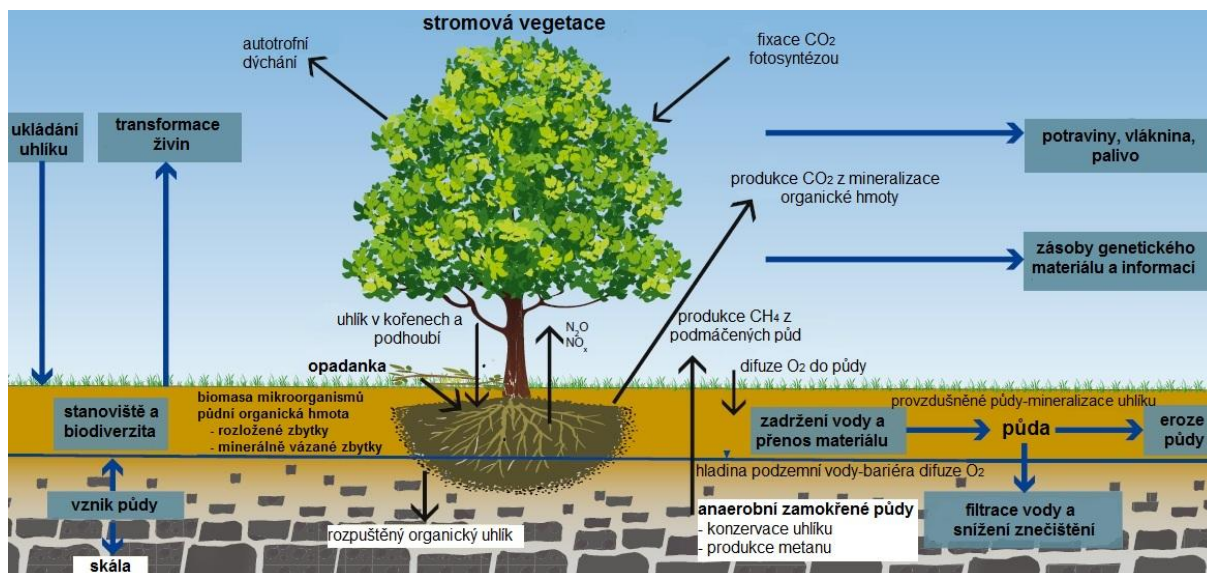
látky slouží jako zdroj živin pro půdní mikroorganismy, které je přetvářejí na humusové látky (Bohn 1985).

Humifikace je jeden z nejdůležitějších a nejsložitějších procesů probíhajících v půdě. Dle tradičního rozdělení vznikají při humifikačním procesu dvě hlavní humusové kyseliny; fulvokyseliny a huminové kyseliny. Fulvokyseliny mají světlejší barvu, nižší obsah uhlíku (44 až 48 %) a jsou snadno rozpustné ve vodě, což zvyšuje jejich mobilitu. Vzhledem ke své kyselosti dokážou tvořit i hořečnaté, vápenaté, železité a hlinité soli, které jsou pak vyplavovány do spodních horizontů. Huminové kyseliny jsou naopak tmavší a obsahují více uhlíku (52 až 62 %). Liší se podle podmínek vzniku a navázaných substituentů. Stavba huminové kyseliny v černozemi je složitější než v podzolu, jelikož při tvorbě molekul hraje důležitou roli kondenzace, pro kterou je příznivější střídání sucha a vlhka (Prát 1964). Huminové kyseliny jsou nerozpustné ve vodě a mají schopnost vázat se na jílové minerály a vytvářet tak organominerální komplexy, které mají významné sorpční vlastnosti k vázání živin. Další druh humusových látek je humin, což je v podstatě organominerální komplex velmi odolný vůči kyselinám, zásadám a mikroorganismům. Ten se postupem času může přeměnit v humusové uhlí a dlouhodobě se tak uchovávat v půdě (Vrba, Huleš 2006).

Toto dělení humusových látek na huminové kyseliny, fulvokyseliny a huminy je na základě rozpustnosti ve vodě. Nevyjadřuje tak jejich chemické vlastnosti a složení. Složení humusových látek je natolik různorodé, že je velmi složité je rozdělit a zařadit. Jelikož humusové látky pochází z rostlinných zbytků nebo jsou produktem metabolických procesů či kombinací obojího, je jejich podoba ovlivněná vegetací, klimatickými podmínkami, topografií a dalšími faktory (Piccolo 2001). V dlouhém řetězci humusových látek můžeme najít molekuly uhlovodíků, peptidů, lipidů nebo esterů, které jsou spojeny vodíkovými můstky a Van der Waalsovými silami (Hayes a Clapp 2001). Sutton a Sposito (2005) popsali humusové látky jako supramolekulární asociáty s rozeznatelnými biomolekulami, které se liší molekulovou hmotností.

Dle rychlosti rozkládacích procesů můžeme rozdělit organickou hmotu na aktivní, pasivní a pomalu se rozkládající. Aktivní organická hmota snáze podléhá rozkládacím procesům, jedná se především o čerstvou organickou hmotu, bohatou na nerozložené látky. Tato hmota vykazuje vyšší podíl uhlíku než dusíku (C:N=15-30). Celkově se podílí na organické hmotě 10 – 20 % a rozloží se během prvních dvou let. Pasivní organická hmota je hlouběji uložena v půdě, obsahuje již rozložené organické látky, konkrétně humin a huminové kyseliny. Tvoří 60 – 90 % organické hmoty a poměr uhlíku a dusíku je 7 – 10. Doba úplného rozložení se pohybuje ve stovkách až tisících let. Pomalu rozkládající se hmotu tvoří lignin a další pomalu

rozložitelné složky, které podlehnou rozkladu za desítky let. Tato složka organické hmoty je velmi důležitá pro výživu rostlin, zejména je zdrojem dusíku (Brady, Weil 2008).



Obr. 3: Koloběh uhlíku na úrovni ekosystému

Zdroj: UNEP 2012

4. Půdní uhlík

Uhlík se vyskytuje v půdě v mnoha podobách. Je součástí organické hmoty v půdě, což je převážně nadzemní (listy, jehličí, větvičky) a podzemní biomasa (kořeny, houbová vlákna) v různém stádiu rozkladu a půdní mikroorganismy (bakterie, viry, prvoci, řasy, houby, hmyz, a jiní bezobratlí), které tvoří zhruba 5 % půdní organické hmoty (Bot, Benites 2005) Uhlík je dále součástí humusových látek, organických i anorganických sloučenin a může se v půdě vyskytovat i samostatně. Formy uhlíku můžeme rozdělovat na základě různých parametrů. Jako první rozdělení se nabízí: organický uhlík a anorganický. Organický uhlík zahrnuje veškerou organickou hmotu v různých stupních rozkladu, detrit nadložního humusu a odumřelé kořeny zasahující do hlubších horizontů. Anorganický uhlík může pocházet z karbonátových matečních hornin, z atmosférických srážek (HCO_3^-), z tvrdé podzemní vody, či může vzniknout pedogenetickými karbonizujícími procesy (Stolbovoi 2002). Dále se v literatuře můžeme setkat s pojmy jako SOM (soil organic matter), SOC (soil organic carbon), DOC (dissolved organic matter).

Termín SOM lze přeložit jako půdní organická hmota nebo humus. Je to soubor všech odumřelých organických látek rostlinného a živočišného původu s minerálním podílem smíšených či nesmíšených (Valla a kol. 2007). Dle Baldocka a Skjemstada (1999) je SOM „Veškerá organická hmota nalezená v půdě bez ohledu na původ nebo stav rozkladu“. Druhé definici se podobá i definice od Bradyho a Weila (2008), která rozděluje půdní organickou hmotu na tři základní složky: 1. živá biomasa, zahrnující půdní mikroorganismy, neporušená rostlinná pletiva a živočišné tkáně. 2. odumřelé kořeny a další rozpoznatelné rostlinné zbytky nebo opad. 3. amorfni a koloidní směs organických látek, u kterých již není tkáň/pletivo rozlišitelné, což lze definovat jako humus (Brady, Weil 2008). Půdní organická hmota se skládá z různých prvků C, H, O, N, P a S. Protože je obtížně měřitelná v ohledu na množství konkrétních prvků, zavádí se pojem SOC, v české literatuře C_{ox} , což je množství oxidovatelného uhlíku. Metody stanovení uhlíku se liší. Můžeme je rozdělit na metody stanovení na suché cestě; ztráta žíháním nebo elementární analýza, kdy se uhlík spaluje při různých teplotách. Druhý typ stanovení množství oxidovatelného uhlíku jsou metody stanovení na mokré cestě; chromsírová metoda a metoda Walkley-Black, kdy je uhlík oxidován během reakcí s různými chemikáliemi (Valla 2007).

DOC označuje rozpuštěné organické látky z organické hmoty ve vodě, zahrnují se sem zejména humusové kyseliny (Davies a Ghabbour 2000). Ač rozpuštěný uhlík netvoří dominantní podíl celkového množství uhlíku v půdě, je velmi důležitý díky své vysoké mobilitě. Takto rozpuštěný uhlík se dostává i do větších hloubek, kde může ovlivňovat půdotvorné pochody.

Obsah organické hmoty v půdě je základním ukazatelem kvality půdy. Je základní podmínkou biologické aktivity půdy a zásadně ovlivňuje fyzikální a chemické vlastnosti půd. Většina studií zabývajících se půdním uhlíkem, jejichž cílem je kvantifikace zásob uhlíku v půdě (FAO, CzechTerra, CzechCarbo, LULUCF), vychází z měření zásob či koncentrací ve svrchních 30 cm půdního profilu, u lesních ekosystémů včetně nadložního humusu. U většiny půdních typů je v této části profilu soustředěno největší množství uhlíku. Takovéto údaje mohou být však zavádějící, hlavně v našich zeměpisných šířkách, kde humusové horizonty černozemí a černic dosahují až 60 cm. Podobné je to u glejů a stagnoglejů, které mají hluboké humusové horizonty v různém stupni zrašelinění. Některé podpovrchové horizonty (B) jsou také bohaté na uhlík, například humusoseskvioidické horizonty (B_{hs}) podzolů, obsahující až 30 % humusu, mohou být i 40 cm hluboko. Rovněž přechodný horizont B_t u šedozemí je velmi bohatý na uhlík. Nejvýraznější rozdíl v množství uhlíku při měření do 30 cm a při měření v celém profilu najdeme u kolvizemí, které však nejsou mapované. Díky akumulovaným humusovým horizontům mohou dosahovat hloubky až několika metrů (Marek 2011).

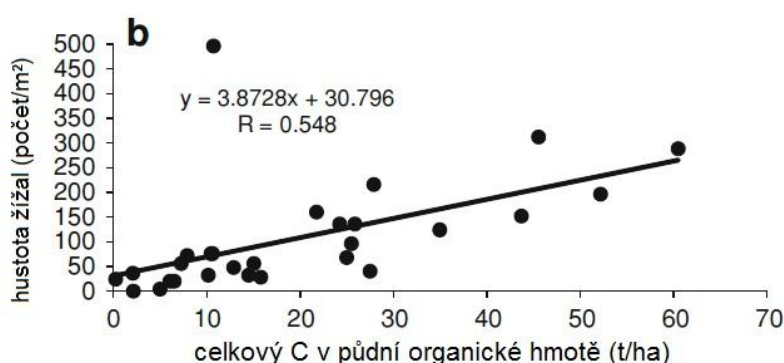
4.1. Faktory ovlivňující množství uhlíku v půdě

Množství uhlíku v půdě ovlivňuje mnoho faktorů. Nejvíce je to množství a složení vegetace, klimatické podmínky (teplota a vlhkost), vliv reliéfu (orientace svahu) a půdní vlastnosti a znaky (sorpční vlastnosti půdy, kyselost, textura, struktura, skeletovitost půdy). U zemědělských půd vstupují do těchto procesů zejména organické hnojení a závlahy, což velmi významně ovlivňuje přírodní procesy. Míra mineralizace organické hmoty závisí na teplotě a množství kyslíku při oxidaci, využití půdy, systému hospodaření a péči o půdu (Marek 2011).

Klimatické podmínky se jeví jako stěžejní faktor pro množství uhlíku v půdě. Primárně určují teplotu a vlhkost. Sekundárně tyto faktory ovlivňují i strukturu a množství biomasy. S rostoucími srážkami zpravidla roste i množství organické hmoty v půdě. Pokud je však půda převlhčená a z aerobního prostředí se stává anaerobní, nedochází tolik k mineralizaci organické hmoty a rozkladací procesy se zpomalují, až zastavují, v půdě pak zůstává velké množství nerozložené organické hmoty (Bot, Benites 2005). Například množství biomasy dopadající na povrch půdy je v tropických lesích 2 kg/m^2 , v lesích mírného pásu 1 kg/m^2 a v pouštích a tundře jen $0-0,1 \text{ kg/m}^2$ (Bohn 1985). Klimatické podmínky určují rovněž rychlost rozkladu organické hmoty, tj. biologickou aktivitu v půdě. V tropickém pásu (Nigerie) i v mírném pásu (Anglie) má rozklad podobný průběh. V tropickém pásu však probíhá 4x rychleji (Bohn 1985). Takže i když je v tropických lesích 2x více odumřelé biomasy, díky rychlejšímu a dokonalejšímu rozkladu, způsobeného větším oživením půdy, je v půdě ve finále méně uhlíku než v půdě lesů mírného a pásu (Bohn 1985).

Jak již bylo napsáno výše, struktura biomasy velmi ovlivňuje složení humusu a tedy i humifikaci. Pevná pletiva, jako je dřevo, mají vyšší poměr uhlíku k dusíku na rozdíl od měkkých pletiv listů, které poskytují více nestabilního dusíku, který je důležitou živinou (Bot, Benites 2005). Některé části rostlin (jehličí, dubové listy) jsou rozkládány velmi pomalu a jen některými organismy (Bohn 1985). Pryskyřice z opadu jehličnatých stromů jsou jedovaté pro mnoho organismů a těžce rozložitelné, proto je můžeme později nacházet v rašelině či hnědém uhlí (Prát 1964). Díky pomalému rozkladu se v půdě uchovává velké množství nerozložené organické hmoty, tedy i uhlíku. Uhlík v této podobě je však nestabilní a při narušení přirozeného koloběhu ekosystému dochází k uhlíkovým ztrátám. Velké množství půdního uhlíku můžeme také najít v černozemích, kde je organická hmota dodávána do půdy ve formě kořenových komplexů travin a jiných stepních rostlin. Zde je uhlík přeměněn z organické hmoty na stabilní humusové látky a kumulován v mocném humusovém horizontu (Bot, Benites 2005).

Biologická aktivita v půdě je důležitá, jelikož kromě rozkládání organické hmoty se podílí i na provzdušnění půdy. Většina půdních organismů je vázána na aerobní prostředí. Proto je v provzdušněných půdách organická hmota rychleji a dokonaleji rozkládána (Bot, Benites 2005). Biochemickou činností mikroorganismů je podmíněn vznik mnoha sekundárních minerálů, jejichž vznik souvisí s mikrobiálním rozkladem silikátů (Smolíková 1988). Půdní organismy se však také podílí na vzniku organominerálních komplexů, jejichž pevné vazby zpomalují mineralizaci organické hmoty uložené v této podobě. K těmto půdním organismům (makrofauna) řadíme především žížaly a další bezobratlé (např. termity, stonožky, mnohonožky), kteří přijímají potravu společně s půdními částicemi, a v jejich zažívacím ústrojí dochází k mísení minerálních a organických složek. Touto činností vznikají pevné půdní agregáty, které jsou tmeleny střevními sekrety půdních organismů, a ovlivňují tak půdní strukturu (Gobat a kol. 1998). Půdní makrofauna většinu pohlcené organické hmoty nevyužije, pouze ji přetransformuje (Frouz 2010). Přítomnost půdní makrofauny z hlediska sekvestrace uhlíku je velmi důležitá. Frouz a kol. (2009) ve své studii prokázal dokonce přímou závislost mezi hustotou žížal a obsahem uhlíku v půdní organické hmotě (obr. 4).



Obr. 4: Závislost množství uhlíku v půdě na hustotě výskytu žížal

Zdroj: Frouz a kol. 2009

Podloží je po klimatických podmínkách, které určují množství biomasy v půdě, druhým nejdůležitějším faktorem. Podloží vlastně určuje i půdní znaky a vlastnosti (Bohn 1985). Každá hornina zvětrává jinak, i když může mít stejné chemické složení. Klíčovým faktorem jsou opět klimatické podmínky, ale především složení a struktura horniny. Tektonicky porušené či porézní horniny jsou náchylnější ke zvětrávání. Odolnost minerálů vůči zvětrávání je dána obráceným Bowenovo reakčním schématem. Zvětrávání rozdělujeme na fyzikální (mechanický rozpad) a chemické (chemický rozklad). Výsledkem chemického zvětrávání hornin je mimo jiné také tvorba stabilních jílových minerálů (kaolinit, illit,

montmorillonit, allofan). Kaolinit vzniká v teplém a humidním, klimatu. V chladnějším mírném klimatu se vytváří illit, na bazičtějších horninách vzniká montmorillonit a allofan na sopečném substrátu. Ve většině hornin se běžně zastoupené živce přeměňují na jílové minerály. Křemen, který je součástí většiny kyselých hornin se chemicky rozpouští jen za vysoké alkalinity podzemní vody (Kachlík, Chlupáč 2011). Součástí jílu jsou i jiné minerály (živce, karbonáty, zeolity, modifikace SiO₂, oxidy a hydroxidy železa a hliníku) a organická hmota (Weiss, Kužvart 2005). Jílovité částice jsou v půdě důležité, jelikož jsou schopné navázat huminové kyseliny a vytvořit tak velmi stabilní organominerální komplexy, jejichž vazby velmi málo reagují na klimatické změny a na změny půdního hospodaření (Prát 1964). Podloží také ovlivňuje minerální sílu půd a sorpční nasycení, tedy klíčové vlastnosti pro úrodnost půdy. Například kaolinit (hlavní jílovitý minerál v tropických půdách) má menší výměnou kapacitu než ostatní jílovité minerály a proto jsou tyto půdy chudé na stabilní organominerální komplexy, snáze podléhají mineralizaci a jejich úrodnost se rychle vyčerpá (Bot, Benites 2005). Tyto vlastnosti však nemají přímou souvislost s množstvím uhlíku v půdě, jelikož nejvíce a nejméně sorpčně nasycené půdní typy vykazují nevyšší obsah uhlíku, ale ovlivňují jeho stabilitu a druh sloučeniny v půdě.

Půdní vlastnosti a znaky jsou určeny klimatickými podmínkami a matečným substrátem. Půdními znaky, které ovlivňují množství uhlíku v půdě, jsou struktura, zrnitost a skeletovitost (Lal 2005).

Půdní struktura je dána stmelěním jednotlivých půdních částic do větších agregátů jílovou substancí, organickými látkami, sloučeninami železa aj. Velmi významným strukturotvorným činitelem je zooedafon (Tomášek 2003). Podle půdní struktury můžeme určit některé procesy probíhající v půdě (např. objemové změny půdy při střídavé vlhkosti, vliv mrazu, vliv rhizosféry). Půdní struktura také určuje infiltraci srážkové vody a její výpar (Smolík 1957).

Zrnitost půdy je dána zastoupením jednotlivých velikostně rozdílných minerálních částic. Zrnitostní složení určuje půdní druhy, které jsou dány podílem frakcí v jemnozemi (suma minerálních částic pod 2 mm v průměru). Podle V. Nováka rozlišujeme půdní druhy na písčité, hlinitopísčité, písčitohlinité, hlinité, jílovitohlinité, hlinitojílovité a jílovité. Rozdělení půdních druhů podle USDA (United States Department of Agriculture) využívá trojúhelníkového diagramu, který zahrnuje i prachové částice. Půdní druhy můžeme rozdělit na lehké, střední a těžké. (Tomášek 2003).

Nejvíce uhlíku jsou schopny akumulovat jílovité půdy, které jsou hůře okysličené, tudíž zde neprobíhá tolik intenzivní rozklad organické hmoty, roste na nich větší množství

biomasy, a hlavně mají schopnost vázat více uhlíku v organominerálních komplexech (Brady, Weil 2008).

Dalším znakem, který charakterizuje velikost frakcí v půdě, je skeletovitost. Ta udává zastoupení frakcí větších než 2 mm v půdě (s příměsí skeletu, slabě skeletovité, středně skeletovité, silně skeletovité). Velikost skeletu se pak rozděluje podle velikosti průměru frakce na hrubý písek, štěrk, kamení a bloky (Němeček 2011).

Tyto strukturní a texturní znaky určují pórovitost, provzdušnění, ovlhčení a teplotní kapacitu půdy, což má vliv na humifikaci (Lal 2005).

Půdní vlastnosti jako sorpční vlastnosti, minerální síla, poměr uhlíku a dusíku v humusu a výměnná půdní reakce jsou ovlivněny podložím a rostlinami rostoucími na dané půdě a také ovlivňují humifikaci. Tyto vlastnosti určují formu a složení humusu, poměr humusových kyselin a stabilitu uhlíku v půdě. V prostředí bohatém na bazické kationty jsou huminové kyseliny schopny vytvářet delší řetězce a po reakci s jílovitými minerály tak vázat více živin a uhlíku a vytvářet velmi stabilní sloučeniny, které nenaruší ani orba.

Kyselé prostředí ovlivňuje složení půdních mikroorganismů a může zpomalovat biologickou půdní aktivitu a rozklad organické hmoty, ale i produkci biomasy, jelikož potřebné živiny jsou navázány na fulvokyseliny a odplavovány pryč (Bot, Benites 2005).

Důležitou vypovídající hodnotu má objemová hmotnost (u našich půd 1,3-1,7 g/cm³), která vypovídá o podmínkách pro mineralizaci. Těžké zhutnělé jílovité půdy s větší objemovou hmotností mají horší podmínky pro mineralizaci než lehké písčité půdy s menší objemovou hmotností a mohou tak akumulovat více organické hmoty (Marek 2011).

Reliéf má také svůj podíl na výsledném množství půdního uhlíku. Nejvíce organické hmoty se kumulují v úpatí svahů, kam je organický materiál a humus ze svrchních horizontů deponován gravitací a erozí (Bot, Benites 2005). Severní svahy (na severní polokouli) jsou chladnější a vlhčí, takže obsahují více organické hmoty, na rozdíl do jižně orientovaných svahů. Ve vlhčích a chladnějších půdách nedochází tolik k mineralizaci organické hmoty, tudíž nedochází k jejímu úplnému rozkladu (Bohn 2005). Rozhodující faktor to může být ve vyšších zeměpisných šířkách, kde se již vyskytuje permafrost, který razantně mění vodní režim (Lal 2005).

Využití půdy má stejný význam jako typologická příslušnost půd. Pro akumulaci uhlíku jsou nejméně přívětivé zemědělsky obhospodařované půdy – pole. Nejen že mají malý přísun organické hmoty v podobě odumřelých částí rostlin, ale díky orbě dochází k odstranění horizontu nadložního humusu a k narušení humusových horizontů, půdotvorných procesů a

schopnosti akumulovat uhlík, která je tak velmi malá. Další negativní efekt na zásoby uhlíku v zemědělské půdě má větrná a vodní eroze, která vede ke snižování množství humusového horizontu (Marek 2011). V rámci studie, zaměřené na sledování změn zásob uhlíku v půdách původně lesních či travních ekosystémů na ornou půdu, bylo zjištěno, že během prvních let dochází k enormnímu poklesu organické půdní hmoty. Ač pasivní organická hmota vykazovala téměř stejné hodnoty, aktivní a pomalu rozkládající se organická hmota byla téměř odstraněna. Z aktivní organické hmoty (svrchních 25 cm) ubylo 90 % a celkový pokles organické hmoty byl okolo 16 % (Brady, Weil 2008). V globálním pohledu je mobilizace uhlíku enormní, pokud uvažujeme plochu, na které k tomu dochází. Za posledních 200 let byl nárůst pastvin v Severní Americe a Evropě enormní. V Africe, Asii a Jižní Americe se rozšiřování pastvin na úkor lesa ve velkém měřítku odehrává zejména v posledních 100 letech. Z těchto nově vzniklých zemědělských ploch ubylo od počátku kultivace 50 – 100 Pg uhlíku (Hillel 2005). Podobný negativní efekt má i vysoušení rašelinišť, kde se také naruší přirozené procesy akumulace organického materiálu (Frouz 2010). Pastviny a trvale travní porosty sice nejsou ovlivněny orbou, ale díky pasení a kosení je půdě také odepřen přísun organické hmoty, která je důležitá pro zásoby uhlíku v půdě (Marek 2011). Množství uhlíku v půdě můžeme zvyšovat ponecháním zbytků pěstovaných plodin, pěstováním víceletých plodin, střídáním pěstovaných plodin, nebo ochranou půdy před vysušováním. Naopak negativně se projeví intenzivní orba, vyjmutí celých plodin (včetně kořenů), požáry a eroze (Brady, Weil 2008). Nejvíce uhlíku jsou však schopny akumulovat lesní porosty. V severní Belgii Schauvlieghe a Lust (1999) porovnávali zásoby uhlíku na pastvině a v lesním porostu. Pastvina vykazovala zásoby 128 Mg/ha, 29 let starý les 173 Mg/ha a 69 let starý les dokonce 232 Mg/ha (Lal 2005). Toho lze využít například u zalesňování výsypek, ročně by se tak mohlo uložit 1,5 tuny uhlíku na hektar (Frouz 2010). V rámci zalesněných ploch se nejvíce půdního uhlíku nachází v jehličnatých lesích starších 25 let v mírném podnebném pásu (Liao a kol. 2011).

4.2. Stratigrafie půdního profilu

Pro názorné rozmístění obsahu uhlíku se nabízí uvést uspořádání půdních horizontů podle geneze rozkladu organické hmoty. Vzhledem k tomu, že naprostá většina uhlíku vyskytujícího se v půdě pochází z biomasy, logicky se nejvíce uhlíku v půdě nachází ve svrchních půdních horizontech, které můžeme následovně rozdělit:

Organické horizonty nadložního humusu (O)

Organické horizonty obsahují nejvíce uhlíku z celého půdního profilu. Je to dáno množstvím opadu rostlinné hmoty bohaté na uhlík, která ještě není tolik humifikována a s minerálním podílem půdy se mísí jen velmi málo (Tomášek 2003). V sušině obsahují rostliny asi 42 % uhlíku (Brady, Weil 2008). Nadložní humus obsahuje více než 20 – 30 % organické hmoty respektive více než 12 – 18 % C_{ox}.

Horizonty nadložního humusu můžeme rozdělit dle stupně rozkladu na následující 3 hlavní typy (u anhydrogenních horizontů nadložního humusu), souhrnně označeny jako O:

- **Horizont opadanky L** je nejsvrchnější organický horizont. Je tvořen téměř nerozloženým rostlinným opadem (jehličí, listí, větvičky, kůra, odumřelé části rostlin), takže je jeho původ snadno rozeznatelný. Pouhým okem je možno rozlišit druh rostliny i orgánu, ze kterého opadanka pochází.
- **Horizont drti (fermentační) F** obsahuje již částečně rozložené organické zbytky a humifikovaný materiál. Stále ještě můžeme rozeznat původ organických zbytků, které převažují nad humifikovaným materiálem.
- **Horizont měli (humifikační) H** je tvořen již silně rozloženou organickou hmotou, jejíž původ není většinou rozeznatelný. Humifikovaný materiál zřetelně převládá nad méně rozloženou organickou hmotou.

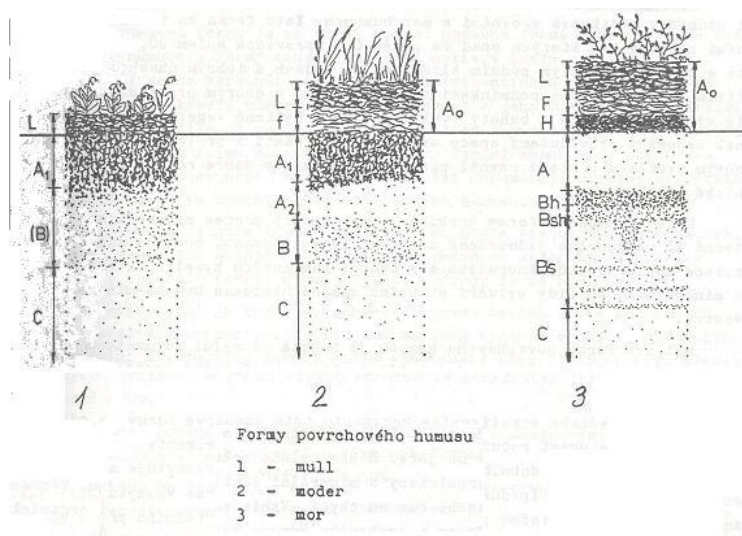
Obdobná posloupnost rozdělení horizontů nadložního humusu podle stupně rozkladu je i u zamokřených půd (organické či minerální půdy, které jsou po většinu roku zamokřeny), tyto horizonty označujeme písmenem **O** s indexem. Další horizonty určujeme u rašelinišť, kde se organické zbytky rozkládají rašeliněním v dlouhodobě převlhčeném prostředí. Tyto horizonty se vyznačují velkou mocností a vysokým obsahem uhlíku, označujeme je písmenem **T** s indexem (Němeček 2011).

V rámci nadložního humusu pak můžeme rozlišit několik forem, které mají podstatný význam při klasifikaci půd (obr. 5):

- **Mor (surový humus)** je velmi málo rozložený, tvoří ho okem rozeznatelné rostlinné zbytky. Vzniká ve vyšších polohách s chladným a vlhkým klimatem, tedy podmínkami nevhodnými pro rozklad organické hmoty. Tvoří se v silně kyselém prostředí chudém na báze, jako jsou jehličnaté porosty. K mísení rostlinných zbytků dochází jen málo, zooedafon je zastoupen roztoči a chvostoskoky. Organickou hmotu rozkládají zejména plísňe a houby. Surový humus lze snadno oddělit od minerálního podkladu.

Během rozkladu organické hmoty se tvoří především fulvokyseliny, které s dešťovou vodou (často okyselenou vlivem emisí) prosakují půdou a vytvářejí podmínky pro podzolizaci.

- **Moder (drt')** obsahuje organické zbytky již částečně rozložené. Jejich původ je ještě rozeznatelný. Moder se tvoří při méně příznivých podmínkách pro rozklad a transformaci organických látek, které jsou ale příznivější než u moru. Klima bývá vlhčí a chladnější, vodní režim nebývá vyrovnaný. Půdy jsou hůře zásobeny živinami, obsah jílu je často nižší. Slabší je provzdušnění, opad je kyselejší. Přeměna organické hmoty probíhá v kyselém prostředí za účasti zooedafonu. Žížaly buď chybějí, nebo se vyskytují jen ojediněle. Řídké jsou i hyfy hub. Mocnost humusové vrstvy narůstá vlivem pomalejší humifikace.
- **Mull (měl)** má natolik pokročilé humifikační procesy, že struktura organických zbytků je již nerozeznatelná. Je tvořen tmavě zbarvenými látkami s vyšším obsahem uhlíku. Vzniká za příznivých podmínek pro rozklad a přeměnu organických zbytků. Vytváří se zejména pod listnatými a smíšenými porosty, v mírném až teplém klimatu, při vyrovnaném vodním režimu, na hlubších provzdušněných a živinami dostatečně zásobených půdách. Bohatá přizemní vegetace poskytuje snadno rozložitelné organické zbytky – potravu pro žížaly. Intenzivní aktivita zooedafonu, bakterií a aktinomycet způsobuje rychlý rozklad a přeměnu organické hmoty. Vznikají hlavně huminové kyseliny, tvořící s minerální koloidní složkou půd stabilní sloučeniny – humáty. Uplatňují se koprogenní exkrementy, především žížal, přispívající k tvorbě krupnaté až drobtovité struktury (Tomášek 2003).

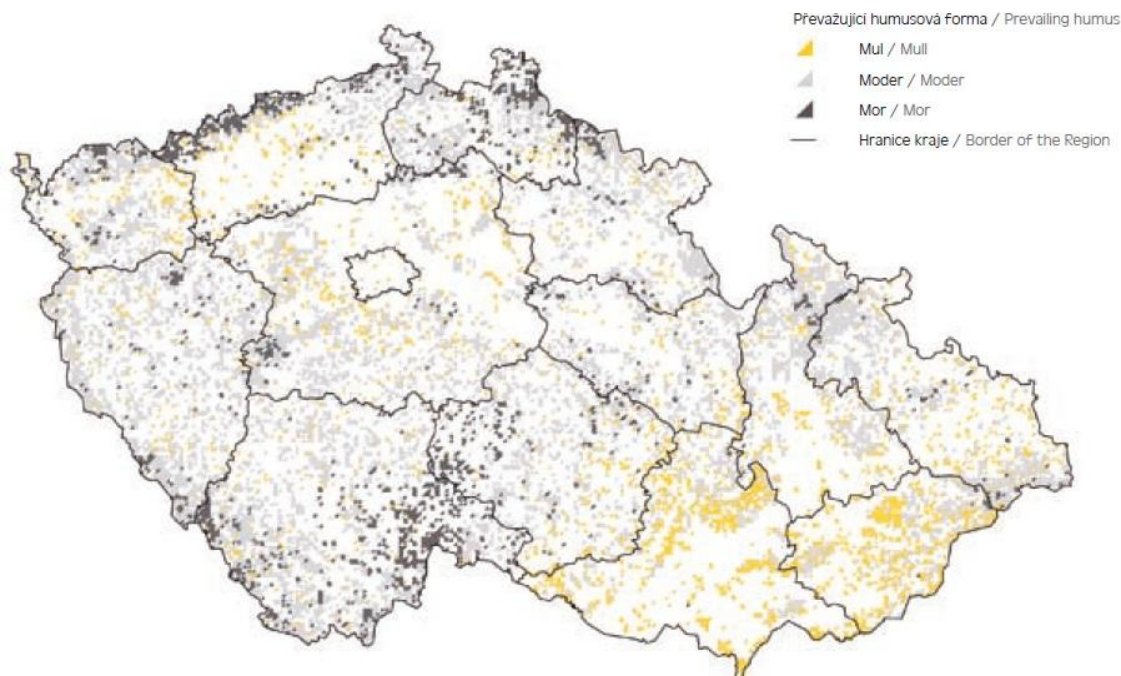


Obr. 5: Formy nadložního humusu

Zdroj: Ústav ekologie lesa 2001

Na území České republiky se vyskytuje na 69,8 % plochy moder, 18,1 % území zabírá mull a mor se vyskytuje na 12,1 % území (obr. 6) (ÚHUL 2004).

HUMUSOVÁ FORMA HUMUS FORM



Obr. 6: Humusová forma na území ČR
Zdroj: ÚHÚL 2004

Organominerální povrchové horizonty (A)

Organominerální horizonty obsahují také velké množství organické hmoty. Humifikované organické látky se vyskytují do 20 – 30 %, nerozložené do 5 %. Část humifikovaných organických látek vstupuje do vazeb s minerálními koloidy (Němeček 2011). Díky velkému obsahu humusových látek má tento horizont tmavou barvu, vyznačuje se intenzivními biochemickými pochody. Jemný detrit z rozložených organických zbytků je dokonale promísen s anorganickou půdní hmotou. Mocnost i složení se výrazně liší u různých půdních typů (Smolíková 1988). Výše uvedené faktory ovlivňující množství uhlíku ovlivňují i některé další půdotvorné procesy, které diverzifikují půdní horizonty, které pak označujeme jako diagnostické a slouží k určení jednotlivých půdních typů.

Dle Němečka (2011) můžeme organominerální povrchové horizonty dělit následovně:

Kulturní humózní horizonty (u půd ovlivněných hospodařením člověka)

- **Orniční (Ap)** - vytvořen orbou a běžnou kultivací
- **Drnový (Ad)** - vytvořen činností trvalé travní vegetace v (původně) lesní půdě
- **Antropický (Az)** - vytvořen výraznou antropogenní činností: do hloubky 0,3-0,5 m

Anhydromorfní humusové horizonty

- **Iniciální (Ai)** - mocnost do 0,05 m, obsah humusu < 1 %
- **Humózní lesní (Ah)** - mocnost do 0,1 m, rychlý pokles humusu do hloubky
- **Humózní drnový (Ad)** - u přírodních primárních (horských) travinných společenstev, pozvolné ubývání humusu do hloubky; vzniká rovněž činností trvalé travní vegetace v původní lesní půdě
- **Melanický (Am)** - mocnost > 0,1 – 0,25 m, tmavý, sorpčně nasycený, nesplňuje prvky černického ani andického horizontu
- **Černický (Ac)** - mocnost > 0,3 m, tmavý, sorpčně nasycený, na rozdíl od melanického se silně polymerizovanými huminovými kyselinami, které výrazně převládají
- **Andický (Aa)** - mocnost > 0,1 - 0,25 m, tmavý, obsah humusu > 4 %, výrazně kyprý, s dalšími andickými znaky
- **Tirsový (As)** - mocnost > 0,3 m, tmavý, sorpčně nasycený, vytvořený na těžkých smektických jílech, tvorba trhlin
- **Umbrický (Au)** – mocnost > 0,1 – 0,25 m, tmavý, sorpčně silně nenasycený, dominují fulvokyseliny
- **Koloidy ochuzený humózní horizont (Ahe)** – v jíle výrazně ochuzeném humózním horizontu nebo podzolizací ochuzeném horizontu (hrubozrnné částice s vyběleným povrchem)
- **Ochrický (Ao)** - světlý, často hluboký, s pozvolným ubýváním humusu, aridní oblasti
- **Molický** - zahrnuje pojetí Ac, Am a As horizontu při obtížích jejich rozlišení

Hydrogenní humusové horizonty

Tyto horizonty mají velmi vysoký obsah humusu (14 – 20 %), což je nad úroveň rovnovážného stavu a dochází až k rašelinění, zvýšenou mocnost (0,1 – 0,5 m) a mohou se v nich vyskytovat novotvary s Fe-Mn (bročky). Rozlišujeme je na:

- **Hydrogenní** - Ahn, Acn, Amn, Aun s bročky; Ahg, Acg, Amg, Aug bez bročeků
- **Zrašelinělý (At)** - při mocnosti do 0,25 m může mít vlastnosti horizontu T

Podpovrchové horizonty

V hlubších horizontech již zcela převládají anorganické složky, obsah uhlíku je zde zanedbatelný.

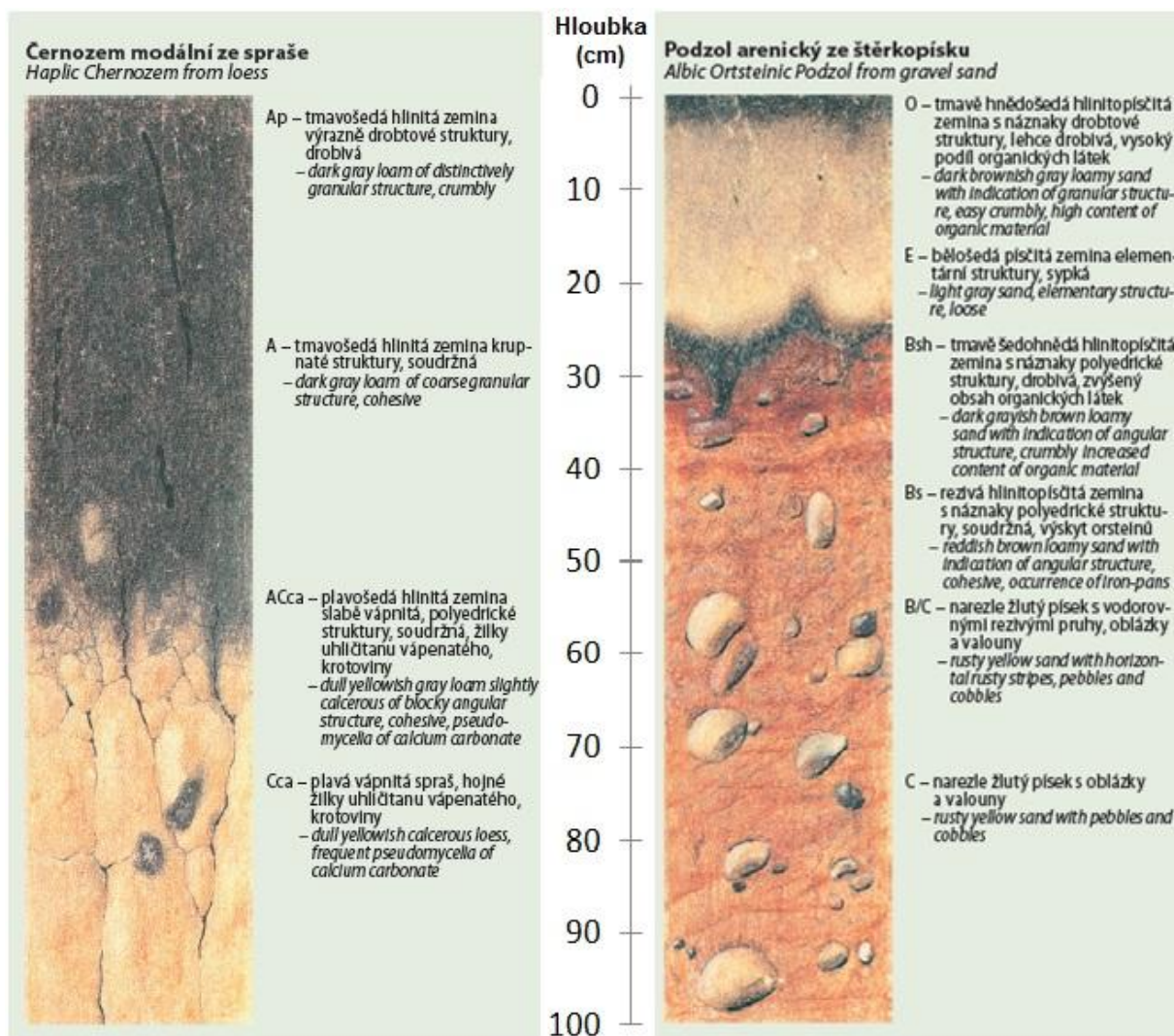
E horizont je ochuzený horizont o humusové i jílovité složky iluviací do spodnějšího horizontu, proto je zpravidla velmi světlý.

B horizont je obohacený o látky proplachované z horizontu A. Tyto sloučeniny určují barvu horizontu (hnědá – železo, tmavočervený – mangan, černošedý – humus). Pro obsah uhlíku je významný horizont **B_{hs}**, který hromadí humusové látky vyplavené z humusového horizontu, zejména fulvokyseliny (Smolíková 1988). V **B_{hs}** horizontu může být množství uhlíku ekvivalentní k humusovému horizontu. Iluviální **B_t** horizont šedozemí je také bohatý na uhlík, C_{ox} zde dosahuje 0,5 – 1 % (Marek 2011).

C horizont již neobsahuje organický uhlík, ale může být zdrojem anorganického uhlíku v případě karbonátových hornin. Složení matečného substrátu také ovlivňuje množství a zejména kvalitu humusu.

4.3. Množství uhlíku dle půdních typů

Při porovnávání množství uhlíku v jednotlivých půdních typech musíme zohledňovat hloubku měření. Jak již bylo napsáno výše, při měření pouze ve svrchních 30 cm můžeme dojít ke zcela odlišným výsledkům, než při měření v celé hloubce půdního profilu. Pro názornou představu hloubky humusového horizontu černozemě a mocnosti **B_{hs}** horizontu nížinného podzolu je uveden obr. 7, kde je **B_{hs}** horizont zakreslen v hloubce 20 – 30 cm, ale ve skutečnosti bývá ještě hlouběji. Problematikou obsahu uhlíku v **B_{hs}** horizontu nížinných podzolů se více zabývá ve svých pracích Kateřina Freyerová (2010), která vyhodnotila množství uhlíku v **B_{hs}** horizontu jako 56,4 t/ha, což by při zahrnutí celé hloubky profilu vedlo ke zdvojnásobení celkového množství uhlíku u nížinných podzolů. Pokud však poměříme půdní typy jen podle svrchních 30 cm, výsledné množství uhlíku je dáno především množstvím opadu a stupněm rozkladu organické hmoty.



Obr. 7: Schéma půdního profilu černozeť a nížinného podzolu

Zdroj: Atlas krajiny České republiky 2009

Nejvyšší hodnoty Cox vykazují ve svrchních horizontech oglejené půdy, podzoly, kryptopodzoly, některé kambizemě, smonice a černozeť. Porovnáme-li však hloubku humusových horizontů, které vykazují největší procentuální zastoupení uhlíku, jsou zde velké rozdíly v jejich mocnosti. Při propočtu celkového množství uhlíku pak získáme jiné výsledky, než když zohledňujeme pouze procentuální zastoupení uhlíku. Například černozeť vykazuje relativně vysoké zastoupení uhlíku i v hloubce 80 cm, naopak luvizem má od 20 cm hlouběji uhlíku již velmi málo. Na množství uhlíku má velký vliv i podloží, jak můžeme vidět u kambizemí na různém podloží. Hodnoty dle půdních typů za celý profil uvádí tab. 1.

Tab. 1: Množství uhlíku v jednotlivých půdních typech

Půdní typ	Horizont	Hloubka (cm)	Cox (%)
černozem na spraši	Ap	0-30	2,4
	A	30-60	2,2
	A/Cca	60-80	1,1
	Cca	80-120	0,3
černice na terasovém štěrkopísku s podložím slínovce	Ap	0-25	1,8
	A	25-50	2,1
	A/Cca	50-65	1,6
	C	65-90	0,7
smonice na vápenitém jílu	Cca	90-110	0,5
	Ap	0-20	5,8
	A	20-40	3,1
šedozezem na spraši	A/Cca	40-90	1,5
	Cca	90-120	0,2
	Ap	0-25	1,7
hnědozem na sprašové hlíně	Ac	25-40	1,7
	Bth	40-70	1
	B/C	70-130	0,5
	Cca	130-150	0,2
luvizem na sprašové hlíně	Ap	0-25	2,3
	Bt	25-65	0,5
	B/C	65-115	0,2
	Cca	115-150	0,2
pseudoglej na sprašové hlíně	Ap	0-20	1,4
	E	20-30	0,6
	E+B	30-40	0,6
	Bt	40-100	0,3
pseudoglej karbonátový na slínu	B/C	100-120	0,1
	Ap	0-20	3,4
	gor	20-45	1,2
kambizem eutotrofní na čediči	gm	45-90	0,3
	g/C	90-120	-
	A	0-25	2,8
kambizem na pararule	A/Cca	25-45	1
	Cca1	45-60	0,8
	Cca2	60-100	0,5
	A	0-30	4,8
kambizem na palaeozoické břidlici	Bv	30-55	1,7
	B/C	55-85	0,8
	C	85-120	0,4
kambizem na permokarbonském lupku	C	85-120	0,1
	Ap	0-25	1,6
	Bv	25-50	0,7
	B/C	50-70	0,7
kambizem kyselá na pararule	C	70-120	0,5
	Ap	0-18	1,6
	Bv	18-32	0,5
kryptopodzol na pararule	C	32-120	0,3
	A	0-25	3,3
	Bv	25-100	1,5
	B/C	100-140	1
podzol na pararule	C	140-150	0,8
	A	0-20	7,3
	Bs	20-45	2,8
podzol na terasovém štěrkopísku	B/C	45-50	1,1
	C	50-100	0,5
	A	0-15	5,6
	E	15-25	1,8
fluvizem na nivní uloženině	Bhs	25-30	5,8
	Bs	30-40	4,8
	B/C	40-50	0,3
	C	50-100	0,2
glej na deluviofluviální uloženině	A	0-5	5,2
	E	5-20	1,0
	Bsh	20-40	0,7
glej na deluviofluviální uloženině	Bs	40-50	0,4
	B/C	50-75	0,2
	C	75-100	0,1
glej na deluviofluviální uloženině	A	0-30	2,9
	A/C	30-50	2,5
	C1	50-80	1,7
glej na deluviofluviální uloženině	C2	80-150	0,8
	AG	0-20	31,1
	Gor	20-50	0,8
glej na deluviofluviální uloženině	Gr	50-150	0,7

Zdroj: Tomášek 2003

4.4. Množství uhlíku v různých ekosystémech

Na základě průměrných analytických hodnot obsahu Cox, uváděných pro humusové horizonty jednotlivých taxonomických půdních typů v odborné literatuře podle výsledků komplexního průzkumu zemědělských půd, s přihlédnutím k výsledkům „Bazálního monitoringu zemědělských půd“ a analýzám ÚHÚL (dílní zpráva pro CzechCarbo 2005)

byla vytvořena mapa Zásoba organického uhlíku v půdách (obr. 8), která byla publikována v Atlase krajiny České republiky. U výpočtů organického uhlíku v půdě se bralo v úvahu pouze svrchních 30 cm půdního profilu (Šefrna 2013, ústní sdělení). Nejvíce uhlíku se vyskytuje v půdách horských lesních ekosystémů (100 – 150 t/ha) a v zamokřených ekosystémech (přes 150 t/ha), v České republice jsou to rašeliniště a močály v horských oblastech a na Třeboňsku (obr. 8). Obsah organické hmoty v takovýchto rašelinných půdách může být až 100 %, pro srovnání: stepní půdy obsahují 5 – 6 % organické hmoty a pouštní písečné půdy dokonce méně než 1 %. Zamokřené a rašeliništní půdy kromě vysokého obsahu organické hmoty, mají také velkou mocnost organických horizontů (i přes 10 m). Tím se stávají velmi důležitou složkou v rámci zásob půdního uhlíku. Proces vzniku takovýchto mocných rašelinných horizontů trvá tisíce let, často i za jiných klimatických podmínek, než které panují dnes. Proto narušení lidskou činností (vysoušení, těžba) bývá pro tento typ ekosystému fatální (Bohn 1985).

Horské lesy vykazují velké množství uhlíku zejména díky nepříznivým klimatickým podmínkám pro rozklad organické hmoty a jejím hromaděním ve svrchních horizontech v podobě morového humusu. Tento uhlík však není příliš stabilní a při narušení lesního ekosystému (například těžbou) se jeho zásoby velmi rychle snižují. Velké množství uhlíku také obsahují úrodné zemědělské půdy Polabí a Moravských úvalů, tedy v oblastech černozemí (80 – 100 t/ha). Tyto zásoby uhlíku jsou velmi stabilní. Organická hmota je zde velmi dobře rozložena a vytváří mullový humus, který je bohatý na stabilní sloučeniny organominerálních komplexů. Jak již bylo řečeno výše, tyto zásoby nenaruší ani orání zemědělské půdy, což je patrné zvláště porovnáme-li mapu Zásoba organického uhlíku v půdách (obr. 8) s mapou využití krajiny nebo mapou orné půdy. Je patrné, že v těchto oblastech jsou lesy, louky a pastviny a jiné typy krajinného pokryvu, které by mohly samovolně dodávat organickou hmotu do půdy, zastoupeny minimálně. Nejnižší hodnoty vykazují půdní typy chudé na zásoby organického uhlíku (pod 30 t/ha), tj. kambizemě na fluviálních štěrkopiscích v Polabí a kambizemě na vátých písčích u Bzence v Dolnomoravském úvalu, což dokazuje, že písčité podloží je nevhodné pro ukládání půdního uhlíku, což je dáno i nízkou produkcí biomasy. Tyto oblasti jsou jak zemědělsky využívané, tak zalesněné a oba typy krajinného pokryvu vykazují stejně nízké výsledky. Kromě oblasti černozemí je většinou výskyt většího množství uhlíku v těsné souvislosti s výskytem výše položených lesů. Zajímavá anomálie se vyskytuje v jižních Čechách, kde se v Třeboňské a Budějovické pánvi vyskytuje také větší množství uhlíku (50 – 100 t/ha). Je to dáno oglejenými půdami v okolí rybníků na Českobudějovicku a v okolí Lužnice.



Obr. 8: Zásoba organického uhlíku v půdách

Zdroj: Atlas krajiny České republiky 2009

5. Uhlík v lesních půdách

5.1. Celosvětová bilance

Lesy na celém světě pokrývají přes 4 biliony ha, 31 % plochy Země (v roce 2010). Více než polovina celosvětového lesního pokryvu se vyskytuje na území 5 největších států: Rusko, Brazílie, Kanada, USA a Čína. Mezi roky 2000 – 2010 ubylo v průměru ročně 5,2 milionu ha lesního pokryvu, což je zhruba rozloha Kostariky, hlavně v tropickém pásmu a na území Austrálie. Celkově ubylo ročně 8,1 mil ha, ale přibylo 2,9 mil ha zejména díky mocnému zalesňování v Číně (FAO 2010). Ročně se v tropických oblastech uvolní 1,6 Pg uhlíku. To, co se teď děje v tropických oblastech, Evropa zažila ve středověku. V tropických oblastech nepanují pro tvorbu půd tak příznivé podmínky jako v Evropě, proto bude návrat půdního prostředí mnohem obtížnější (Oulehle, Hruška 2009). V roce 2010 obsahovala celosvětová lesní biomasa 289 Pg uhlíku, což je 44 % z celkového množství uhlíku v lesních ekosystémech (652 Pg). Ještě více uhlíku než živá lesní biomasa obsahuje lesní půda 45 %, 292 Pg (FAO 2010).

Nejvíce půdního uhlíku se nachází na území Evropy a Ruska 97 Pg (tab. 2), téměř o ¼ více než na území Jižní Ameriky (75 Pg). Naopak zásoby uhlíku v živé biomase jsou na

území Evropy a Ruska (45 Pg) méně než poloviční ve srovnání s Jižní Amerikou (102 Pg). Tento fakt není ničím překvapujícím, je dán odlišnými klimatickými podmínkami. Půdy vyšších zeměpisných šířek jsou schopny pohlcovat více uhlíku, a naopak klimatické podmínky brání většímu rozvoji rostlin, tudíž množství živé biomasy (FAO 2010).

Tab. 2: Zásoby uhlíku v lesích dle regionů a subregionů v roce 2010

Region/subregion	C v biomase		C v mrtvém dřevě a opadu		C v půdě		C celkem	
	miliony t	t/ha	miliony t	t/ha	miliony t	t/ha	miliony t	t/ha
	Východní a Jižní Afrika	15 762	58,9	3 894	14,6	12 298	46,0	31 955
Severní Afrika	1 747	22,2	694	8,8	2 757	35,0	5 198	66,0
Západní a Střední Afrika	38 349	116,9	3 334	10,2	19 406	59,1	61 089	186,2
Afrika celkem	55 859	82,8	7 922	11,7	34 461	51,1	98 242	145,7
Východní Asie	8 754	34,4	1 836	7,2	17 270	67,8	27 860	109,4
Jižní a Jihovýchodní Asie	25 204	85,6	1 051	3,6	16 466	55,9	42 722	145,1
Západní a Střední Asie	1 731	39,8	546	12,6	1 594	36,6	3 871	89,0
Asie celkem	35 689	60,2	3 434	5,8	35 330	59,6	74 453	125,7
Evropa	12 510	63,9	3 648	18,6	18 924	96,6	35 083	179,1
Evropa + Rusko	45 010	44,8	20 648	20,5	96 924	96,4	162 583	161,8
Karibik	516	74,4	103	14,8	416	60,0	1 035	149,2
Střední Amerika	1 763	90,4	714	36,6	1 139	58,4	3 616	185,4
Severní Amerika	37 315	55,0	26 139	38,5	39 643	58,4	103 097	151,8
Severní + Střední Amerika	39 594	56,1	26 956	38,2	41 198	58,4	107 747	152,7
Oceánie	10 480	54,8	2 937	15,3	8 275	43,2	21 692	113,3
Jižní Amerika	102 190	118,2	9 990	11,6	75 473	87,3	187 654	217,1
Svět	288 821	71,6	71 888	17,8	291 662	72,3	652 371	161,8

Zdroj: (FAO 2010)

Lesní biomy můžeme rozdělit na 3 hlavní typy: Boreální lesy/tajga, které pokrývají subpolární podnebný pás, lesy mírného pásu (25 a 50° zeměpisné šířky), zahrnující listnaté a stálezelené lesy a tropické deštné lesy (do 25° zeměpisné šířky). Tab. 3 zahrnuje i tundru a mokřady, údaje jen opět potvrzují, že nejvíce uhlíku v biomase je

v tropických deštných lesích a nejvíce půdního uhlíku v chladném subpolárním pásu (Lal 2005).

Tab. 3: Zásoby uhlíku ve světových biomech

Biom	Rozloha (Mha)	Hustota C (Mg/ha)		Zásoba C (Pg)	
		Vegetace	Půda	Vegetace	Půda
Tundra	927	9	105	8	97
Boreální lesy/tajga	1 372	64	343	88	471
Lesy mírného pásu	1 038	57	96	59	100
Tropické lesy	1 755	121	123	212	216
Mokřady	280	20	723	6	202
Celkem	5 672	průměr 54	průměr 189	373	1 086

Zdroj: Lal 2005

Za posledních 20 let se snížily celosvětové zásoby uhlíku v lesních ekosystémech o 20 Pg, nejvíce z živé biomasy (Tab. 4). Údaje z levé půlky tabulky prezentují množství uhlíku na hektar. Tyto údaje zůstávají víceméně stále stejné, což poukazuje na stále stejnou schopnost lesa ukládat uhlík, což je jistě pozitivní zpráva.

Tab. 4: Vývoj v celkové zásobě uhlíku v lesích v letech 1990 - 2010

	Celkové zásoby C (miliony t)				Zásoby C (t/ha)			
	1990	2000	2005	2010	1990	2000	2005	2010
C v biomase	299 224	293 843	291 299	288 821	71,8	71,9	71,7	71,6
C v mrtvém dřevě	34 068	33 172	32 968	32 904	8,2	8,1	8,1	8,2
C v opadu	38 855	38 748	38 825	38 984	9,3	9,5	9,6	9,7
C v půdě	300 425	295 073	293 232	291 662	72,1	72,2	72,2	72,3
C celkem	672 571	660 836	656 323	652 371	161,4	161,8	161,6	161,8

Zdroj: (FAO 2010)

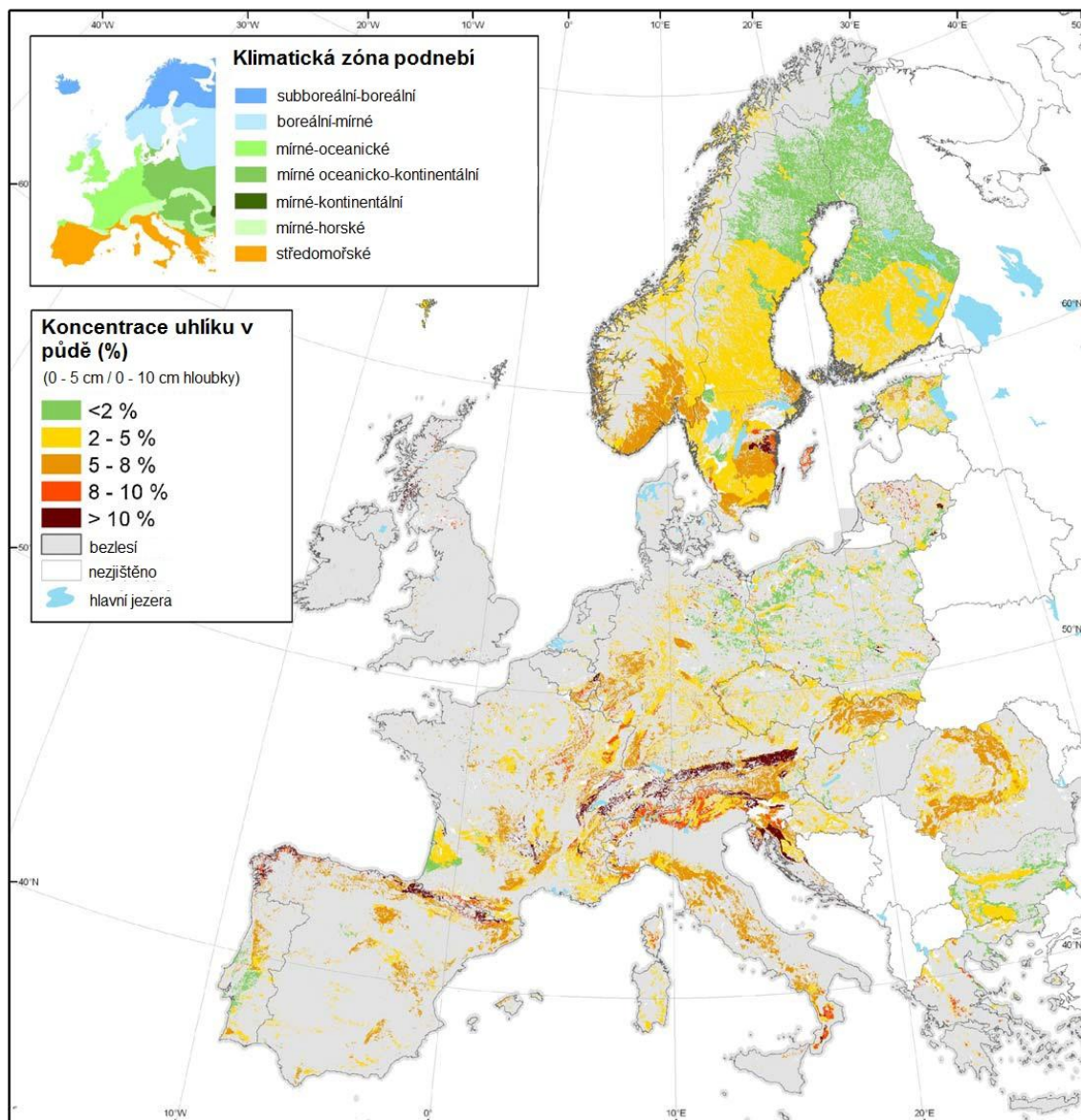
Mezi lety 1990 a 2010 nejvíce půdního uhlíku ubylo v Jižní Americe (-7,5 Pg), viz tab. 5, naopak v Evropě se zásoby uhlíku v půdě zvýšily (+1,5 Pg). Největší zvrát nastal v Asii, která zpočátku vykazovala úbytek uhlíku. Ale mocné zalesňování v Číně dokázalo dokonce posunout celou Asii do plusových hodnot (+1,5 Pg), i přes neustálé odlesňování v jihovýchodní části kontinentu. Pro výpočet uhlíku v půdě se využívá svrchních 30 cm půdy (FAO 2010).

Tab. 5: Vývoj zásoby uhlíku v lesních půdách dle regionů a subregionů v letech 1990 - 2010

Region/subregion	C v půdě (miliony t)				C v půdě (t/ha)			
	1990	2000	2005	2010	1990	2000	2005	2010
Východní a Jižní Afrika	13 871	13 084	12 690	12 298	45,6	45,8	45,9	46,0
Severní Afrika	2 952	2 748	2 771	2 757	34,7	34,7	35,1	35,0
Západní a Střední Afrika	21 083	20 223	19 814	19 406	58,6	58,9	59,0	59,1
Afrika celkem	37 907	36 055	35 275	34 461	50,6	50,9	51,0	51,1
Východní Asie	14 220	15 402	16 432	17 270	68,0	67,9	67,9	67,8
Jižní a Jihovýchodní Asie	18 071	16 760	16 701	16 466	55,5	55,7	55,8	55,9
Západní a Střední Asie	1 534	1 550	1 564	1 594	37,0	36,7	36,5	36,6
Asie celkem	33 826	33 712	34 698	35 330	58,7	59,1	59,4	59,6
Evropa	17 503	18 495	18 632	18 924	97,0	97,9	96,9	96,6
Evropa + Rusko	95 503	96 495	96 632	96 924	96,5	96,7	96,5	96,4
Karibik	354	386	403	416	59,9	59,9	60,0	60,0
Střední Amerika	1 511	1 287	1 212	1 139	58,7	58,6	58,4	58,4
Severní Amerika	39 752	39 645	39 613	39 643	58,7	58,6	58,4	58,4
Severní + Střední Amerika	41 617	41 318	41 229	41 198	58,7	58,6	58,5	58,4
Oceánie	8 584	8 533	8 490	8 275	43,2	43,0	43,2	43,2
Jižní Amerika	82 989	78 961	76 909	75 473	87,7	87,3	87,2	87,3
Svět	300 425	295 073	293 232	291 662	72,1	72,2	72,2	72,3

Zdroj: (FAO 2010)

Baritz a kol. (2010) vycházeli během své studie zabývající se množstvím uhlíku v evropských lesích z dat měřených dle ICP Forests (metodika ICP Forests je popsána níže) a z rozmístění klimatických zón. Při tvorbě mapy (obr. 8) použili vzorky z nejsvrchnějšího minerálního horizontu (do hloubky 20 cm) a u některých lokalit zahrnuli i horizont nadložního humusu. Nejvíce uhlíku obsahují lesní půdy horských pásem (Alpy, Pyreneje), západní pobřeží Atlantského oceánu ve Španělsku a také vápencová pohoří ve Francii a západní části Balkánského poloostrova. Ve Skandinávii je patrný nárůst množství uhlíku v půdě s klesající zeměpisnou šířkou. Přechod v okolí 63. rovnoběžky, kde dochází k přelomu mezi dvěma klimatickými zónami, není ve skutečnosti tak ostrý.



Obr. 9: Koncentrace uhlíku v půdách evropských lesů

Zdroj: Baritz a kol. 2010

5.2. Faktory ovlivňující množství uhlíku v lesních půdách

Množství uhlíku v lesních půdách ovlivňují stejné faktory, jako jsou uvedeny výše. Pro doplnění je následovně uvedeno pár dalších faktorů, které se vyskytují jen u lesních půd.

Přeměna lesa na ornou půdu způsobuje pokles zásoby půdního uhlíku o 20 – 50 %, je to způsobeno různými faktory jako je pokles množství biomasy na povrchu i pod povrchem, změna teplotních režimů a půdní vlhkosti, což ovlivňuje míru rozkladu organického materiálu. Dalším faktorem způsobujícím úbytek uhlíku v půdě je eroze,

kteřá může být vyvolána jak lidskou činností, tak přírodními procesy (oheň, vítr, sucho či napadení škůdci). Nepříznivá pro obsah uhlíku v půdě je i lesní těžba, v prvních letech po těžbě obsah uhlíku v půdě prudce klesá (až o 50 %), později pokles stagnuje, ale až po 80-ti letech od těžby se obsah uhlíku v půdě dostává na úroveň před těžbou (Lal 2005).

Většina evropských lesů byla po staletí ovlivňována lidskou činností a není zcela jasné, do jaké míry tyto zásahy ovlivnily současnou lesní půdu. Většina dostupných studií se zabývá přeměnou lesní půdy na ornou a naopak. Různé metody lesního hospodaření (přemisťování různého množství biomasy a dřeva) také mohou významně ovlivnit množství uhlíku v lesních půdách. Tyto změny jsou patrné ale jen v kratším časovém rozpětí (Waldchen a kol. 2013). Například během 20 let po holoseči ubude z půdy 5 – 20 t C/ha (Jandl a kol. 2007). Studie vlivu jiného lesního hospodaření (např. výmladkový les) v 18. a 19. století na současné množství uhlíku v lesních půdách neprokázala pozitivní či negativní výsledky (Waldchen a kol. 2013).

Produkce biomasy v lesních ekosystémech je obvykle limitována množstvím dusíku, jehož depozice může zvýšit růst lesa a opad biomasy, která je pouze částečně rozložitelná, takže se zvyšuje půdní zásoba uhlíku. Dodáváním dusíku může být zvýšena sekvestrace uhlíku až o 11 – 25 kg C/kg N (Dijkstra a kol. 2009).

Druhové složení dřevin také ovlivňuje množství půdního uhlíku. V listnatých lesích mírného pásu Evropy a Severní Ameriky je v horizontu nadložního humusu nejvíce uhlíku akumulováno pod bučinami, méně pak pod porosty jasanu, javoru, lípy a dubu. Jehličnaté porosty mají v těchto zeměpisných šířkách v nadložním humusu uhlíku minimálně stejně jako buk (Vesterdal a kol. 2013). Z jehličnatých porostů obsahují nejvíce uhlíku nadložní humusové horizonty smrčin, jedlovcových a modřínových porostů. Borovicové porosty jsou na zásoby uhlíku trochu chudší než uvedené jehličnaté druhy (Vesterdal a kol. 2013). V boreálních lesích je obsah uhlíku v horizontu nadložního humusu v celku vyvážený. Výjimky tvoří listnaté porosty břízy a topolu, které mají uhlíku v horizontu nadložního humusu výrazně méně než porosty jehličnatých stromů (Vesterdal a kol. 2013). Druh opadu významně ovlivňuje vznik a vývoj humusové formy a půdní vlastnosti, zejména aciditu. Naopak v organominerálním horizontu se na akumulaci uhlíku pozitivně projeví dřeviny s tvrdým dřevem jako je jasan, javor, lípa a jilm. Organominerální horizonty pod těmito dřevinami obsahují více uhlíku než pod jehličnany. Výsledky z této studie vznikly souhrnem dílčích studií, které povětšinou uvažovaly pouze svrchní humusový horizont (Vesterdal a kol. 2013). Naopak výsledky studie Intenzivní monitoring evropských lesních ekosystémů (Intensive Monitoring of

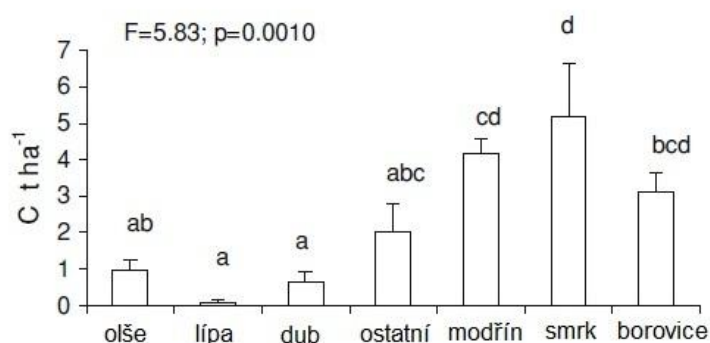
Forest Ecosystems in Europe), která proběhla koncem 90. let na území Evropy dle metodiky ICP (tedy měřením uhlíku do 80 cm hloubky), ukázaly, že nejvyšší množství uhlíku se nachází v bukových porostech (tab. 6).

Tab. 6: Množství uhlíku pod různými druhy dřevin

Druh dřeviny	Počet lokalit	C v půdě (t/ha)
Borovice	188	57
Smrk	146	130
Jedle	16	114
Buk	51	144
Dub	26	87

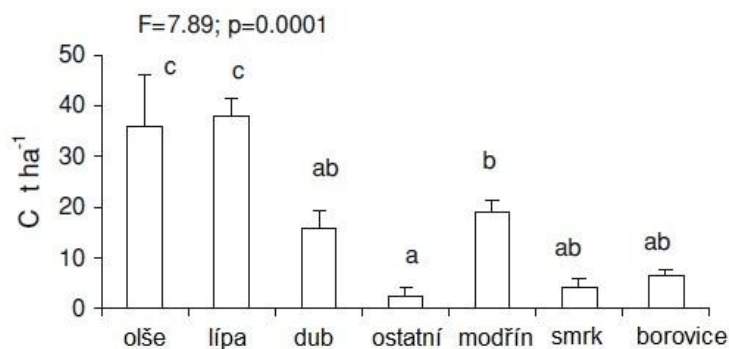
Zdroj: de Vries a kol. (2003)

Obdobnou studii na území České republiky provedl Frouz a kol. (2009), který se zabýval sekvestrací uhlíku v bývalých těžebních plochách porostlých různými dřevinami. V rámci studie byly zahrnuty 22 – 32leté lesní porosty v severozápadních Čechách. Bylo porovnáváno množství uhlíku v horizontu nadložního humusu a v organominerálním horizontu (do 20 cm) v různých lesních porostech. V horizontu nadložního humusu bylo uhlíku 0,07 – 5,2 t/ha (obr. 10), v humusovém horizontu 2,3 – 37,9 t/ha (obr. 11). Zajímavé je zjištění, že smrk vykazuje nejvyšší množství uhlíku v horizontu nadložního humusu stejně jako ostatní jehličnany, ale v organominerálním horizontu téměř nejméně, kde naopak dominuje olše a lípa. Vzorky byly odebírány v září 2005, proto listnaté porosty vykazují tak nízké hodnoty zásob uhlíku v nadložním humusu, jelikož ke konci vegetačního období bývá opad maximálně rozložen.



Obr. 10: Množství uhlíku v nadložním humusu dle druhu dřevin

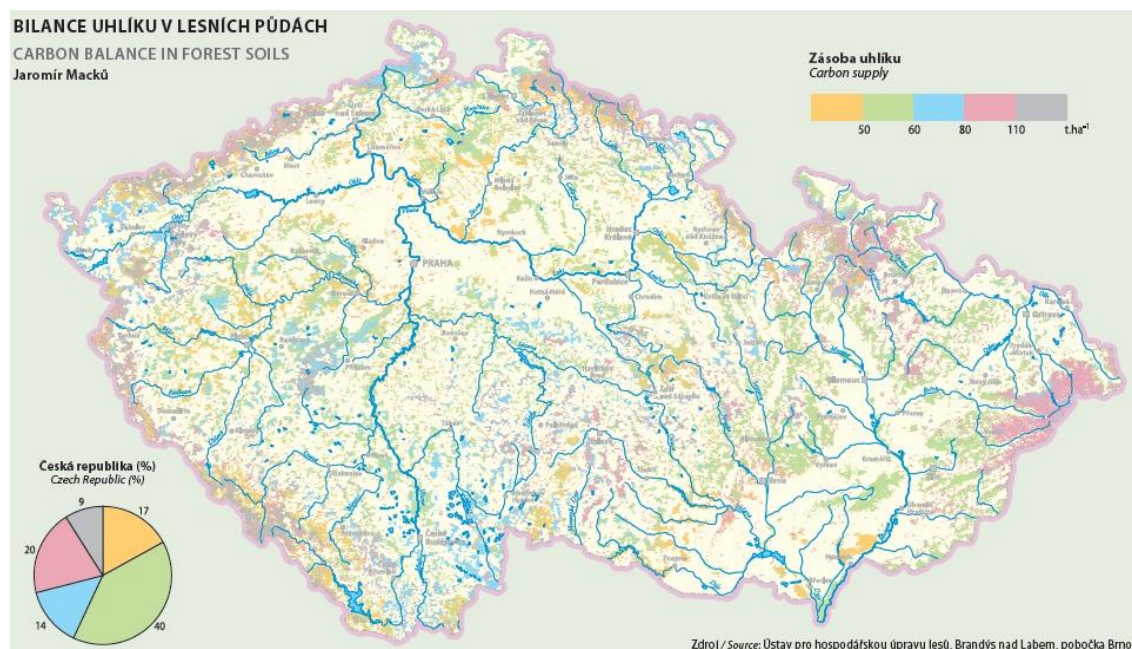
Zdroj: Frouz a kol. 2009



Obr. 11: Množství uhlíku v organominerálním horizontu dle druhu dřevin
Zdroj: Frouz a kol. 2009

5.3. Uhlík v lesních půdách ČR

Lesy na území České republiky pokrývají 35,1 % rozlohy, z toho stejnorodé jehličnaté porosty tvoří 15,4 %, listnaté lesní porosty 5,5 % a smíšené lesy 11,0 %. Nejvíce zastoupenou dřevinou v českých lesích je smrk ztepilý (44,3 %), druhou nejčastěji zastoupenou dřevinou je borovice lesní (10,1 %) a na třetím místě je buk lesní (7,9 %). V posledních letech roste podíl listnáčů na skladbě lesa (Černý 2010). V letech 2001 – 2004 bylo zastoupení smrku na území České republiky 47,7 %, borovice 13,9 % a buku 7,2 % (ÚHÚL 2004).

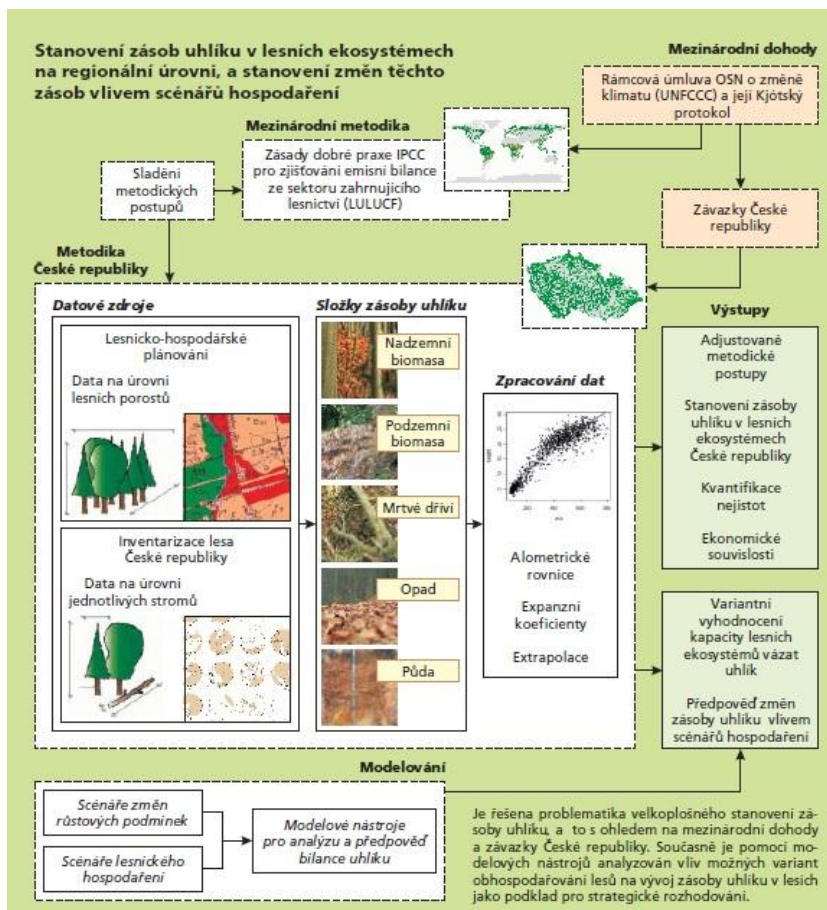


Obr. 12: Bilance uhlíku v lesních půdách

Zdroj: Atlas krajiny České republiky 2009

Většina dat o obsahu uhlíku v lesních půdách ČR pochází z laboratorních analýz ÚHÚL (Ústav pro hospodářskou úpravu lesů), kde se měří půdní uhlík do hloubky 30 cm, včetně nadložního humusu. Souhrnná zásoba uhlíku v lesních půdách ČR dosahuje 154,5 Mt (Marek 2011). Při konstrukci mapy Bilance uhlíku v lesních půdách (obr. 12) byly zohledněny ekosystémové jednotky, půdní typy, topografie a geologické podloží (Marek 2011).

V nedávné minulosti na území České republiky proběhly dva celoplošné projekty zabývající se mimo jiné i půdním uhlíkem, zejména v lesních ekosystémech. Prvním z nich byl projekt **CzechCarbo** (2003 – 2007). Cílem bylo vyzkoumat dynamiku pohlcování CO₂ různými ekosystémy, poznat současný podíl krajiny na celkové bilanci CO₂, předpovědět její budoucí vývoj v závislosti na jejím využívání a navrhnout vhodné postupy využívání krajiny za účelem udržení a případně zvýšení kapacity krajiny vázat CO₂ (Ministerstvo životního prostředí 2005). Tento projekt se zabýval především propojením údajů o zásobách uhlíku v jednotlivých složkách lesních ekosystémů (obr. 13). Kvantifikace zásob uhlíku zahrnovala uhlík v biomase stromů, v nadložním humusu a ve svrchních 30 cm minerální vrstvy půdního profilu. Ostatní méně významné složky (mrtvé dřevo, přízemní vegetace, spodní horizonty půd) nebyly do tohoto projektu zahrnuty. Lesní porosty byly členěny podle věku (věkové stupně s desetiletým rozdílem), podle charakteru ekotopu a aktuálního stavu lesních porostů. Půdy byly rozříděny podle souboru lesních typů na edafické kategorie. Na základě těchto údajů bylo navrženo cílové druhové složení lesních porostů, které by bylo blíže přirozené druhové skladbě lesů, respektovalo by hospodářské zájmy vlastníků lesa a zvýšilo by zásoby uhlíku jak v biomase, tak v půdě. V současné době je v lesní biomase a půdě vázáno 157,5 t C/ha, při dosažení cílové druhové skladby je to 161,7 t C/ha. V půdě tento nárůst nebude tak znatelný, změní se ale rozložení uhlíku v půdním profilu, který se přesune z nestabilního horizontu nadložního humusu do stabilnějších minerálních vrstev půdního profilu, čímž se omezí emise CO₂ vznikajícího rozkladem nadložního humusu, především při dočasném odlesnění. Druhová skladba by se měla změnit snížením zastoupení smrku a borovice a zvýšením zastoupení listnatých dřevin v lesním porostu (Marek 2011).



Obr. 13: Stanovení zásob uhlíku v lesních ekosystémech

Zdroj: Ministerstvo životního prostředí 2005

Druhý projekt **Inventarizace krajiny CzechTerra** probíhal v letech 2007 – 2011 v celé České republice. Cílem bylo vytvořit systém pro sledování stavu a vývoje ekosystémů a využívání krajiny, který by posloužil jako základ pro strategické rozhodování a plánování udržitelného. V rámci segmentu projektu „CzechTerra - adaptace uhlíkových deponií v krajině v kontextu globální změny“ byl zkoumán půdní uhlík v lesních ekosystémech, který byl měřen do svrchních 30 cm půdního profilu. Většina výsledků projektu byla rozřazena dle výškových pásem (tab. 7) (Černý 2010).

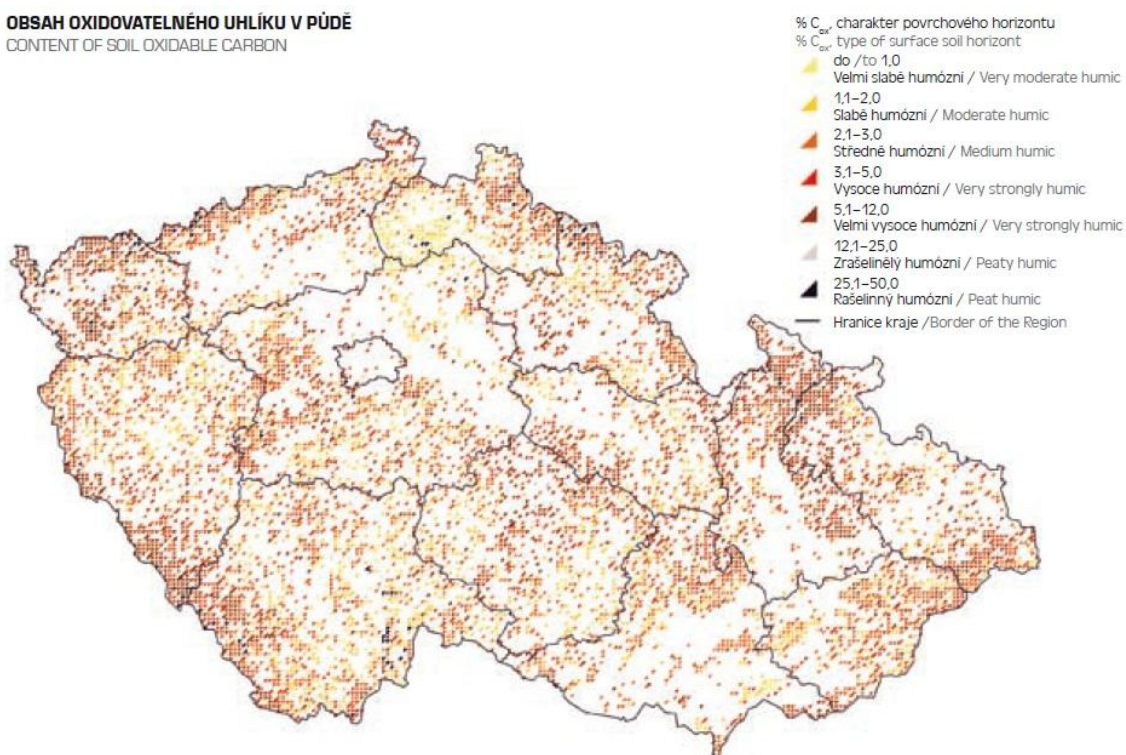
Tab. 7: Celková zásoba uhlíku ve svrchních horizontech lesních půd

Výškové pásmo	Uhlík (30 cm horizont)
	(kg/m ²)
pod 400 m n. m.	7,5
401 – 700 m n. m.	7,0
přes 701 m n. m.	8,8
průměr	7,4

Zdroj: Černý 2010

Půdní uhlík se měřil i během Národní inventarizace lesů v ČR mezi roky 2001 a 2004. Půdní uhlík se měřil jen do hloubky 10 cm minerálního horizontu (obr. 13). Výsledky byly rozčleněny dle lesnických ekologických řad, které jsou rozděleny na základě živných podmínek lokality. Tento projekt se zaměřoval především na nadložní humus, klasifikaci jeho formy a kvantifikaci jeho tloušťky. V lesích na území České republiky tvoří jehličí opad na 80,3 % lokalit, listů 60,4 %, tráva a byliny 65,9 % a mech 30,8 %. Výška nadložního humusu je poměrně vysoká (1,6 – 10 cm) u málo živných lokality (extrémní a kyselé ekologické řady). U podmáčených a rašelinných lokalit přesahuje výška nadložního humusu i 10 cm, kde se také nachází nejvíce C_{ox} (5 – 50 %). Poměrně velké množství C_{ox} mají i lokality živné a obohacené humusem (3 – 12 %). Toto členění na základě živnosti půdy je vytvořené zejména na základě flóry, která se na lokalitách vyskytuje (ÚHÚL 2004).

OBSAH OXIDOVATELNÉHO UHLÍKU V PŮDĚ
 CONTENT OF SOIL OXIDABLE CARBON



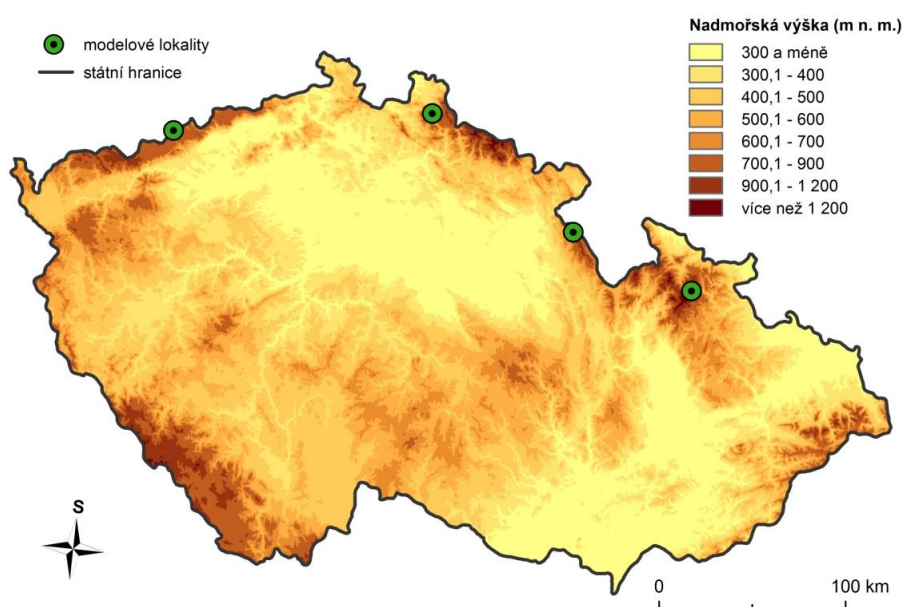
Obr. 14: Obsah C_{ox} v půdě (do 10 cm)

Zdroj: ÚHÚL 2004

6. Vymezení a stručná charakteristika modelových lokalit, popis metodiky odběru vzorků

6.1. Modelové lokality

V rámci mé práce jsem pracovala s daty ze smrkových a bukových porostů ze 4 modelových lokalit umístěných v okrajových pohořích severní části České republiky (obr. 15).



Obr. 15: Modelové lokality

Zdroj: ArcČR 2012

Bukové porosty byly ve třech případech na území maloplošných chráněných území: PR Bučina na Kienhaidě v Krušných horách, NPR Bukačka v Orlických horách a PR Jelení bučina v Jeseníkách. Pouze jedna lokalita (Bílé Buky v Jizerských horách) nemá stupeň ochrany. Smrkové porosty se nacházely buď na území rezervace, nebo v blízkém okolí lokality. Všechny lokality jsou umístěné v podobných klimatických podmínkách a na podobném geologickém podloží. Shrnutí fyzicko-geografických údajů o lokalitách je uvedeno tabulce 8.

Tab. 8: Modelové lokality

Lokalita	Krušné hory PR Bučina na Kienhaidě	Jizerské hory Bílé buky	Orlické hory NPR Bukačka	Jeseníky PR Jelení bučina
Nadmořská výška (m n. m.)	800	900	990	880
Orientace (°)	315	180 - 225	315 - 360	315 - 360
Geologické podloží	rula	granit	rula, svor	mylonit
Klimatická oblast	C7	C4	C7	C6
Průměrná teplota (°C)	5 - 6	3 - 4	3 - 4	4 - 5
Srážky (mm)	800 – 1000	> 1200	> 1200	1000 - 1200
Půdní typ	kryptopodzoly modální	podzoly kambické	kryptopodzoly modální, podzoly modální	kryptopodzoly, podzoly kambické
Lesní typ	kyselá smrková bučina	svěží smrková bučina	kyselá buková smrčina	kleno-smrková bučina, kamenitá smrková bučina

Zdroj: Atlas podnebí Česka 2007, Mapový sever ČGS 2003, Půdní mapy ČR 1992, Oblastní plány rozvoje lesů

6.2. Metodika odběru vzorků a analýza dat

Srovnání rozdílů v zásobách C pod bukovým a smrkovým porostem bylo provedeno na datech poskytnutých Českou geologickou službou. Půdní vzorky byly odebrány podle modifikované metodiky ICP Forests. Vzorky z lokalit byly odebrány na základě metodiky ICP Forests (International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests). Dle metodiky jsou vzorky odebrány povinně společně v horizontech OF (horizont fermentační) a OH (horizont humifikační). Odběr v horizontu OL (horizont opadanky) je dobrovolný, u mých vzorků se však vyskytuje u všech kromě 2 případů smrkového porostu v Jeseníkách. Modifikace metodiky ICP Forest spočívala v odběru nadložního humusu. Ten byl odebírán včetně opadanky a sice OL+OF a samostatně OH. Dále jsou vzorky odebírány v minerálních horizontech půdního profilu ve 4 hloubkách: 0 – 10 cm, 10 – 20 cm, 20 – 40 cm a 40 – 80 cm. Vrstva opadanky (OL) se odebírá z prostoru 25 x 25 cm. Morový humus je odebírán vrtákem o průměru 8 cm.

Vzorky z minerálních horizontů by měly být odebírány kovovými válečky o objemu 100 – 400 cm³. Odběr vzorků musí být proveden v období snížené biologické aktivity (zima, období sucha), aby se předešlo změnám zejména v organické vrstvě. Při opakovaném měření se musí odebírat vzorky ve stejné sezóně, aby mohla být data porovnána.

Měření obsahu uhlíku je prováděno laboratorním zahříváním vzorku na minimálně 900 °C. Při této a vyšší teplotě dochází k oxidaci uhlíku na CO₂, jehož uvolněné množství je měřeno titrací, gravimetrií, konduktometrií, plynovou chromatografií nebo pomocí infračervené detekční metody. Z množství naměřeného CO₂ a hmotnosti vzorku je pak vypočítáno množství organického uhlíku.

$$w_{C,o} = 1000 \times \frac{m_1}{m_2} \times 0,2727$$

kde

$w_{C,o}$	=	obsah organického uhlíku (g/kg)
m_1	=	množství (g) testovaného vzorku
m_2	=	množství (g) naměřeného CO ₂
0,2727	=	koeficient převodu CO ₂ na C

Vzhledem k tomu, že tímto procesem se rozkládá veškerý uhlík, je při měření organického uhlíku potřeba nejprve odstranit anorganický uhlík v podobě karbonátů. To se provádí kyselinou chlorovodíkovou, jež se nechá působit na vzorek 16 hodin při teplotě 60 – 70 °C (Cools, De Vos 2010).

V každé lokalitě byly odebrány vzorky ze 4 profilů v bukovém porostu a ze 4 ve smrkovém. V každém profilu byly odebrány vzorky z 6 hloubek. Pouze u lokality v Jeseníkách chybějí některá data: u jednoho profilu z bukového porostu chybí data z minerálních horizontů a u dvou profilů ze smrčiny chybí horizont OL+OF. Průměrné hodnoty obsahu uhlíku v jednotlivých hloubkách v rámci jednotlivých lokalit jsou uvedeny v tab. 9. Tyto hodnoty byly vypočítány aritmetickým průměrem z jednotlivých vzorků v rámci dané hloubky a lokality. Stejně tak hodnoty směrodatných odchylek byly vypočítány z jednotlivých vzorků (tab. 10). Kvůli chybějícím datům je průměr za celý profil (tab. 9) vypočítán z uvedených průměrných hodnot za jednotlivé hloubky, stejně jako průměr do 20 cm. Hodnoty v jednotlivých hloubkách za všechny lokality u tab. 11 byly vypočítány aritmetickým průměrem ze všech vzorků v dané hloubce. Průměr obsahu uhlíku za celý profil a do 20 cm byl počítán z hodnot uvedených v tabulce.

Směrodatné odchylky v jednotlivých hloubkách jsou vypočítány ze všech vzorků v dané hloubce.

Při posuzování rozdílu obsahu uhlíku v bukových a smrkových porostech byl použit dvouvýběrový t-test. Na 5% hladině testu byla přijímána či vyvracena nulová hypotéza (H_0), jejíž definice byla stanovena tak, že mezi porosty není rozdíl v obsahu uhlíku. Pokud pravděpodobnost (p) vyšla menší než 0,05 %, byla nulová hypotéza zamítnuta a byla přijata alternativní hypotéza (H_1), která tvrdila, že mezi porosty rozdíl v obsahu uhlíku je. Toto testování bylo aplikováno na všechny vzorky, které byly rozděleny dle příslušnosti k jednotlivé dřevině. Dále byl touto metodou porovnáván rozdíl v obsahu uhlíku mezi smrčiny a bučiny v jednotlivých hloubkách a v jednotlivých hloubkách u jednotlivých lokalit.

6.3. Výsledky

Nejvíce uhlíku (48,03 %) bylo naměřeno v horizontu OL+OH v jenom vzorku ze smrkového porostu v Orlických horách. Rovněž ve smrkovém porostu, ale v Krušných horách, byl naměřen nejnižší obsah za tento horizont (31,23 %). V Krušných horách byl naměřen naopak nejvyšší obsah uhlíku v nejspodnějším horizontu (40 – 80 cm), a to 5,26 % u bukového porostu. Nejnižší údaj za stejný horizont byl naměřen u bukového porostu v Orlických horách (0,42 %). Nejvyšší průměrné hodnoty (tab. 9, 10) jsou u smrkového porostu v Jeseníkách (45,3 %), kde však tato hodnota vychází z pouhých 2 vzorků, proto se nabízí uvést druhou nejvyšší průměrnou hodnotu: 44,3 % uhlíku u smrkového porostu v Orlických horách, které v rámci celého profilu vykazují vysoké hodnoty jak za smrčiny (16,6 %), tak za bučiny (15,2 %). Nejméně uhlíku v rámci celého profilu se nachází v porostech Jeseníků (buk: 13,3 %, smrk: 13,8 %). Za povšimnutí stojí, že průměrné hodnoty do hloubky 20 cm vycházejí více rozdílné mezi bukem a smrkem, než průměrné hodnoty za celý profil.

Hodnoty obsahu uhlíku za jednotlivé vzorky byly, hlavně v horizontu nadložního humusu, celkem různorodé, jak udávají tabulky směrodatných odchylek (tab. 9, 10). Největší rozdíl ve vzorcích se nachází u OH horizontu bučiny v Jeseníkách (7,3).

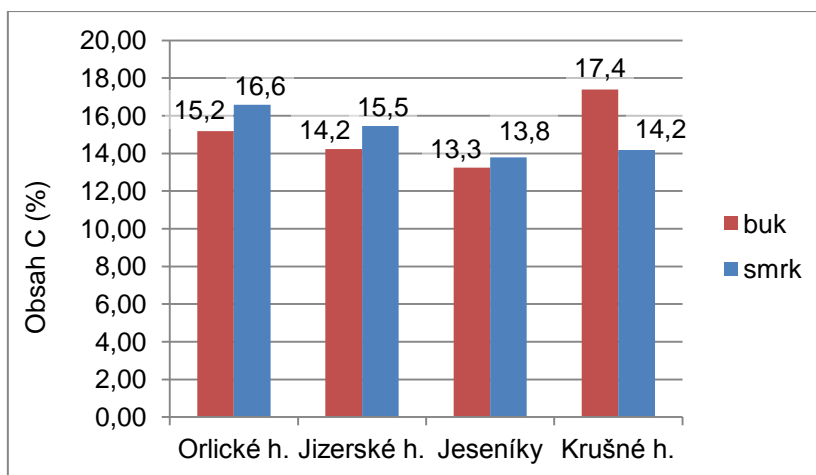
Tab. 9: Modelové lokality: průměrný obsah uhlíku (%) a směrodatné odchytky

Hloubka odběru	Orlické hory				Jizerské hory			
	buk		smrk		buk		smrk	
	průměr	odchytky	průměr	odchytky	průměr	odchytky	průměr	odchytky
OL+OF	43,4	2,7	44,3	2,9	42,1	2,4	42,3	2,8
OH	32,6	6,3	38,0	5,0	25,2	4,1	31,3	3,8
0-10	7,7	1,0	8,2	2,5	6,8	2,0	10,0	2,2
10-20	4,5	1,2	5,0	0,9	5,0	0,7	4,5	0,6
20-40	2,2	0,7	2,7	0,4	4,2	0,0	3,0	1,2
40-80	0,6	0,2	1,4	0,4	1,9	0,6	1,6	0,9
průměr za celý profil	15,2		16,6		14,2		15,5	
průměr do 20 cm	22,1		23,9		19,8		22,0	

Tab. 10: Modelové lokality: průměrný obsah uhlíku (%) a směrodatné odchytky

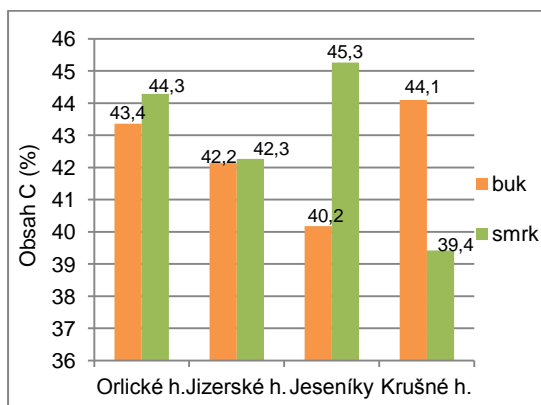
Hloubka odběru	Jeseníky				Krušné hory			
	buk		smrk		buk		smrk	
	průměr	odchytky	průměr	odchytky	průměr	odchytky	průměr	odchytky
OL+OF	40,2	1,3	45,3	0,4	44,1	2,0	39,4	5,5
OH	25,8	7,3	26,4	3,8	36,1	2,9	31,8	1,9
0-10	6,4	0,4	5,5	1,9	9,4	2,7	6,9	1,1
10-20	3,8	0,6	2,4	0,5	6,0	1,1	3,5	0,4
20-40	2,3	0,6	2,0	0,7	5,0	0,7	2,3	0,5
40-80	1,0	0,5	1,2	0,5	3,7	1,3	1,2	0,1
průměr za celý profil	13,3		13,8		17,4		14,2	
průměr do 20 cm	19,0		19,9		23,9		20,4	

V rámci celého profilu převažuje u všech lokalit kromě Krušných hor obsah uhlíku ve smrkovém porostu (obr. 16). V Krušných horách se nachází uhlíku v bučinách tolik, že změní celkové výsledky obsahu uhlíku ve prospěch buku (tab. 11). Dvouvýběrový t.test však neprokázal rozdíly mezi obsahem uhlíku ve smrkovém a bukovém porostu ani u jedné ze 4 lokalit. Smrkový porost nedosahuje takových výkyvů jako bukový porost. Ten má jak nejvyšší obsah uhlíku v celém profilu (17,4 %, Krušné hory), tak nejnižší (13,3 %, Jeseníky).

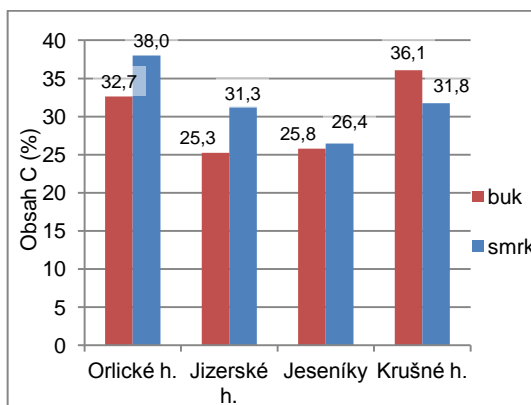


Obr. 16: Modelové lokality a průměrný obsah uhlíku za celý profil (%)

V horizontu opadanky (OL) a fermentačním horizontu (OF) je obecně nejvíce uhlíku, jelikož se zde hromadí odumřelá organická hmota. Nejvyšší obsah u obou dřevin vykazují Orlické hory. U všech lokalit kromě Krušných hor je více uhlíku u smrkového lesa. Krušné hory ukazují úplně opačný trend (obr. 17). Dvouvýběrový t.test v tomto horizontu prokázal rozdíl pouze u Jeseníků ($p = 0,001$), kde však máme jen 2 vzorky ze smrkového porostu. Průměrná hodnota je zde vyšší u smrku. Podobné výsledky jsou u humifikačního horizontu (OH). Nejvíce uhlíku zde mají opět Orlické hory, které mají velmi podobné výsledky s Krušnými horami, jen s prohozeným pořadím dřevin (obr. 18). Dvouvýběrový t.test prokázal rozdíl v Jizerských horách ($p = 0,036$), kde průměrná hodnota je vyšší u smrku a v Krušných horách, kde průměrná hodnota je vyšší u buku ($p = 0,024$).



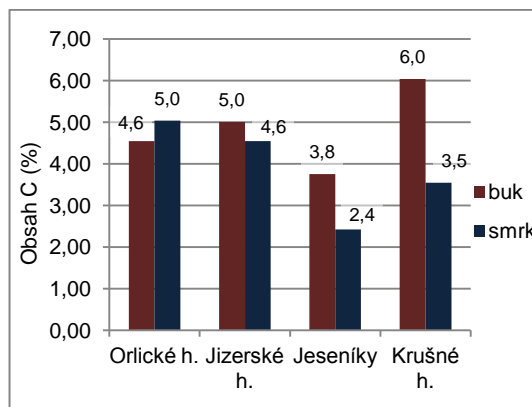
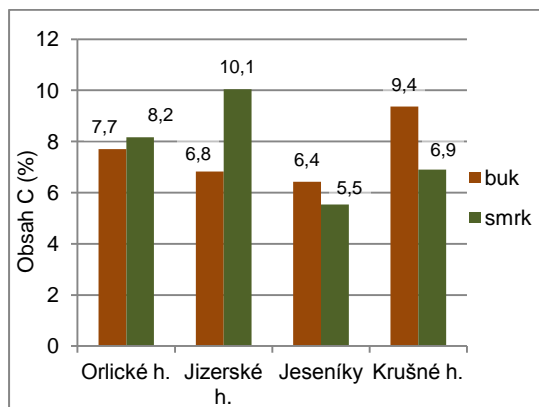
Obr. 17: Obsah C v horizontu OL+OF (%)



Obr. 18: Obsah C v horizontu OH (%)

V prvním minerálním horizontu (0 - 10 cm) se hodnoty obsahu uhlíku v bučinách a ve smrčinách vyrovnávají (tab. 10). Nejvíce uhlíku se nachází u smrčin v Jizerských horách, nejnižší hodnoty vykazují Jeseníky (obr. 19). V této hloubce prokázal dvouvýběrový

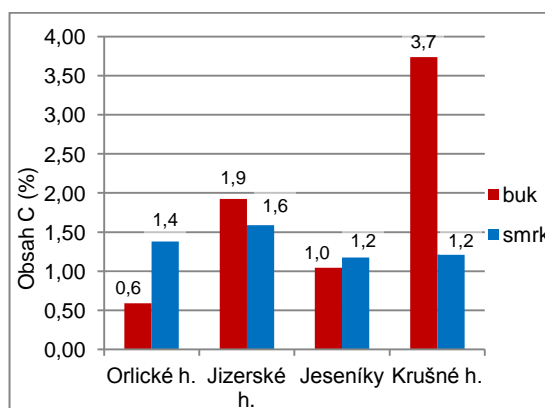
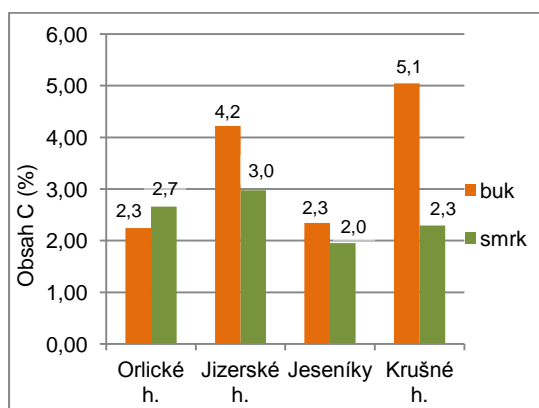
t.test rozdíl v Jizerských horách ($p = 0,038$), kde průměrná hodnota je vyšší u smrku. V hloubce 10 – 20 cm začíná dominovat bučina Krušných hor. Bučiny začínají dominovat u všech lokalit kromě Orlických hor (obr. 20), což potvrdil i dvouvýběrový t.test. V rámci všech lokalit vyšla p-hodnota 0,011. V Krušných horách $p = 0,002$ a v Jeseníkách $p = 0,022$.



Obr. 19: Obsah C v hloubce 0 – 10 cm (%)

Obr. 20: Obsah C v hloubce 10 - 20 cm (%)

Obdobné výsledky jsou v hloubkách 20 – 40 cm (obr. 21) a 40 – 80 cm (obr. 22). V hloubce 20 – 40 cm dvouvýběrový t.test prokázal rozdíl mezi bukem a smrkem na vzorku všech lokalit ($p = 0,007$), kde průměrná hodnota je vyšší u buku. Stejně tak u Jizerských hor ($p = 0,042$) a Krušných hor ($p = 0,0004$). V nejspodnější hloubce již bučiny v Krušných horách převyšují ostatní vzorky dvojnásobně ($p = 0,005$). Naopak v Orlických horách dvouvýběrový t.test prokázal rozdíl ($p = 0,007$), kde průměrná hodnota je vyšší u smrku.



Obr. 21: Obsah C v hloubce 20 - 40 cm (%)

Obr. 22: Obsah C v hloubce 40 - 80 cm (%)

Průměrný obsah uhlíku v celém profilu se mezi bučinami (15,06 %) a smrčinami (14,95 %) liší jen nepatrně. Pomocí dvouvýběrového t.testu se nepodařilo prokázat rozdíl mezi bukovými a smrkovými porosty ($p = 0,28$). Pokud však měříme obsah uhlíku jen do 20

cm hloubky, výsledky se nám obrátí (21,5 %), kde průměrná hodnota je vyšší u smrku. Buk má 21,2 %.

Z tab. 10 je patrné, že v horizontech nadložního humusu obsahuje více uhlíku smrkový porost. Výjimku tvořila pouze lokalita v Krušných horách, kde obsah uhlíku pod bučinami byl výrazně vyšší než pod smrčinami (tab. 8). V humusovém horizontu (0 – 10 cm) se rozdíly vyrovnávají a v hlubších minerálních horizontech převažuje obsah uhlíku u bučin. Celkově pak průměrná zásoba vychází nepatrně vyšší pro bučiny. Průměrné hodnoty u tab. 11 byly vypočítány ze všech vzorků. Směrodatné odchylky vycházejí nejvyšší u horizontů nadložního humusu, kde je také nejvyšší obsah uhlíku.

Tab. 11: Celkový obsah C v modelových lokalitách

Hloubka odběru	buk		smrk	
	průměr (%)	směrodatná odchylka smrk	průměr (%)	směrodatná odchylka
OL+OF	42,4	4,0	42,5	2,5
OH	29,9	5,4	31,9	6,8
0 – 10 cm	7,7	2,4	7,7	2,0
10 – 20 cm	4,9	1,2	3,9	1,2
20 – 40 cm	3,5	0,8	2,5	1,4
40 – 80 cm	1,9	0,5	1,3	1,5
průměr do 20 cm	21,2		21,5	
průměr za celý profil	15,06		14,95	

6.4. Diskuze

Nejvíce uhlíku se nachází na lokalitě v Orlických horách, která je zároveň nejvýše položenou lokalitou. Stejně tak Krušné hory, které vykazují nejvyšší hodnoty u bučin, jsou nejzápadnější a nejteplejší lokalitou. Nejméně uhlíku bylo naměřeno v Jeseníkách, které jsou nejvýchodnější lokalitou. Těmto výsledkům poukazujícím na zeměpisnou a výškovou polohu by napovídala studie Baritze a kol. (2010), jež potvrdila, že nejvíce uhlíku je v horských pásmech, a v širším okolí Střední Evropy je průkazný východo-západní gradient. Abychom však mohli vyvodit nějaké závěry související s polohou a klimatickými podmínkami, museli bychom mít k dispozici více dat z vícera lokalit. Zajímavým jevem je však změna rozmístění uhlíku dle hloubky a druhu dřeviny, v horizontech nadložního humusu dominuje smrk, v hlubších minerálních horizontech dominuje buk. Jandl 2007 uvádí, že mělce kořenící stromy, jako jsou jehličnany, akumulují uhlík v horizontu nadložního humusu, méně však v minerálních horizontech ve srovnání s listnáči. Při stejném objemu biomasy akumulují více uhlíku stromy s tvrdým dřevem (listnáče) na rozdíl od stromů s měkkým dřevem (jehličnany), což potvrzuje i

Vesterdal a kol. (2013), který tuto problematiku tvrdosti dřeva rozděluje na akumulaci uhlíku v horizontu nadložního humusu, kde dominují jehličnany s pomalu rozkládajícím se jehličím, a minerální horizonty, kde dominují listnaté stromy s tvrdým a hůře se rozkládajícím dřevem. Stejných výsledků dospěl i Frouz (2009), který však ve své studii nezahrnul buk. Jelikož se však Vesterdal a kol. (2013) zabýval pouze svrchními 30 cm minerálního horizontu, nevychází v minerálním horizontu ve většině zemí rozdíl mezi bukem a smrkem. Pouze dvě země vykazují rozdíl v obsahu uhlíku mezi bukovými a smrkovými porosty v tomto horizontu. Ve Francii je více uhlíku pod bučinami a v Dánsku pod smrčínami. V horizontu nadložního humusu všude dominuje smrk.

Pokud měříme průměrný obsah uhlíku pouze do hloubky 20 cm, vyjdou nám výsledky ve prospěch smrku (21,5 %), buk (21,2%). Pokud však bereme v úvahu celou hloubku profilu, vyjde větší obsah uhlíku u buku (15,06 %), smrk (14,95). Tyto výsledky také potvrzuje de Vries a kol. (2003), který vychází z měření do 80 cm hloubky, a uvádí množství uhlíku v půdě pod bukovými porosty jako 144 t/ha, u smrku 130 t/ha. Naopak Vesterdal a kol. (2013) jednoznačně označuje smrk a další jehličnany, jako dřevinu, která sekvestruje nejvíce půdního uhlíku.

7. Závěr

Při měření obsahu uhlíku v půdě (a následném přepočítávání na množství) se jeví hloubka, do které odebíráme vzorky, jako klíčová. Pokud budeme zahrnovat do konečných výsledků pouze mělčí části půdního profilu, vyjdou nám jiné výsledky než při zahrnutí celé hloubky profilu, jak bylo dokázáno v praktické části a shrnutím několika studií. Pokud poměříme svrchní část půdního profilu (do 20 – 30 cm hloubky), vyjde nám větší množství půdního uhlíku pod smrkovými porosty než pod bukovými. Pokud zahrneme celou hloubku profilu (do 80 cm), vyjde vyšší hodnota pro bukové porosty. Půdní uhlík s hloubkou profilu také velmi rychle ubývá, což může evokovat, že hlouběji uložený uhlík již není významný v celkových zásobách půdního uhlíku. Tento uhlík je na rozdíl od relativně čerstvého organického materiálu, který je uložen ve svrchních vrstvách, velmi stabilní a z hlediska dlouhodobé sekvestrace uhlíku velmi důležitý. Poměrování uhlíku v jednotlivých lesních ekosystémech je problematické. Množství uhlíku závisí na mnoha faktorech. V první řadě se zde projeví stáří lesa a půdy ponechané samovolné sekvestraci, jelikož množství půdního uhlíku v mladém lese ještě pár let po těžbě dřeva klesá (Lal 2005, Jandl a kol. 2007). Dalšími důležitými faktory jsou půdní struktura a geologické podloží, které ovlivňují retenci vody, půdní typ a půdní vlastnosti. Na výsledném množství se projeví klimatické podmínky; orientace svahu,

množství srážek a teplota. A samozřejmě také druh dřeviny, která složením své biomasy výrazně ovlivňuje sekvestraci uhlíku v půdě. Ne vždy jsou však studie zaměřené na vliv druhu dřeviny na sekvestraci uhlíku v půdě průkazné. Například borové lesy nemusí vykazovat nízké výsledky v sekvestraci uhlíku kvůli své druhové příslušnosti ale proto, že většinou rostou na chudých, suchých a písčitých půdách (Jandl a kol. 2007). Při poměrování schopnosti sekvestrovat uhlík pod různými dřevinami bychom proto měli zohlednit podloží a půdní typy, na kterém stromy rostou, a klimatické podmínky.

Metodika ICP se jeví jako vhodné řešení pro zjištění obsahu uhlíku v různých hloubkách, jelikož zohledňuje celý půdní profil. Pokud však chceme vědět celkové množství uhlíku v půdním profilu, musíme znát hloubky jednotlivých horizontů, které se liší i v rámci jednoho půdního typu. Další faktor ovlivňující výpočty celkového množství uhlíku v půdním profilu je objemová hmotnost a objem hrubých částic. Při měření musíme také zohlednit vegetační dobu. Na konci vegetační doby je odumřelá rostlinná hmota maximálně rozložená, tudíž budou hodnoty uhlíku nižší. Pouze při dodržení výše jmenovaných faktorů můžeme zásoby uhlíku porovnávat a vyvozovat závěry, které by mohly třeba pomoci ve snižování CO₂ v atmosféře.

8. Zdroje

Atlas krajiny České republiky (2009), 1. atlas, Ministerstvo životního prostředí České republiky, Praha. 331 s.

Atlas podnebí Česka 1961-2000 (2007), 1. vydání, Český hydrometeorologický ústav. 255 s.

ARCDATA (2012): ArcČR 500 Digitální geografická databáze. ARCDATA PRAHA s.r.o., Praha

Baldock, J. A., Skjemstad, J. O. (1999): Soil Analysis: an Interpretation Manual. CSIRO Publishing, Collingwood. s. 159–170

Baritz, R., Seufert, G., Montanarella, L., Van Ranst, E. (2010): Carbon concentrations and stocks in forest soils of Europe. *Forest Ecology and Management*. 260. s. 262–277

Bohn, H., McNeal, B., O'Connor, G. (1985): Soil chemistry. 2. vydání. Wiley, New York, 341 s.

Bot, A., Benites, J. (2005): The importance of soil organic matter. FAO, Rome. 95 s.

Brady, N., Weil, R. (2008): The nature and properties of soils. 14. vydání. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, 975 s.

Cools, N., De Vos, B. (2010): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. UNECE, ICP Forests, Hamburg. 208 s.

Černý, M. (2010): Inventarizace krajiny CzechTerra: Koncepce a výstupy projektu. Ministerstvo životního prostředí České republiky. 107 s.

Davies, G., Ghabour, E. (2001): Humic substances: structures, models and functions. Royal Society of Chemistry, Cambridge. 387 s.

de Vries, W., Reinds, G. J., Posch, M., Sanz, M. J., Krause, G. H. M., Calatayud, V., Renaud, J. P., Dupouey, J. L., Sterba, H., Vel, E. M., Dobbertin, M., Gundersen, P., Voogd, J. C., H. (2003): Intensive Monitoring of Forest Ecosystems in Europe: Technical Report 2003. Forest Intensive Monitoring Coordinating Institute. 162 s.

Dijkstra, J. P. M., Reinds, G. J., Kros, H., Berg, B., Vries, W. (2009): Modeling soil carbon sequestration of intensively monitored forests plots in Europe by three different approaches. *Forest Ecology and Management*. 258. s. 1780–1793

Falkowski, P., Scholes, R. J., Boyle, E., Canadell, J., Canfield, D., Elser, J., Gruber, N., Hibbard, K., Höglberg, P., Linder, S., Mackenzie, F.T., Moore III, B., Pedersen, T., Rosenthal, Y., Seitzinger, S., Smetacek, S., Steffen, W. (2000): The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System. *Science*, 290, s. 291–296

FAO (2010): Global Forest Resources Assessment 2010. Main report. Food and Agriculture Organization of the United Nations. s. 14,44

Freyerová, K. (2010): Nížinné podzoly v Česku a jejich význam při sekvestraci uhlíku. Praha: Univerzita Karlova v Praze. 34 s., 5 s. příl.

Frouz, J., Pižl, V., Cienciala, E., Kalčík, J. (2009): Carbon storage in post-mining forest soil, the role of tree biomass and soil bioturbation. *Biogeochemistry*. 94. s. 111–121

Frouz, J. (2010): Půda – živý systém. Interakce půdní fauny a mikroflóry a jejich význam pro přeměny organické hmoty v půdě. *Vesmír*. 89. s. 490

Forster, P. V. (2007): Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. IPCC. Cambridge University Press, Cambridge. s. 207

Gobat, J., Matthey, W., Aragno, M. (1998): Le sol vivant: base de pedologie, biologie des sols. 2. Vydání. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne. 519 s.

Hayes, M., H., B., Clapp, C., E. (2001): Humic substances: Considerations of compositions, aspects of structure, and environmental influences. *Soil Science*. 166. s. 723–737

Heimann, M., Reichstein, M. (2008): Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*. 451. s. 289–292

Hillel, D. (2005): Eyclopedia of soils in the environment. 1. sv. 1. Vydání. Elsevier, Amsterdam, 548 s.

Hönisch, B., Hemming, N. G., Archer, D., Siddall, M., McManus, J. F. (2009): Atmospheric carbon dioxide concentration Gross the Mid-Pleistocene transition. *Science*. 324. s. 1551–1554

Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D., W., Minkinen, K., Byrne, K., A. (2007): How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*. 137. s. 253–268

Kachlík, V., Chlupáč, I. (2011): Základy geologie. 3. vydání. Karolinum, Praha. 342 s.

Lal, R. (2005): Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*. 220. s. 242–258

Liao, Ch., Lou, Y., Fang, Ch., Chen, J., Li, B. (2011): The effects of plantation practice on soil properties based on the comparison between natural and planted forests: a meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*. 21. s. 318–327

Mapový server ČGS (2003): GeoINFO. <http://mapy.geology.cz/website/geoinfo/> (staženo 10.5.2013)

Marek, M. V. (2011): Uhlík v ekosystémech České republiky v měnícím se klimatu. 1. vydání. Academia, Praha. 253 s.

Ministerstvo životního prostředí (2005): CzechCarbo - Studium cyklu uhlíku v terestrických ekosystémech České republiky. 8 stran

Němeček, J. (2011): Taxonomický klasifikační systém půd ČR. 2. vydání, Česká zemědělská univerzita. 94. s.

NOAA, Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. National Oceanic and Atmospheric Administration. <http://www.noaa.gov/> (staženo 10.5.2013)

Oblastní plány rozvoje lesa. ÚHÚL Brandýs nad Labem. <http://geoportál1.uhul.cz/OprlMap/>. (staženo 10.5.2013)

Oulehle, F., Hruška, J. (2009): Lesy v globálním koloběhu uhlíku. Jak dalece jsou významným hráčem? *Vesmír*. 88. s. 496

Půdní mapa ČR (1992): Měřítko 1:50 000: list 03-14 Liberec, 1. vydání. Ústřední ústav geologický, Praha, 1 list.

Půdní mapa ČR (1992): Měřítko 1:50 000: list 14-12 Deštné v Orlických horách. 1. vydání. Ústřední ústav geologický, Praha, 1 list.

Piccolo, A. (2001): The supramolecular structure of humic substances. *Soil science*. 166. s. 810–832

Prát, S. (1964): Humus a jeho význam. 1. vydání. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 168 s.

Projekt koloběh uhlíku (2007): <http://kfrserver.natur.cuni.cz/globe/others-CZ.htm> (staženo 8.5.2013)

Robert, M. (2002): La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres. FAO, Rome. 76. s.

Schlesinger, W. H., Andrews, J. A. (2000): Soil respiration and global carbon cycle. *Biogeochemistry*. 48. s. 7–20

Schulze, E. D., Freibauer, A. (2005): Environmental science: Carbon unlocked from soils. *Nature*. 437. s. 205–206

Smolík, L. (1957): Pedologie. 1. vydání. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 399 s.

Smolíková, L. (1988): Pedologie. 1. 2. vydání. SPN, Praha. 129 s.

Stolbovoi, V. (2002): Carbon in Russian Soils. *Climatic Change*. vol. 55. S. 131–156

Sutton, R., Sposito, G. (2005): Molecular Structure in Soil Humic Substances: The New View. *Environmental science and technology*. 39. s. 9015

Šafář, J. (2003): Chránění území ČR – Olomoucko. 1. vydání. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha. 456 s.

Šefrna, L., *Ústní sdělení*, (6.5.2013)

Tomášek, M. (2003): Půdy České republiky. 3. vydání. Česká geologická služba, Praha, 68 s.

ÚHÚL (2007): Národní inventarizace lesů v České republice 2001 – 2004: Úvod, metody, výsledky. 1. vydání. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem. 224 s.

UNEP (2012): Year book 2012: The benefits of soil carbon.

<http://www.unep.org/yearbook/2012/> (staženo 20.4.2013)

Ústav ekologie lesa (2001):

http://www.uel.cz/download/Multimedialni_ucebni_text/humus.htm (staženo 2.5.2013)

Valla, M. a kol. (2007): Pedologické praktikum. 2. vydání. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha. 151 s.

Vaněk, V., Kolář, L., Pavlíková, D. (2010): Úloha organické hmoty v půdě. Racionální použití hnojiv - sborník z konference, ISBN 978-80-213-2006-2

Vrba, V., Huleš, L. (2006): Humus - půda - rostlina (2): Humus a půda.

<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/humus-puda-rostlina-2-humus-a-puda> (staženo 31.3.2013)

Vesterdal, L., Clarke, N., Sigurdsson, B. D., Gundersen, P. (2013): Do tree species influence soil carbon stoce in temperate and boreal forests? *Forest Ecology and Management*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.01.017>

Wäldchen, J., Schulze, E.-D., Schöning, I., Schrumpf, M., Sierra C. (2013): The influence of changes in forest management over the past 200 years on present soil organic carbon stock. *Forest Ecology and Management*. 289. s. 243–254

Weiss, Z., Kužvart, M. (2005): Jílové minerály: jejich nanostruktura a využití. Karolinum, Praha. 281. S.