

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra pedologie a ochrany půd



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Hodnocení zásob a potenciální sekvestrace uhlíku
v půdách**

Bakalářská práce

Autor práce: Ivan Šebesta

Ochrana krajiny a využívání přírodních zdrojů

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Luboš Borůvka

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Hodnocení zásob a potenciální sekvestrace uhlíku v půdách" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 21. 4. 2023

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé práce prof. Dr. Ing. Luboši Borůvkovi za odborné vedení, cenné rady a připomínky. Též bych chtěl poděkovat mé rodině za cennou podporu během mého studia.

Souhrn

Organická hmota v půdě získává stále větší pozornost jako potenciálně poměrně velký zdroj uhlíku pronikající do atmosféry v reakci na předpokládaný nárůst globální teplot. Půda však může být nejen zdrojem, ale i rezervoárem uhlíku, v závislosti na způsobu hospodaření, vstupu biomasy do půdy a jejím využití. Půda zadržuje největší množství uhlíku v suchozemském ekosystému. Udržení tohoto množství nebo dokonce zvýšení obsahu (sekvestrace) organického uhlíku v půdě tak napomůže zmírnit klimatické změny. Sekvestrace půdního organického uhlíku je definována jako proces přenosu CO₂ z atmosféry do půdy prostřednictvím rostlinných zbytků a jiných organických látek, které jsou uloženy v půdě jako součást organické hmoty.

Byly uvedeny způsoby hodnocení zásob uhlíku v půdě a metody odhadu potenciální sekvestrace uhlíku v půdě. Dále byly zhodnoceny stavy zásob uhlíku ve světě dle dostupných údajů a došlo k porovnání zásob uhlíku v půdách ČR se zahraničními údaji. Z přehledu 27 studií vyplývá, že za hrubý odhad globálního fondu půdního uhlíku lze považovat 1500 Pg uhlíku (do hloubky jednoho metru, v rámci všech půd na světě). Je třeba počítat se značnou variabilitou v rozmezí 500 - 3000 Pg uhlíku. Celosvětově je v orné půdě ve svrchních 30 cm půdy uloženo více než 140 Pg uhlíku. Na rozložení půdního organického uhlíku mají výrazný vliv teplota a srážky. Největší množství uhlíku v současnosti ukládají oblasti Severní Ameriky, Eurasie (Rusko) a Evropy v orné půdě s více než 21 Pg uhlíku v každé z nich. Současná celková zásoba uhlíku v České republice činí více než 950 393 943 t. Největší podíl na zásobách představuje uhlík uložený v půdě (57,6 %), v nadzemní biomase (31,4 %), podzemní biomase (7,7 %). Mezi navržené postupy k optimální sekvestraci půdního uhlíku patří racionální agrotechnika (omezením klasické orby a kultivačních operací). Dále ke snížení ztrát uhlíku vede ochrana před mineralizací a erozí. Zvýšené dodání uhlíku představuje dodání hnojiv a použití biouhlu. Zvyšování obsahu organické hmoty v půdě je výhodné nejen pro zmírnění nepříznivých změn klimatu. Sekvestrace uhlíku má též další velmi pozitivní přínosy, mezi které patří lepší infiltrace, zadržování vody a ovlivnění úrodnosti půdy.

Zlepšení našich znalostí o technickém potenciálu sekvestrace uhlíku v půdě a praktickém provádění lepšího hospodaření s půdou zaměřené na zvyšování půdního organického uhlíku nabízí potenciálně pozitivní důsledky pro potravinovou bezpečnost a ekologickou udržitelnost v dlouhodobém horizontu.

Klíčová slova: organická hmota, půdní organický uhlík, sekvestrace, biouhel, klimatické změny

Assessment of carbon stocks and potential sequestration in soils

Summary

Soil organic matter is gaining increasing attention as a potentially relatively large source of carbon entering the atmosphere in response to projected increases in global temperatures. However, soils can be not only a source but also a reservoir of carbon, depending on management practices, biomass input and use. Soil holds the largest amount of carbon in the terrestrial ecosystem. Thus, maintaining this amount or even increasing the organic carbon content (sequestration) of soil will help to mitigate climate change. Soil organic carbon sequestration is defined as the process of transferring CO₂ from the atmosphere to the soil through plant residues and other organic matter that are stored in the soil as part of the organic matter.

Methods for assessing soil carbon stocks and methods for estimating potential soil carbon sequestration were presented. Furthermore, the carbon stock levels in the world according to available data were evaluated and the carbon stock in soils of the Czech Republic was compared with foreign data. A review of 27 studies shows that 1500 Pg of carbon (to a depth of one meter, across all soils in the world) can be considered a rough estimate of the global soil carbon pool. Considerable variability in the range of 500 - 3000 Pg of carbon should be taken into account. Globally, more than 140 Pg of carbon is stored in the top 30 cm of arable soils. Temperature and precipitation have a strong influence on the distribution of soil organic carbon. The regions of North America, Eurasia (Russia) and Europe currently store the largest amounts of carbon in arable soils, with more than 21 Pg of carbon in each. The current total carbon stock in the Czech Republic is more than 950,393,943 t. The largest share of the stock is stored in soil (57.6 %), above-ground biomass (31.4 %), below-ground biomass (7.7 %). Proposed procedures for optimal soil carbon sequestration include reasonable agrotechnics (reduced tillage or no tillage). In addition, protection from mineralisation and erosion leads to a reduction in carbon loss. Increased carbon supply is represented by the supply of fertilisers and the use of biochar.

Increasing soil organic matter is not only beneficial for mitigating adverse climate change. Carbon sequestration also has other very positive benefits, including improved infiltration, retention of water and impact on soil fertility.

Improving our knowledge of the technical potential of soil carbon sequestration and the practical implementation of better soil management aimed at increasing soil organic carbon offers potentially positive implications for food security and environmental sustainability in the long term.

Keywords: organic matter, soil organic carbon, sequestration, biochar, climate change

Obsah

1	Úvod.....	- 1 -
2	Cíl práce.....	- 3 -
3	Literární rešerše.....	- 4 -
3.1	Význam půdního organického uhlíku a organické hmoty v půdě	- 4 -
3.1.1	Pedosféra	- 4 -
3.1.2	Organický uhlík	- 5 -
3.1.3	Uhlík v půdě	- 7 -
3.1.4	Organická hmota v půdě.....	- 7 -
3.2	Sekvestrace uhlíku	- 9 -
3.2.1	Problematika klimatu.....	- 9 -
3.2.2	Přístupy k odstraňování uhlíku z atmosféry	- 10 -
3.2.3	Sekvestrace uhlíku v půdě	- 10 -
3.2.4	Mnohočetné přínosy zvýšených zásob uhlíku v půdě na orné půdě.....	- 11 -
3.2.5	Nasycení půdy.....	- 12 -
3.3	Možnosti snížení ztrát uhlíku z půdy.....	- 12 -
3.3.1	Ochrana organické hmoty v půdě	- 12 -
3.3.2	Omezení ztrát organické hmoty v půdě	- 13 -
3.4	Možnosti zvýšení ukládání uhlíku v půdě.....	- 15 -
3.4.1	Organické hnojení a další opatření zvyšující obsah půdního uhlíku.....	- 15 -
3.4.2	Přidávání biouhlu do půdy.....	- 15 -
3.5	Způsoby hodnocení zásob uhlíku v půdě	- 16 -
3.6	Metody odhadu potenciální sekvestrace uhlíku v půdě	- 17 -
3.7	Zhodnocení stavu zásob uhlíku.....	- 17 -
3.8	Porovnání zásob uhlíku v půdách ČR se zahraničními údaji	- 23 -
3.9	Možnosti navýšení půdního organického uhlíku	- 24 -
4	Diskuze.....	- 26 -
5	Závěr	- 29 -
6	Literatura.....	- 30 -

1 Úvod

Pokračující nárůst zemědělské produkce na celém světě má zásadní dopad na koloběh vody, živin a globální emise uhlíku. Téměř 40 % veškerého celosvětového povrchu půdy bylo přeměněno na pastviny a travní porosty. Orná půda tvoří zhruba 10 % souše. Změna využití půdy na zemědělství společně se zemědělskou výrobou významně přispívají k nárůstu CO₂ v atmosféře a to až 24 % celosvětových emisí skleníkových plynů. Dekarbonizací lze zabránit nevratným následkům klimatických změn (*IPCC - Assessment Report, AR,2023*).

Půda však může být nejen zdrojem, ale i rezervoárem uhlíku, v závislosti na způsobu hospodaření, vstupu biomasy do půdy a jejím využití v mikroklimatických podmínkách a bioklimatických změnách (Zomer et al. 2017).

Vzhledem k tomu, že v terestrických ekosystémech je největším zásobníkem uhlíku právě půda, mají tak půdy (zejména temperátních a boreálních lesů) velký význam pro fixování uhlíku.

Roli půdního organického uhlíku v globálních cyklech uhlíku je věnována celosvětově stále větší pozornost vzhledem k jeho funkci jako přirozené úložiště uhlíku schopné snižovat atmosférický CO₂ (Lal et al. 2015).

Tzv. sekvestrace (zachytávání) uhlíku spočívá v jeho fixaci v půdě a zabránění úniku do atmosféry. Dochází tedy k imobilizaci uhlíku v půdě na dlouhou dobu a oddělení uhlíku od jeho globálního cyklu, což je velmi žádoucí z hlediska problematiky současných klimatických změn. Sekvestrace půdního organického uhlíku je definována jako „proces přenosu CO₂ z atmosféry do půdy prostřednictvím rostlinných zbytků a jiných organických látek, které jsou uloženy v půdě jako součást organické hmoty (humusu)” (Lal et al. 2015). Panuje všeobecná shoda, že technický potenciál pro sekvestraci uhlíku v půdě je významný a též je dokumentován konsenzus o velikosti tohoto potenciálu (Zomer et al.2017).

Z hlediska výhodné sekvestrace uhlíku v půdě je velmi důležité dbát na zpomalení degradace organické hmoty. Lze toho dosáhnout vhodným hospodařením na zemědělské půdě (omezením klasické orby a kultivačních operací). Jde o to, že změna způsobu obhospodařování půdy způsobí čistý dodatečný přírůstek uhlíku z atmosférického CO₂ do suchozemské biosféry, čímž dojde ke zpomalení či dokonce zvratu nárůstu koncentrace emisí CO₂ v atmosféře. K efektivní sekvestraci půdního organického uhlíku dále přispívá jeho dodání do půdy. Mezi tyto možnosti patří přidávání organických hnojiv. Hnojiva obsahují organickou hmotu již vyvráslou nebo částečně odolnou rozkladu. Jedná se o komposty a chlévský hnůj (Šimek et al. 2019). V poslední době se dostává do popředí použití tzv. biocharu. Biouhel (*biochar*) vzniká pyrolýzou biomasy. Vzniká vysoce pórovité, jemně mleté dřevěné uhlí s vysokým obsahem uhlíku. Obvykle je používán rostlinný materiál, ale někdy i komunální odpad nebo zvířecí hnůj. Výhodou biouhlu je, že se jedná o velmi stabilní materiál. Zkušenosti s dlouhodobým hnojením dřevěným uhlím v Amazonii ukazují, že jsou tyto půdy velmi úrodné (tzv. antropogenní černozemě) ve srovnání s okolními půdami ve stejné oblasti (Sohi et al. 2010).

Aktuální data o způsobu hodnocení sekvestrace půdního organického uhlíku, o stavu zásob v ČR a zahraničí, o možnostech zvyšování zásob půdního uhlíku přispějí k větší

informovanosti a též zvýší efektivitu sekvestrace uhlíku v rámci snahy mírnit negativní klimatické změny.

2 Cíl práce

Práce měla za cíl na základě rešerše literatury shromáždit a zhodnotit význam půdního organického uhlíku a organické hmoty (humusu) v půdě zejména z hlediska zmírnění klimatických změn.

Dále ukázala možnosti, jak snížit ztráty uhlíku (vhodné hospodaření k omezení mineralizace a eroze) a zvýšit jeho ukládání v půdě (kořenová biomasa, organické hnojení, biouhel).

Cílem bylo též uvést, jakým způsobem je možné hodnotit zásoby uhlíku v půdě.

V praktické části:

- a) byl zhodnocen stav zásob uhlíku v zemědělských a lesních půdách dle dostupných údajů
- b) byly porovnány zásoby uhlíku v půdách ČR se zahraničními údaji.

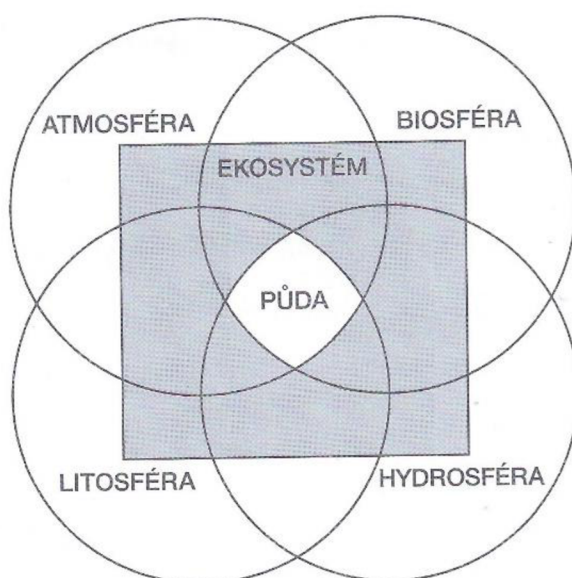
V závěru byly nastíněny možnosti, jak konkrétně v našich podmínkách zásoby uhlíku zvýšit.

3 Literární rešerše

3.1 Význam půdního organického uhlíku a organické hmoty v půdě

3.1.1 Pedosféra

Pedosféra - půda v obecném smyslu – představuje nejsložitější část ekosféry i suchozemských ekosystémů. Ve vzájemných interakcích se zde setkávají všechny hlavní sféry Země: litosféra, atmosféra, hydrosféra i biosféra, jak ukazuje obr. 1. Vzájemné působení sfér vytvořilo velké množství různých typů půd, které mají základní rysy společné. Skalní podklad je pokryt neuspořádaným materiálem, který se v geologii označuje jako regolit. Tato vrstva byla vytvořena z materiálu zaneseného „odjinud“ vodou, ledovcem, větrem apod. nebo vznikla zvětráváním skalního podkladu. Svrchní vrstva regolitu se liší od spodní tím, že v ní rostou rostliny, je oživena značným množstvím nejrůznějších organismů a obsahuje jejich odumřelé a pozměněné zbytky. Uvedená svrchní vrstva regolitu je půda (Šimek et al. 2019).



Obrázek 1: Interakce sfér Země. V půdě dochází k setkání vlivu všech zemských sfér. Půda též ovlivňuje ostatní sféry. Zdroj: Šimek et al. (2019)

Půda je jedním ze základních přírodních zdrojů. Je považována za zdroj neobnovitelný (1 cm vrstvy půdy se vytvoří za cca 200 let). I když se jedná o tenkou vrstvu na zemském povrchu (ve srovnání s mocností hornin) - význam půdy je zásadní a nenahraditelný. Nejdůležitější funkce lze shrnout tak, že půda:

- umožňuje růst rostlin
- má filtrační funkci pro vodu
- zabezpečuje mnohé procesy cyklů živin a látek v prostředí
- pokrývá povrch Země, je místem pro nejrůznější stavby (Šimek et al. 2019)

Narušením některých funkcí půdy dochází k degradaci půdy. Tzv. půdní hrozby, které mohou vést k degradaci, definovala Evropská komise v rámci aktivity: „Tematická strategie pro ochranu půdy“. Jedná se o tyto procesy: úbytek organické hmoty, eroze půdy (větrná, vodní, nevhodným obděláváním), kontaminace půdy, acidifikace půdy, salinizace, snížení biodiverzity, záplavy a sesuvy půdy, nepropustné překrývání půdního povrchu (*sealing*), zhutnění půdy. Uvedeným procesům je třeba předcházet či důsledně napravovat nežádoucí důsledky uvedené degradace. Jen kvalitní půda je způsobilá zajistit požadované nároky a zajišťovat trvale udržitelný rozvoj (Šimek et al. 2019).

Mezi základní globální výzvy patří klimatické změny. Půda zde hraje stěžejní úlohu, neboť zadržuje největší množství uhlíku v suchozemském ekosystému. Udržení tohoto množství nebo dokonce zvýšení obsahu (sekvestrace) organického uhlíku v půdě tak napomůže zmírnit nepříznivé klimatické změny (Lal et al. 2015).

3.1.2 Organický uhlík

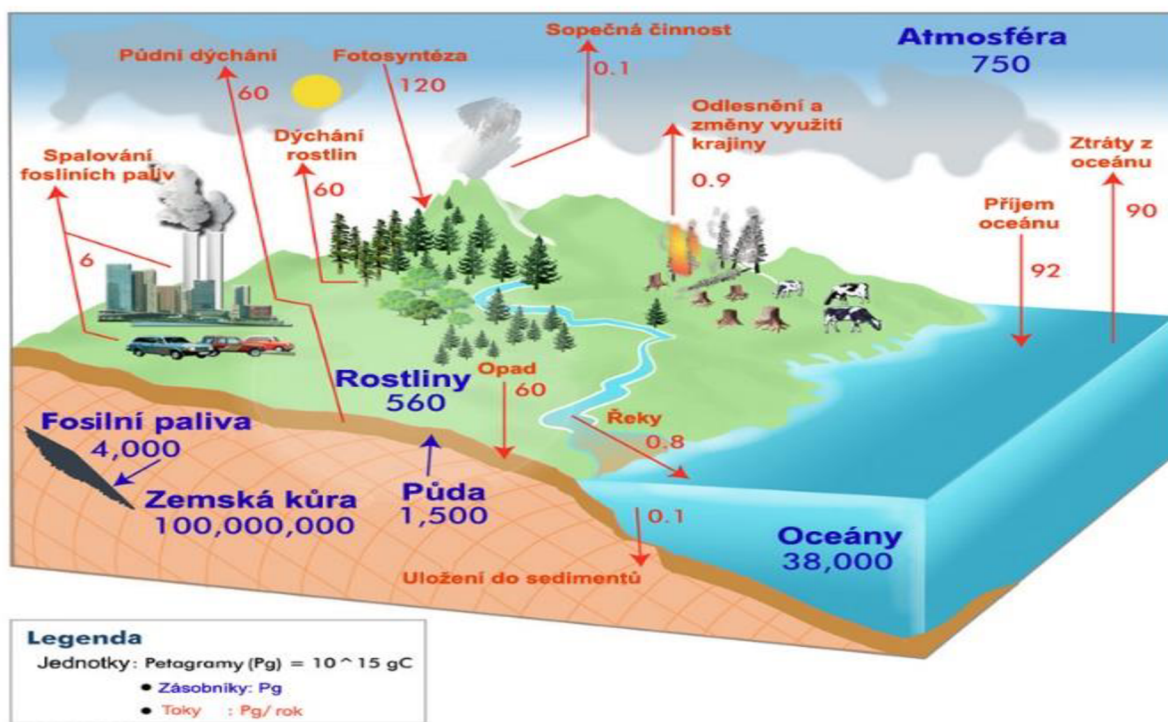
Uhlík je základním prvkem veškeré biomasy. Všechny organické látky jej obsahují a je tak základem života na Zemi. Uhlík se na Zemi vyskytuje jako prvek (diamant, grafit) a samozřejmě též ve sloučeninách. Jde zejména o uhličitany, nejčastěji kovů (Ca, Mg, Mn, Fe, Cu aj.), dále ve formě oxidu uhličitého (CO₂), oxidu uhelnatého (CO), metanu (CH₄). Kromě toho je uhlík základní součástí obrovského množství organických sloučenin (např. aminokyseliny, sacharidy, puriny a další). Uhlík prochází cyklem, který souvisí s životem a smrtí organismů. Během růstu a života se uhlík akumuluje ve složitých látkách v biomase a po odumření dochází rozkladem a mineralizací nekromasy k jeho uvolňování ve formě jednoduchých sloučenin. Důležitou úlohu hrají v uvedeném cyklu mikroorganismy, které jsou zodpovědné za rozklad odumřelých organismů a tím lze uhlík znovu využít pro nové organismy (Kane 2015).

Cyklus uhlíku je charakterizován přenosem mezi suchozemskými ekosystémy, oceány a atmosférou. Hlavní rezervoáry uhlíku na Zemi jsou atmosféra, oceány, suchozemská biosféra a půda (Šimek et al. 2019).

V atmosféře je uhlík obsažen zejména ve formě CO₂, dále též v malém množství ve formě CO, CH₄ a jiných plynů a látek. Převaha CO₂ z uhlikatých sloučenin v ovzduší je výrazná. Celkový obsah uhlíku v atmosféře v této formě je odhadován na 650-750 Pg (1 P = 10¹⁵), zatímco na metan připadá 1 % atmosférické části cyklu uhlíku, což odpovídá celkovému obsahu v ovzduší 3 Pg uhlíku. Celkový obsah oxidu uhelnatého v atmosféře je 0,2 Pg.

V oceánech je uhlík obsažen v těchto formách: rozpuštěný anorganický a organický uhlík, organický uhlík v detritu (jakákoliv forma neživé organické hmoty) a organický uhlík v biomase mořských organismů. Oceány mají výraznou roli v dynamické rovnováze uhlíku. Fotoautotrofní organismy v povrchových vodách fixují uhlík z anorganických forem a vytvářejí uhlikaté organické látky, které jsou součástí biomasy mikroorganismů a rostlin. V suchozemských ekosystémech je uhlík obsažen v půdě, rašelině, odpadu a biomase. Výměna uhlíku mezi atmosférou a suchozemskými ekosystémy probíhá zejména prostřednictvím CO₂ a metanu. Globální cyklus uhlíku je znázorněn na obrázku 2.

Globální cyklus uhlíku



Obrázek 2: Globální cyklus uhlíku. Zdroj: <http://kfrserver.natur.cuni.cz/globe/others-CZ.htm>

Největší množství uhlíku ze všech uvedených rezervoárů je obsaženo v litosféře ve formě: a) uhličitánů a b) organických látek: uhlí, zemní plyn, ropa, bitumény (živice - vysoce viskózní organické kapaliny, např. asphalt a dehet), kerogen (polymerní organické látky, obsaženy v ropných břidlicích, jedna z forem nekonvenční ropy). Výskyt uhlíku v různých zásobnících ukazuje přehledně tabulka 1. Relativně nejmenším globálním zásobníkem uhlíku je atmosféra. Ta má ale výrazný dynamický charakter, neustále do ní proudí uhlikaté látky (např. CO_2 , CH_4) a dochází zde k řadě přeměn (Šimek et al. 2019).

Tabulka 1: Výskyt uhlíku v jednotlivých hlavních zásobnících

Zásobník uhlíku (celosvetově)	Množství uhlíku (Pg C)
Atmosféra	640
živá biomasa	830
rozpuštěný organický uhlík	1500
organický uhlík v sedimentech a půdě	3500
rozpuštěný CO_2	38 000
uhličitany (vápenec a ostatní minerály a horniny)	18 000 000
fixovaný organický uhlík (zemní plyn, uhlí, ropa, bitumény, kerogen)	25 000 000

Zdroj: Šimek et al. (2019)

3.1.3 Uhlík v půdě

Obsah uhlíku v půdě na Zemi je velmi vysoký. Uhlík je obsažen v organické a též anorganické formě, zejména v uhličitanech. Je odhadováno, že obsah organického uhlíku v půdách je 1 200 - 3 000 Pg. Příčina rozdílů v odhadovaných zásobách uhlíku v půdě je dána tím, že se provedl odhad pro různou hloubku půdy; někteří autoři uvádějí pouze svrchní vrstvu půdy 1 metru, jiní počítají s celkovou hloubkou půdy (Šimek et al. 2019).

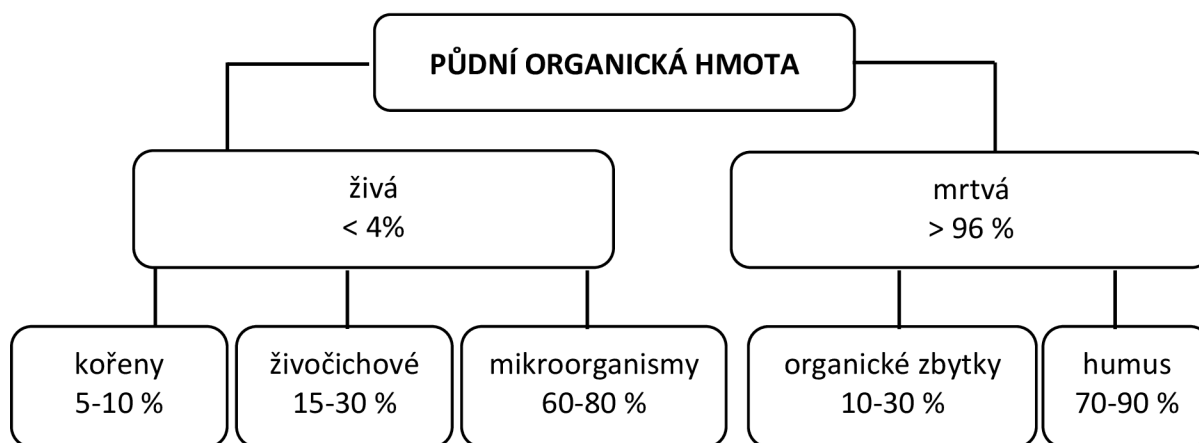
Převážná část uhlíku pochází z rostlin. Jak rostliny rostou a odumírají, zanechávají v půdě uhlíkaté organické sloučeniny různého chemického složení. Půdní fauna tyto látky metabolizuje a část uhlíku v nich obsaženého zabudovává do nových chemických sloučenin v rámci své vlastní biomasy a zbytek odevzdává do atmosféry ve formě CO₂, nebo jej zpět vylučuje do půdy (Kane 2015). Tímto nepřetržitým pohybem v půdním potravním řetězci uhlík neustále mění své formy, neboť je zabudováván do nových organismů, nebo přeměňován na různé sloučeniny. V odborné literatuře je uhlík rozdělován do obecných kategorií dle toho, jaký čas uhlík zůstává v půdě, což je označováno jako „střední doba setrvání“. Nejvíce používaný model uvedených poolů rozlišuje tyto tři skupiny: rychlý nebo labilní pool, pomalý pool a stabilní pool (Jenkinson & Rayners 1977).

Půdní uhlík v rychlém poolu projde a vrátí se do atmosféry v rozmezí několika dnů až let. Uhlík této zásoby je typicky složen z čerstvě zabudovaných rostlinných zbytků a jednoduchých uhlíkatých sloučenin, které vylučují kořeny. Tento rychlý, labilní pool je nejvíce využíván půdními mikroorganismy a vytváří tak velké množství CO₂. Pomalý pool se skládá z mikrobiálních vedlejších produktů z rychlého fondu, z více zpracovaných rostlinných zbytků a uhlíkatých molekul, které jsou chráněny před mikroorganismy fyzikálními nebo biochemickými procesy v půdě. Střední doba setrvání tohoto poolu je v rozmezí v rozmezí let až desetiletí - záleží na klimatu, struktuře půdy a daném hospodaření. Naproti tomu, třetí, tzv. stabilní pool je odolnější vůči vnějším vlivům a mění se velmi pomalu. Zde se průměrná doba setrvání pohybuje v rozmezí staletí až tisíciletí. Tento pool se často nazývá humus, což je označení pro skupinu uhlíkových látek, které jsou výrazně odolné vůči rozkladu a půdní uhlík je zde velmi dobře chráněn před mikrobiálním rozkladem (Six et al. 2002). Velikost každého z těchto poolů se samozřejmě v různých půdách liší. Bylo zjištěno, že velikost stabilního poolu zůstává relativně konstantní, zatímco velikosti rychlého a pomalého zásobníku jsou citlivé na hospodaření (Kane 2015).

V jednotlivých velikostních frakcích půdy je organický uhlík různě zastoupen, též je zde různý obsah dusíku a fosforu. Humusové horizonty lesních půd mají mnohem větší koncentraci organického uhlíku a celkového dusíku než minerální horizonty (Jenkinson & Rayners 1977).

3.1.4 Organická hmota v půdě

Půdní organickou hmotu tvoří: živé a mrtvé půdní organismy, jejich zbytky, organické látky. Zastoupení frakcí je v různých půdách různé. Živé organismy tvoří obvykle méně než 4 hmot.%. Na neživou organickou hmotu připadá většinou více než 90 hmot.% organického podílu půd. Jednotlivé zastoupení ukazuje obrázek 2.



Obrázek 2: Rozdělení organické hmoty v půdě (hmotnostní procenta). Zdroj: Šimek et al. (2019)

Obsah organické hmoty v půdě se velmi liší. Povrchové vrstvy minerálních půd obsahují několik procent organických látek. Obsah organické hmoty se obecně snižuje směrem do hloubky půdního profilu. Hmotnostní poměr organické hmoty v půdě k dusíku je cca 20: 1 a lze tak přibližně odhadnout obsah dusíku v půdě. Několik faktorů ovlivňuje množství organické hmoty v půdě. Jedná se zejména o teplotu a srážky, dále vegetaci, texturu a kultivaci půdy. Při vyšších teplotách se organické látky rozkládají a dochází tak k nižšímu obsahu půdní organické hmoty. Vyšší podíl vlhkosti v půdě znamená naopak vyšší obsah organické hmoty. Půdy více provzdušněné obsahují méně organické hmoty než zamokřené půdy. Těžší půdy mají více uvedené hmoty než lehčí půdy. Při kultivaci půdy může též docházet k podstatnému ovlivnění obsahu organické hmoty. Panenské půdy (půdy, které vznikly v přirozených ekosystémech) mají před kultivací vysoký obsah organické hmoty. Význam organické hmoty spočívá v ovlivnění stability půdních agregátů a funkce půdy zadržovat vodu a v ovlivnění kationtové výměnné kapacity. Dále je organická hmota hlavním zdrojem energie pro většinu půdních mikroorganismů a určitý podíl je též nutný pro efektivní pěstování plodin. Pro dobrou funkci půdy vždy záleží na komplexní souhře všech fyzikálních, chemických a biologických vlastností. Vyšší obsah organické hmoty není někdy přímo úměrný úrodnosti dané půdy (Šimek et al. 2019).

V poslední době též organická hmota v půdě získává stále větší pozornost jako potenciálně poměrně velký a nejistý zdroj uhlíku pronikající do atmosféry v reakci na předpokládaný nárůst globální teplot. Z hlediska ekvestrace uhlíku v půdě je nutné zdůraznit, že je velmi důležité dbát na **zpomalení rozkladu organické hmoty**. Lze toho dosáhnout omezením klasické orby a kultivačních operací. K optimálnímu obsahu organické hmoty vede racionální agrotechnika, která spočívá v dodávání chlévského hnoje, kompostů a tzv. zeleného hnojení (zaorávání rostlin k tomuto účelu) (Šimek et al. 2019).

3.2 Sekvestrace uhlíku

3.2.1 Problematika klimatu

Pokračující nárůst zemědělské produkce na celém světě má zásadní dopad na koloběh vody, živin a globální emise uhlíku. Téměř 50 % veškerého celosvětově pokrytého povrchu půdy bylo přeměněno na ornou půdu, pastviny a výběhy.

Změna využití půdy na zemědělství společně se zemědělskou výrobou **významně přispívají k nárůstu CO₂ v atmosféře**, a to až 24 % celosvětových emisí skleníkových plynů. (IPCC -*Assessment Report, AR*, 2023). Dekarbonizace je nutná, pokud chceme zabránit nevratným následkům klimatických změn.

Z hlediska problematiky klimatu je alarmující poslední Šestá hodnotící zpráva (IPCC -*Assessment Report, AR*) z března 2023, vědeckých autorit z Mezinárodního panelu pro změnu klimatu (*The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*), která uvádí, že:

lidská činnost, především prostřednictvím emisí skleníkových plynů, jednoznačně způsobila globální oteplování, přičemž v letech 2011-2020 byla globální povrchová teplota o 1,1 °C vyšší než v letech 1850-1900. Globální emise skleníkových plynů se nadále zvyšují, neboť dochází k neudržitelnému využívání energie, půdy a výroby napříč jednotlivými zeměmi.

Došlo k rozsáhlým a rychlým změnám v atmosféře, oceánu, kryosféře a biosféře. Změna klimatu způsobená člověkem již ovlivňuje mnoho extrémních projevů počasí ve všech oblastech světa. Důsledkem jsou rozsáhlé negativní dopady na ekosystémy a lidskou společnost. Intenzivní, rychlé a trvalé snižování emisí skleníkových plynů by vedlo ke znatelnému zpomalení globálního růstu teploty během přibližně dvou desetiletí.

Znepokujícím v této zprávě jsou zejména argumenty, že pro jakoukoliv budoucí úroveň oteplování je mnoho rizik souvisejících s klimatem vyšší, než bylo hodnoceno v minulé zprávě IPCC (AR5) (*AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014 - IPCC*) a předpokládané dlouhodobé dopady jsou až několikanásobně vyšší než ty, které jsou v současnosti pozorované.

Mnohé možnosti změn v zemědělství, lesnictví a jiného využití půdy (AFOLU - *agriculture, forestry and other land use*) umožňují adaptaci a zmírnění dopadů změny klimatu a mohly by být v blízké budoucnosti rozšířeny ve většině regionů. Zachování, zlepšení řízení a obnova lesů a dalších ekosystémů nabízí největší podíl ekonomického potenciálu pro zmírnění dopadů, přičemž dle této nové zprávy IPCC - nejvyšší celkový potenciál zmírnění dopadů má snížení odlesňování v tropických oblastech.

K dosažení nulových emisí CO₂ zpráva uvádí podstatné snížení celkové spotřeby a minimální využití fosilních paliv a využití zachycování a ukládání uhlíku (IPCC 2023)

Vývoj technologií ke snížení rychlosti zvyšování koncentrace uhlíku v atmosféře oxidu uhličitého (CO₂) z ročních emisí 8,6 Pg C ročně-1 z energetiky, zpracovatelského průmyslu, využívání půdy a dalších zdrojů a kultivace půdy je důležitou otázkou jednadvacátého století (Lal et al. 2008).

3.2.2 Přístupy k odstraňování uhlíku z atmosféry

Mezi hlavní přístupy k odstraňování uhlíku z atmosféry a ukládání uhlíku prostřednictvím správy suchozemského ekosystému patří (Způsoby odstraňování uhlíku z atmosféry | Carboneg):

Zalesňování - stromy pohlcují uhlík a prostřednictvím fotosyntézy odstraňují CO₂ z atmosféry a přeměňují jej na biomasu. Mezi další ekologické výhody patří též vliv na oblačnost. V 67% zkoumaných oblastí ve světě by zalesňování zvýšilo nízkou oblačnost a mělo tak ochlazující účinek. Zalesňování též zvyšuje obsah organického uhlíku a kvalitu půdy, zabraňuje erozi a rozšiřování pouští.

Výroba bioenergie se zachycováním a ukládáním uhlíku (*Bioenergy with carbon capture and storage - BECCS*). Jedná se o proces využívání biomasy k výrobě energie v průmyslu a energetice zachycování jejích emisí před jejich vypuštěním zpět do atmosféry a následné ukládání zachyceného uhlíku buď pod zem, nebo do výrobků s dlouhou životností, jako je beton.

Přímé zachycování uhlíku ze vzduchu (*Direct Air Capture - DAC*) je proces chemického čištění oxidu uhličitého přímo z okolního vzduchu a jeho následné ukládání buď pod zem, nebo do produktů s dlouhou životností. Jedná se energeticky náročnou a nákladnou technologii.

Mineralizace uhlíku. Některé minerály - např. olivín přirozeně reagují s CO₂ a mění uhlík z plynu na pevnou látku. Cílem tohoto CDR projektu je urychlit přirozené chemické zvětrávání minerálu tím, že se velké množství rozemleté uведенé horniny rozšíří na velkou plochu. Nevýhody však spočívají v nalezení vhodného a dostatečného zdroje konkrétního minerálu, nízkoemisní těžby a přepravy velkého množství horniny.

Využití oceánů. Cílem je využití fotosyntézy v pobřežních rostlinách, mořských řasách či fytoplanktonu. Výhodou této varianty je dostupná obrovská rozloha oceánů. O širších ekologických dopadech ale není mnoho známo a je zapotřebí dalšího výzkumu.

V poslední době se rozlišuje abiotická a biotická sekvestrace.

Abiotická sekvestrace je založena na fyzikálních, chemických reakcích a technikách bez zásahu živých organismů (např. rostlin, mikrobů). Abiotické strategii sekvestrace C v oceánských a geologických strukturách byla věnována značná pozornost (Freund & Ormerod 1997), protože teoreticky abiotická sekvestrace má větší pohlcovací kapacitu než biotická sekvestrace (Lal 2008). Jedná se o vstřikování CO₂ do hlubin oceánů, dále o zachycení, zkapalnění, přepravu a vstřikování průmyslového CO₂ do hlubokých geologických vrstev a též transformaci do geologicky a termodynamicky stabilních uhličitánů. Tyto techniky mají velký potenciál tisíců Pg, jsou však drahé a obnášejí riziko úniku. V porovnání s tím jsou **biotické techniky** přírodní, okamžitě použitelné, cenově efektivní, mají však omezenou kapacitu pohlcování (Lal 2008).

3.2.3 Sekvestrace uhlíku v půdě

Změny ve využívání půdy od průmyslové revoluce přispěly 136±55 Pg uhlíku do atmosféry ze změn uhlíku v biomase s vyčerpáním půdního organického uhlíku v půdě (*Soil*

Organic Carbon), což představuje další příspěvek ve výši 78 ± 12 Pg uhlíku. Tento odhad 214 ± 67 Pg C ze sektoru využívání půdy je srovnatelný s odhadovanými 270 ± 30 Pg C ze spalování fosilních paliv (Zomer et al. 2017).

Jak již bylo uvedeno, půda však může být nejen zdrojem, ale i značným rezervoárem uhlíku, v závislosti na způsobu hospodaření a jejím využití v mikroklimatických podmínkách a bioklimatických změnách (Zomer et al. 2017).

Ve světové půdě je uloženo podstatně více uhlíku než je obsaženo v atmosféře. Vzhledem k tomu, že v terestrických ekosystémech je největším zásobníkem uhlíku půda-mají tak půdy (zejména temperátních a boreálních lesů) velký význam pro fixování uhlíku. Tato tzv. sekvestrace (oddělení) uhlíku spočívá v jeho fixaci v půdě a zabránění úniku do atmosféry. Dochází tedy k imobilizaci uhlíku v půdě na dlouhou dobu a oddělení uhlíku od jeho globálního cyklu, což je velmi žádoucí z hlediska problematiky současných klimatických změn. V poslední době je termín sekvestrace uhlíku vnímán v souvislosti se zmírněním klimatických změn. Jde tedy o to, že změna způsobu obhospodařování půdy způsobí čistý dodatečný přírůstek uhlíku z atmosférického CO_2 do suchozemské biosféry, čímž dojde ke zpomalení či dokonce zvratu nárůstu koncentrace emisí CO_2 v atmosféře (Lal 2008).

Roli půdního organického uhlíku v globálních cyklech uhlíku je věnována celosvětově stále větší pozornost vzhledem k jeho funkci jako přirozené úložiště uhlíku schopné snižovat atmosférický CO_2 (Zomer et al. 2017).

3.2.4 Mnohočetné přínosy zvýšených zásob uhlíku v půdě na orné půdě

Výhody zvyšování obsahu organické hmoty v půdě přesahují potenciál zmírnění nepříznivých změn klimatu. Zvýšené ukládání organického uhlíku do půdy je podporováno zlepšenými zemědělskými a půdoochrannými postupy. Ke zvýšení odolnosti dochází prostřednictvím zlepšení stavu úrodnosti (Banwart et al. 2014). Je obecně známo, že změny ve vláhovém režimu (např. sucho nebo přivalové srážky) mohou významně ovlivnit produktivitu plodin. Tyto klimatické podmínky zmírňuje půdní organický uhlík, který dodává strukturu, zlepšuje infiltraci a zadržování vody, zvyšuje kationtovou výměnnou kapacitu a ovlivňuje úrodnost půdy, která je hlavním řídicím faktorem zemědělské produktivity a potravinové bezpečnosti (Lal 2004). Půdní podmínky mají výrazný vliv na množství a účinnost bakterií, které se podílejí na tvorbě dusíku a které jsou životně důležité pro pěstování plodin v systémech, které postrádají vstupy hnojiv (Li et al. 2015). Zvýšení půdního organického uhlíku prostřednictvím zlepšených postupů hospodaření pravděpodobně tak přispěje ke značné odolnosti orné půdy a zemědělských systémů, zejména v letech sucha nebo zvýšené sezónní úrodnosti, což pomůže vyhnout se půdním suchům, která jsou důsledkem degradace půdy (Zomer et al. 2017).

Zemědělské postupy, které zvyšují obsah organické hmoty v půdě, většinou podporují lepší produkci potravin a další ekosystémové služby. To je v určitém kontrastu s jinými navrhovanými strategiemi pro snížení emisí, jako jsou např. zalesňování (výsadba rychle rostoucích stromů) a BECCS (bioenergie a zachycování a ukládání uhlíku), u kterých bude docházet k poškození poměrně velkého množství přírodních ekosystémů nebo produktivní

zemědělské půdy, aby byl ovlivněn obsah CO₂ v atmosféře (Field et al. 2017, Boysen et al. 2017). Vzhledem k tomu, že globálně pro stovky milionů drobných zemědělců závisí jejich živobytí na orné půdě - z obecného hlediska, přínosy zvýšeného ukládání půdního uhlíku lze považovat pouze za jednu významnou součást z řady výhodných cílů, které je třeba dosáhnout (Lal et al. 2015).

3.2.5 Nasycení půdy

I přes obrovskou kapacitu půdy pro sekvestraci uhlíku, je potřeba vzít v úvahu, že nasycení uhlíkem může dosáhnout určitého limitu. Jakmile dojde k nasycení přestává být půda rezervoárem a může se stát naopak zdrojem CO₂ nebo může dojít k ustálenému stavu, kdy bude přijímat stejné množství uhlíku, kolik ho ročně vypustí. Bod nasycení dané půdy je popsán jako bod, při kterém přestanou probíhat zde již zmíněné fyzikální a chemické procesy ochrany uhlíku. Jakékoliv další navýšení lze pak pokládat za "volný" uhlík a zranitelný vůči mikrobiálnímu napadení. Je nutné zdůraznit, že vlastnosti půd y, jako je obsah a typ jílu, mají silný vliv na uvedenou ochranu a z toho vyplývá i jejich výrazný dopad na hranici nasycení půdy (Kane 2015).

Nicméně, většina půd na celém světě není ani zdaleka nasycena uhlíkem a ze zvýšeného přísunu uhlíku by měly velký prospěch. Vzhledem ke špatnému hospodaření se většina půd celosvětově nachází pod hranicí nasycení (Lal 2004).

3.3 Možnosti snížení ztrát uhlíku z půdy

Sekvestraci půdního uhlíku v organické hmotě lze podpořit těmito mechanismy:

- a) ochranou organické hmoty (fyzikální, chemickou)
- b) omezením ztrát (mineralizací, erozí) organické hmoty v půdě
- c) zvýšeným dodáním organické hmoty do půdy

3.3.1 Ochrana organické hmoty v půdě

Důležitým aspektem pro uchování uhlíku v půdě v různých formách je jeho dostupnost organismům, a tudíž jeho náchylnost k rozkladu. Organická hmota může **být chráněna** uvedenými způsoby:

3.3.1.1 Fyzikální ochrana

Tvorba agregátů (fyzikální ochrana)

Po vstupu do půdy je čerstvá organická hmota rozdělena na malé části činností půdních živočichů. V této formě je dobře dostupná organismům, je labilní a snadno rozložitelná (je označována jako „*particulate organic matter*” - *částicová organická hmota*). Dochází však k ochraně vazbou na minerální částice nebo obalením minerálními částicemi při tvorbě

agregátů. Uvedené procesy způsobují odolnost vůči rozkladu a organická hmota je tzv. „rekalitrantní“, tedy odolná. Organická hmota je od okolního prostředí chráněna:

- fyzikální bariérou (velikost pórů mezi částicemi mikroagregátů je < 20 μm a je tak omezen nejen přístup živočichů, ale i mikroorganismů),
- anaerobním prostředím vznikajícím v agregátech (zpomaluje či ruší mikrobiální rozklad)

Tím, že dochází k omezení přístupu a navození nevhodného prostředí pro mikroorganismy, uvedené dva mechanismy výrazně ochraňují organickou hmotu před rozkladem. Dále agregáty v půdě zajišťují též vysoký podíl makropórů. Zvyšuje se tak pórovitost půdy a kapacita poutat vodu. Vznik půdních agregátů je kromě příznivého efektu pro úrodnost a kvalitu půdy též významným stabilizačním mechanismem pro uložení organické hmoty v půdě. Jestliže agregáty zůstávají nenarušené a stabilní, mohou chránit uhlík v půdě velmi dlouhou dobu. Obdělávání půdy může ale agregáty rozbít a vystavit půdní uhlík mikrobiálnímu napadení, což sníží množství organické hmoty a nedochází tak k žádoucí sekvestraci uhlíku v půdě (Grandy & Robertson 2007).

3.3.1.2 Chemická ochrana

Organo-minerální komplexy (chemická ochrana)

Schopnost půdy chemicky chránit molekuly uhlíku závisí na podílu minerální frakce půdy. Povrchy jílových částic mají silně záporný náboj. Některé vedlejší produkty mikroorganismů mají zase silný kladný náboj. Při kontaktu těchto molekul s jílovými částicemi se vytvářejí silné vazby, které chrání molekuly před mikrobiálním rozkladem. Tato forma chemické ochrany je velmi účinná a pomáhá vysvětlit, proč vyšší obsah uhlíku v půdě a jílu celosvětově koreluje (Six et al. 2002). Vzhledem k tomu, že nelze změnit půdní obsah jílu, potenciál pro sekvestraci uhlíku závisí více na stávajícím složení půdy než na úpravách při hospodaření. Půdy s vysokým podílem jílu jsou vhodné pro sekvestraci uhlíku, a proto by se úsilí o rozšíření půdní sekvestrace uhlíku mohlo zaměřit na ornou půdu s vysokým obsahem jílu a upřednostnit ji (Kane 2015).

3.3.2 Omezení ztrát organické hmoty v půdě

3.3.2.1 Omezení mineralizace

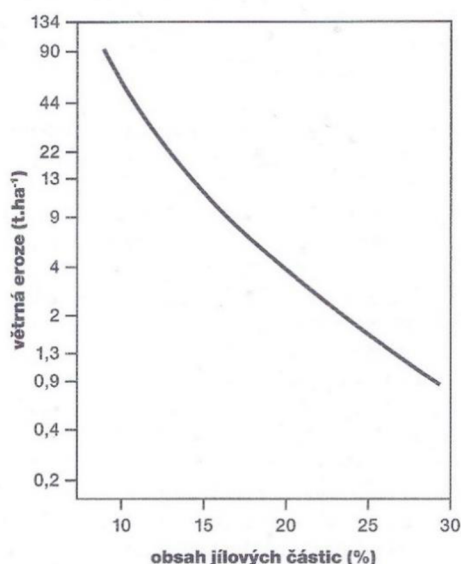
Princip **omezení mineralizace** spočívá v hospodaření bez zpracování půdy (nebo jen s minimálním zpracováním). Půda se nekypří orbou ani jinými agrotechnickými zásahy, což vede k tomu, že je méně provzdušněná a tím dochází k nižší rychlosti mineralizace. Tyto tzv. „minimalizační metody zpracování“ zahrnují: spojování operací do menšího počtu, vypouštění nebo nahrazování některých operací, omezení plochy nebo hloubky zpracování, setí do nezpracované půdy. Uvedené metody vedou k ušetření času i financí, ale jsou náročné na odbornou realizaci. Tyto metody nejsou však vhodné pro všechny půdy. Nedají se používat na

zaplevelených pozemcích a též na těžkých, jílovitých půdách, kde dochází k samovolnému zhutňování. Zde je pravidelná orba nutná (Šimek et al. 2019).

3.3.2.2 Omezení eroze

Eroze půdy představuje nejzávažnější mechanismus degradace půdy. Tento proces znamená odnos půdních částic, které se oddělí a jsou odnášeny pryč. Dochází tak nejen k poškození půdy, ale též ke ztrátám. V případě, že rychlost odnosu převýší tvorbu půdy, dochází k tzv. „čistě erozi“. Nárůst půdy je velmi pomalý. Za cca 100 - 300 let se vytvoří vrstva 1 cm půdy, což představuje přírůstek $0,3-1,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ při objemové hmotnosti $1,33 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Přemísťování částic půdy patří mezi normální geomorfologické procesy. Jedná se o tzv. geologickou erozi, kterou způsobuje vítr, voda, ledovce, sníh a dále též rostliny, živočichové a člověk. Za řadu změn v krajině (např. kaňony, údolí řek) je zodpovědná eroze. V případě, že k erozi přispívá člověk, jedná se o tzv. antropogenní erozi. Tento typ eroze může být způsoben nevhodným obděláváním půdy (např. orání jedním směrem po vrstevnici dochází k úbytku půdy v horní části svahu) (Ellis 1995).

Částice bohaté na organickou hmotu se ztrácejí zejména větrnou a vodní erozí. Omezení erozí je z hlediska snížení ztrát uhlíku v půdě velmi žádoucí. Výrazně účinný je kryt půdy vhodnou vegetací. Bylo zjištěno, že 70 % erozí v naší republice připadá na orné půdy bez pokryvu (Kapička a kol. 2017). Kromě volby vhodných plodin a osevních postupů je možné použít další opatření, jako je např. jiná kultivace na svazích po vrstevnicích, úprava vodního režimu. Mezi technická opatření patří protierozní meze, zatravněné pásy, terasy, příkopy, ochranné nádrže. Velikost větrné eroze též výrazně ovlivňuje textura půdy. S vyšším množstvím jílových částic klesá možnost eroze způsobené větrem, jak ukazuje obrázek 3.



Obrázek 3: Velikost větrné eroze v závislosti na obsahu jílových částic. Zdroj: Šimek et al. 2019

3.4 Možnosti zvýšení ukládání uhlíku v půdě

3.4.1 Organické hnojení a další opatření zvyšující obsah půdního uhlíku

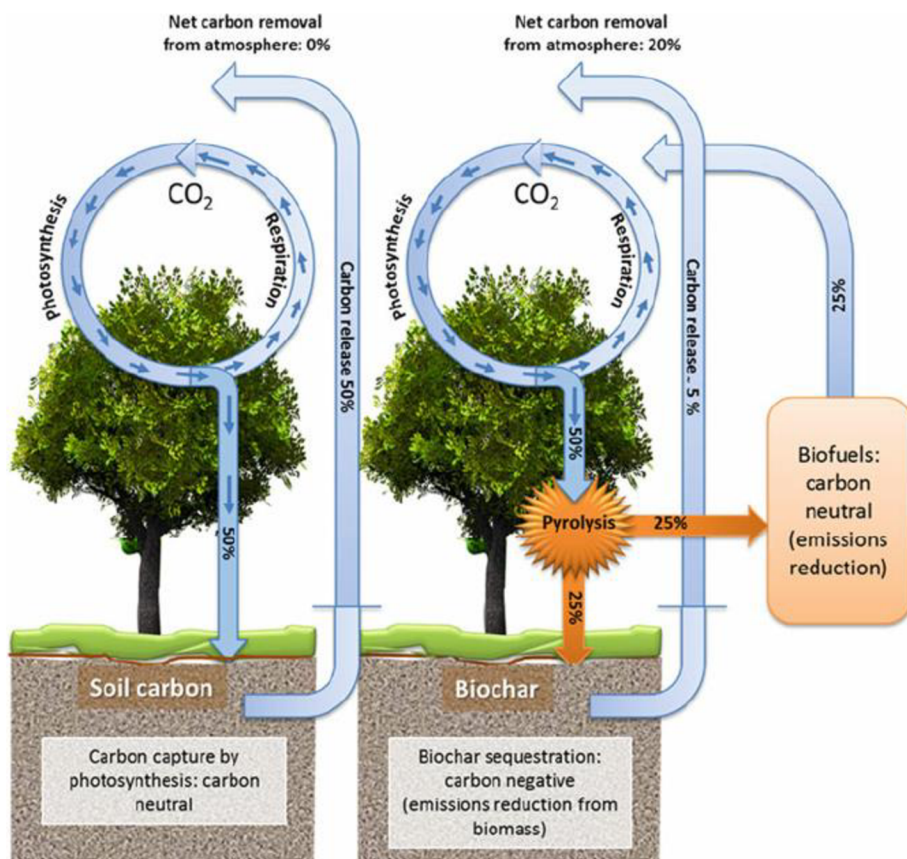
Mezi možnosti dodání organické hmoty do půdy patří přidávání organických hnojiv. Tato hnojiva obsahují organickou hmotu již vyzrálou nebo částečně odolnou rozkladu. Jedná se zejména o komposty a chlévský hnůj. Uvedený způsob zvýšené dodávky organické hmoty do půdy má však svůj problém, neboť kvatitních organických hnojiv je nedostatek. V současné době není dostatek vhodných surovin k výrobě kompostů. Pro výrobu kompostů nelze využít celé spektrum organických odpadů, neboť by mohlo dojít naopak ke znečištění půd. Mezi další opatření vedoucí ke zvýšení obsahu organické půdní hmoty patří (Lal et al. 2015):

- střídání plodin (hluboko kořenící víceleté pícniny)
- použití mulče
- podpora zalesňování
- rekultivace degradovaných půd
- zvýšení efektivity závlah

3.4.2 Přidávání biouhlu do půdy

V rámci problematiky sekvestrace uhlíku se v poslední době dostává do popředí použití tzv. biouhlu. Biouhel (*biochar*) vzniká pyrolýzou biomasy. Obvykle je používán rostlinný materiál, ale někdy i komunální odpad nebo zvířecí hnůj. Při pyrolýze dochází za nepřítomnosti kyslíku (či jen při omezeném množství) k termickému rozkladu organických látek. Při tomto procesu vzniká vysoce pórovité, jemně mleté dřevěné uhlí s vysokým obsahem uhlíku. Není pochyb o tom, že tuto uvedenou přeměnu uhlíku z rostlinného materiálu, původně získaného z atmosférického CO₂ fotosyntézou, do formy uhlíku s tímto stupněm stability lze považovat za skutečnou sekvestraci uhlíku (Powlson et al. 2011).

Hlavní výhodou biouhlu je, že se jedná o velmi stabilní materiál s odhadovanou životností v rozmezí staletí až tisíciletí (Lehmann 2007). Přidáním biouhlu lze zvýšit obsah uhlíku nad úroveň nasycení v dané půdě (Stewart et al. 2007). Výhodnost použití biouhlu ukazuje obrázek 4.



Obrázek 4: Schématické znázornění využití biouhlu. Zdroj: Verma et al. (2014)

Mezi pozitivní účinky při dodání biouhlu do půdy také patří: snížení ztrát vody vzhledem k vysoké vododržné schopnosti, snížení kyselosti. Dále biouhel snižuje ztráty živin tím, že redukuje vyplavování dusíku, působí příznivě pro mikroorganismy tím, že váže organické polutanty. Další výhodou biocharu spočívá v tom, že může být vyroben jako vedlejší produkt pyrolýzy určené k výrobě kapalných biopaliv a místní energie pro vytápění. Vzhledem k jeho vztahu k bioenergii ve velkém měřítku, biouhel by mohl být v budoucnu dostupný ve velkém množství a též levně (Powlson et al. 2011). Odhaduje se, že účinky biouhlu budou příznivé. Zkušenosti s dlouhodobým hnojením dřevěným uhlím v Amazonii ukazují, že jsou tyto půdy velmi úrodné (*terra preta*, tzv. antropogenní černozemě) ve srovnání s okolními půdami ve stejné oblasti (Sohi et al. 2010).

3.5 Způsoby hodnocení zásob uhlíku v půdě

Při analýze půdních vzorků na obsah organického uhlíku se výsledek obvykle vyjadřuje v jednotkách, jako je %, mg C kg⁻¹ půdy nebo µg C g⁻¹ půdy. Často se pro toto vyjádření používá označení obsah (*content*), na rozdíl od množství na jednotku plochy, což je zásoba (*stock*). K vyjádření zásoby je nutné vynásobit koncentraci hmotností půdy do dané hloubky. Zásoba půdního organického uhlíku se vyjádří v jednotkách: Mg C ha⁻¹ (t C ha⁻¹) nebo kg C m⁻² do definované hloubky. Při použití těchto jednotek lze pak množství uhlíku v 1 ha půdy správně označit jako jeho zásobu. Případně lze hodnotu vynásobit plochou, čímž se získá zásoba uhlíku

v dané oblasti (např. v Evropě) často v jednotkách Tg (T-tera = 10^{12}) nebo Pg (P-peta = 10^{15}) (Pechanec et al. 2018).

3.6 Metody odhadu potenciální sekvestrace uhlíku v půdě

Pro stanovení zásob uhlíku v půdě lze použít různé metody. Jedná se o kontaktní terénní měření nebo bezkontaktní měření pomocí dálkového průzkumu Země. Kontaktní metody měření zajišťují vždy přesnější výsledky, ale jsou finančně a časově náročné a jsou tak pro velké oblasti téměř nepoužitelné. Z tohoto důvodu se nyní velký počet studií věnuje začlenění technologií dálkového průzkumu Země pro rychlé a bezkontaktní stanovení zásob uhlíku (Pechanec et al. 2018).

Mezi základní metody založené na kontaktních přístupech patří odběr a analýza vzorků. V poslední době se metody často dělí na destruktivní (odběr vzorků) a nedestruktivní. Použití pozemních senzorů je kontaktní a nedestruktivní. Metoda produkčních tabulek je založena na propojení vlastních klasifikovaných oblastí a předem připravených tabulek zásob produkce uhlíku pro každou kategorii dle předem nastavené klasifikace. Hodnoty v tabulkách jsou odvozené z literárních údajů a předchozích kontaktních měření. Uvedená metoda se též používá v dokumentech Mezivládního panelu pro klimatické změny (IPCC) a je v ní implementováno několik softwarových modelů. Je velmi přesná, ale je určena pouze pro malou oblast (Pechanec et al. 2018).

3.7 Zhodnocení stavu zásob uhlíku

Globální zásoba uhlíku (C) v půdě do hloubky jednoho metru se odhaduje na 2500 Pg C, z čehož asi 1500 Pg C tvoří půdní organický uhlík (*Soil Organic Carbon -SOC*). Je odhadováno, že globální zásoba půdního organického uhlíku se pohybuje v rozmezí 684-724 Pg do hloubky 30 cm a 1462-1548 Pg do hloubky 1 m (Batjes 1996).

Je asi 3,2krát větší než zásoba uhlíku v atmosféře. Změny ve využívání a kultivaci půdy přispěly 136 ± 55 petagramy uhlíku (Pg C) do atmosféry ze změny uhlíku v biomase od začátku průmyslové revoluce s vyčerpáním půdního organického uhlíku v půdě, což představuje další příspěvek ve výši $2,78 \pm 12$ Pg C. Efektivní obhospodařování krajiny z hlediska ukládání uhlíku vyžaduje informace o objemu již uloženého uhlíku a množství pohlceného nebo ztraceného uhlíku v průběhu času. Současná celková zásoba uhlíku v České republice činí 950 393 943 t. Největší podíl na zásobách představuje uhlík uložený v půdě (57,6 %), následuje nadzemní biomasa (31,4 %), podzemní biomasa (7,7 %) a nejmenší množství uhlíku je uloženo v nekromase (3,3 %). (Pechanec et al. 2018). Viz tabulka 2.

Tabulka 2: Aktuální množství celkového uhlíku v ČR

Zásobník uhlíku	množství uhlíku (t)	množství uhlíku (%)
Celkový uhlík	950 393 943	100
Uhlík v půdě	547 200 278	57,6
Nadzemní biomasa	298 807 079	31,4
Podzemní biomasa	73 147 221	7,7
Uhlík nekromasy	31 239 365	3,3

Zdroj: Pechanec et al. (2018)

Pro hodnocení množství uhlíku hraje velmi důležitou roli též velikost oblastí. Dle databáze *Corine Land Cover 2012* se jedná v ČR o následující zastoupení: zemědělské oblasti 56,5 %, lesní a polopřírodní oblasti 36,3 %, umělé povrchy 6,4 %, vodní plochy 0,7 %, mokřady 0,1 %. (Pechanec et al. 2018).

Tabulka 3: Přehled obsahu oxidovatelného uhlíku na orné půdě v jednotlivých krajích

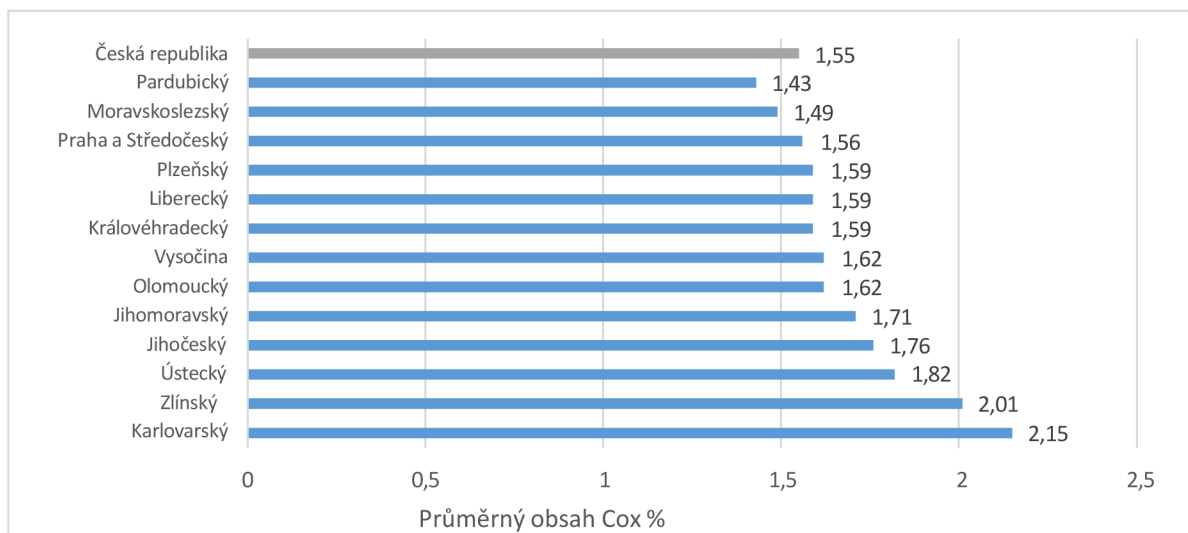
Kraj	Vážený průměr (%)	Medián (%)	Minimum (%)	Maximum (%)	Počet vzorků	Výměra (ha)
Hl. město Praha	1,59	1,46	0,92	2,73	105	2 060
Středočeský	1,57	1,49	0,33	4,90	2 901	40 511
Jihočeský	1,71	1,66	0,35	3,09	1 767	11 485
Plzeňský	1,54	1,52	0,35	3,48	1 508	12 726
Karlovarský	2,12	2,12	0,89	3,51	433	3 060
Ústecký	1,73	1,70	0,35	3,51	927	20 994
Liberecký	1,55	1,55	0,35	3,26	660	11 371
Královéhradecký	1,51	1,54	0,04	5,05	1 172	25 553
Pardubický	1,24	1,33	0,18	3,80	1 806	39 687
Vysočina	1,54	1,58	0,35	4,23	2 140	25 263
Jihomoravský	1,78	1,63	0,35	4,46	1 614	26 391
Olomoucký	1,57	1,56	0,70	4,80	1 504	28 837
Moravskoslezský	1,34	1,31	0,63	2,91	812	15 894
Zlínský	1,99	1,87	0,90	4,78	171	4 043
ČR orná půda	1,55	1,55	0,35	5,05	17 520	267 876

Zdroj : https://eagri.cz/public/web/file/676216/Cox_zprava_2020_finalni.pdf

Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský (ÚKZÚZ) sleduje úroveň obsahu organické hmoty v půdě v systému Agrochemického zkoušení zemědělských půd (AZSP). Jedná se o celostátní plošnou a pravidelnou kontrolu úrodnosti půdy. V rámci své činnosti ÚKZÚZ sleduje parametr tzv. oxidovatelný uhlík (Cox), který představuje primární organickou hmotu v podobě rozložených i nerozložených kořenů, odumřelých mikroorganismů, kořenového vlášení, exudátů, posklizňových zbytků, dodaných organických hnojiv a také humusové kyseliny a fulvokyseliny. Tabulka 3 ukazuje přehled obsahu oxidovatelného uhlíku na orné

půdě v jednotlivých krajích. Je zde vidět poměrně úzké rozpětí průměrného obsahu Cox 1,24–2,12 %. Průměr i medián za Českou republiku činí 1,55 % Cox. Následující tabulka č.4 porovnává průměrný obsah Cox zemědělských půd mezi kraji v ČR. Nejnižší obsah je v Pardubickém kraji 1,24 %, nejvyšší hodnoty vykazují Karlovarský a Zlínský kraj .

Tabulka 4: Porovnání obsahu Cox zemědělských půd v jednotlivých krajích ČR



Zdroj : Smatanová (2021)

Medián oxidovatelného uhlíku pod travními porosty dosahuje hodnot 2,14 %, v ostatních kulturách jsou obsahy v úzkém rozmezí od 1,50–1,58 %. Bohatý kořenový systém pod travními porosty se významně podílí na tvorbě stabilních frakcí organické hmoty, která se zde hromadí (https://eagri.cz/public/web/file/676216/Cox_zprava_2020_finalni.pdf).

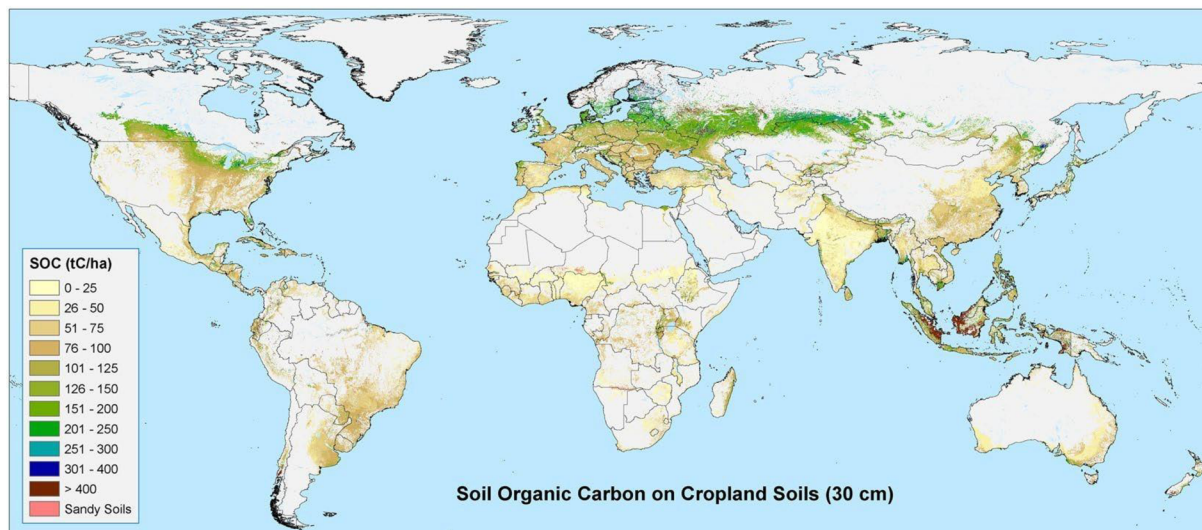
Odhady celosvětových zásob uhlíku v půdě, zejména v kontextu oteplování klimatu, jsou v současné době ústředním bodem důležitých diskusí probíhajících na různých mezinárodních fórech. Zejména diskusí o zahrnutí zemědělské půdy do systému ochrany klimatu, do strategií a protokolů pro zmírňování změny klimatu v rámci UNFCCC a jsou též základem iniciativy 4p1000.

Prostorové rozložení půdního organického uhlíku na orné půdě (viz obrázek 5) a jeho podíl na celkové zásobě uhlíku se liší podle zeměpisné šířky a podstatně se liší od rozložení uhlíku uloženého v nadzemní a podzemní biomase. Většina světových zásob SOC je uložena v severních zeměpisných šířkách, zejména v permafrostu a vlhkých boreálních oblastech. Naproti tomu velké plochy v Indii, Sahelu, severní Číně a Austrálii mají půdy s nízkou hustotou uhlíku (Zomer et al. 2017).

Z přehledu 27 studií vyplývá, že za hrubý odhad globálního fondu půdního uhlíku lze považovat **1500 Pg uhlíku** (do hloubky jednoho metru, v rámci všech půd na světě, které tvoří plochu 130 milionů km²). Nicméně je třeba počítat se značnou variabilitou mezi prostorově i neprostorově explicitními odhady, v rámci rozmezí od **500 až 3000 Pg uhlíku**.

Celosvětově je v orné půdě ve svrchních 30 cm půdy uloženo více než 140 Pg uhlíku, což odpovídá téměř 10 % celkového globálního fondu půdního organického uhlíku.

Z tohoto množství, přibližně 94 % (131,81 Pg uhlíku) je uloženo na 15,9 milionech km², což tvoří 98 % světové orné půdy. Tato rozloha je považována za potenciálně k dispozici pro zvýšenou sekvestraci uhlíku prostřednictvím inovačních zemědělských postupů a lepšího hospodaření s půdou (Zomer et al. 2017).



Obrázek 5: Rozložení půdního organického uhlíku na orné půdě. Zdroj: Zomer et al. (2017)

Na rozložení půdního organického uhlíku mají výrazný vliv teplota a srážky. Množství uhlíku je většinou nižší v tropech, kde je tepleji a/nebo sucho. Vyšší hodnoty jsou v severnějších, chladnějších a vlhčích oblastech. V menší míře je rozšířen v jižnějších zeměpisných šířkách (viz obrázek 5). Řada studií prokázala exponenciální pokles půdního organického uhlíku se zvyšující se teplotou (Lal 2002). Odpovídají tomu nízké hodnoty půdního organického uhlíku na většině území rovníkové oblasti (např. méně než 100 t C/ha). Půdy s nejvyšší hustotou uhlíku (400 t C/ha a více) se nacházejí v severní části (např. oblasti severních orných půd a zemědělsky využívaných rašelinných půd Kanady, Spojených států, Evropy a Ruska). Největší množství uhlíku v současné době ukládají oblasti Severní Ameriky, Eurasie (Rusko) a Evropy v orné půdě s více než 21 Pg uhlíku v každé z nich. Dohromady tvoří tyto oblasti více než 50 % všech zásob půdního organického uhlíku v orné půdě na celém světě. Naopak Střední Amerika, severní Afrika a australský/pacifický region mají velmi nízké hodnoty půdního organického uhlíku - dohromady tvoří 6,48 Pg uhlíku, což odpovídá přibližně 4,6 % celosvětového množství. Západní, jižní, jihovýchodní a východní Asie mají mírné množství v rozmezí od 4,38 Pg C do 9,14 Pg C, ale dohromady představují jen necelá 2 % celosvětového množství. Z hlediska pořadí jednotlivých zemí má největší celkové množství půdního organického uhlíku uložené na orné půdě Rusko s vysokou uhlíkovou hustotou - více než 21,9 Pg C (což představuje téměř 17 % celosvětového množství), následují Spojené státy (18,9 Pg C), Čína (8,4 Pg C), Indie (6,4 Pg C) a Brazílie (5,0 Pg C) (Zomer et al. 2019).

Analýza (viz. tabulky 5 a 6) ukazuje, že pokud by se obsah půdního uhlíku ve vrstvě 0-30 cm hloubky na všech dostupných orných půdách zvýšil z 0,27 % na 0,54 %, (tj. ze středního na vysoký scénář podle (Sommer & Bossio 2014), mohlo by být sekvestrováno od 0,56 do 1,15 t C/ha/rok, což v globálním měřítku představuje 0,90 až 1,85 Pg C/rok a to za období nejméně 20 let, kdy lze očekávat pokračování sekvestrace.

Tabulka 5: Analýza půdního organického uhlíku na orných půdách dle regionu, ukazující současný stav půdního organického uhlíku a odhadované roční přírůstky za 20 let.

Orné půdy (30 cm hloubka)	Půdní organický uhlík				
	Současný	Po 20 let		Roční zvýšení	
Scénář	T ₀	Střední	Vysoký	Střední	Vysoký
Oblast	PgC			PgC/rok	
Austrálie/Pacifik	3,75	4,50	5,29	0,04	0,08
Střední Amerika	1.22	1,37	1.52	0,01	0,02
Střední Asie	5.01	5,40	5,81	0,02	0,04
Východní Asie	9.14	10.52	11,97	0,07	0,14
Východní a Jižní Afrika	5.64	6,80	8.02	0,06	0,12
Evropa	21.05	23.26	25,60	0,11	0,23
Severní Afrika	1.51	1,83	2.17	0,02	0,03
Severní Amerika	28.07	31,52	35.16	0,17	0,35
Rusko	21,94	23.19	24,52	0,06	0,13
Jižní Amerika	9.42	10,72	12.09	0,06	0,13
Jižní Asie	7,68	9,87	12.18	0,11	0,22
Jihovýchodní Asie	8.15	9.06	10.03	0,05	0,09
Západní a střední Afrika	4,83	6.35	7,95	0,08	0,16
Západní Asie	4.38	5.44	6,57	0,05	0,11
Globální	131,81	149,84	168,87	0,90	1,85

Zdroj: Zomer et al. (2017)

Tabulka 6: Analýza půdního organického uhlíku na orných půdách dle regionu, ukazující současný stav průměrného půdního organického uhlíku a odhadované roční přírůstky za 20 let.

Orné půdy (30 cm hloubka)	Průměrný půdní organický uhlík					Plocha orné půdy
	Současný	Po 20 let		Roční zvýšení		
Scénář	T ₀	Střední	Vysoký	Střední	Vysoký	
Oblast	tC/ha			tC/ha/rok		km ²
Austrálie/Pacifik	57	68	80	0,57	1.16	659,834
Střední Amerika	87	98	109	0,53	1.09	139,742
Střední Asie	136	146	158	0,53	1.08	369 061
Východní Asie	72	83	95	0,54	1.12	1,262,134
Východní a Jižní Afrika	53	64	76	0,55	1.13	1,055,461
Evropa	106	117	128	0,55	1.14	1,995,564
Severní Afrika	58	71	84	0,63	1.28	258,602
Severní Amerika	97	109	122	0,60	1.22	1,260,786
Rusko	174	184	194	0,50	1.02	1,235,827
Jižní Amerika	76	87	98	0,53	1.08	1,753,039
Jižní Asie	44	56	69	0,62	1.28	852,619
Jihovýchodní Asie	96	106	118	0,53	1.10	1,307,174
Západní a střední Afrika	37	49	61	0,58	1.19	891,532
Západní Asie	49	61	74	0,60	1.23	2,893,928
Globální	81,61	92,82	104,66	0,56	1.15	15,935,304

Zdroj: Zomer et al. (2017)

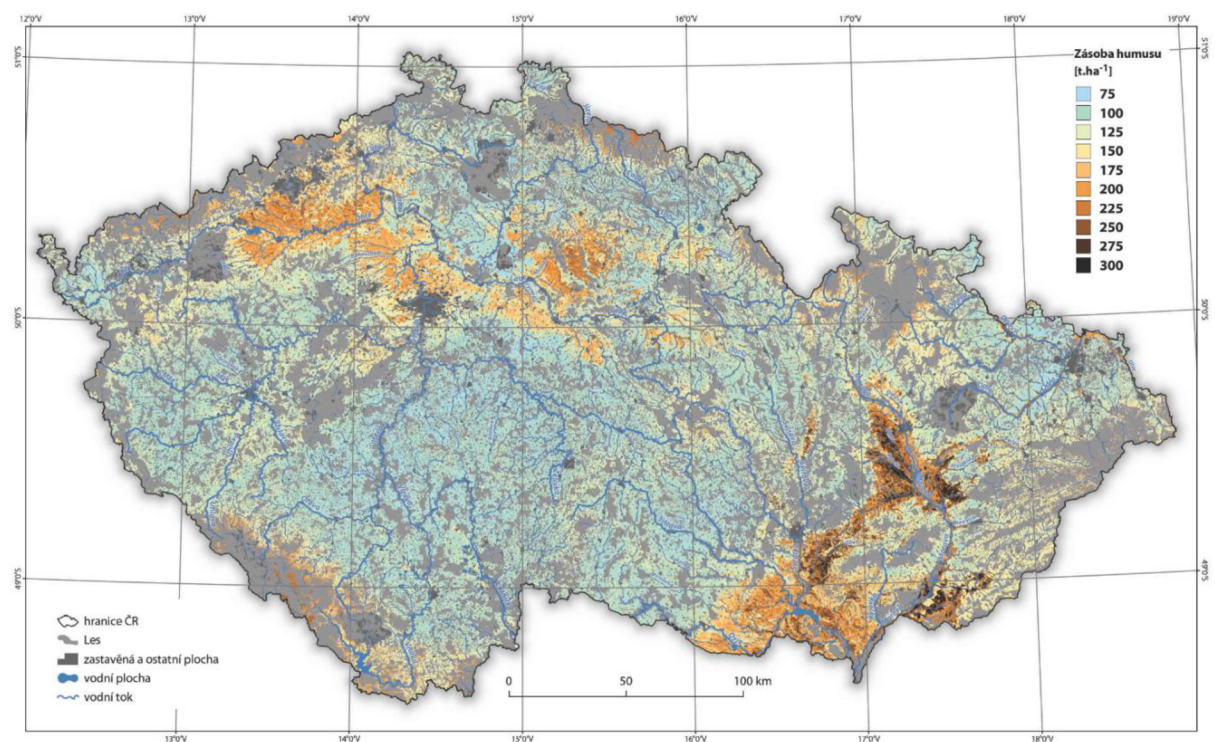
Uvedený odhadovaný údaj celkového sekvestračního potenciálu na orných půdách je srovnatelný s ostatními nedávnými odhady celkového sekvestračního potenciálu pro zemědělské oblasti s ornou půdou (Lal 2004, Hick et al. 2017).

Celkové množství zachyceného uhlíku se značně liší mezi jednotlivými oblastmi, což je způsobeno různými plochami orné půdy. Celosvětově jeden z nejvyšších potenciálů pro celkové ukládání uhlíku vykázala Severní Amerika, a to 0,17 až 0,35 Pg C (0,60 až 1,22 t/ha). Další vysoký potenciál mezi regiony vykázaly přibližně stejně jižní Asie a Evropa (0,11-0,23 Pg C/rok), přestože evropské půdy mají již v průměru poměrně vysokou hustotu uhlíku (106 t C/ha). Nízké hodnoty půdního organického uhlíku v orné půdě v jižní Asii (44 t C/ha), která má z velké části problémy s degradací, poskytují příležitost k sekvestraci 0,62-1,28 t C/ha/rok na více než 2,9 milionu km² půdy, což představuje ukládání uhlíku 2,2 až 4,5 Pg C/rok. Stejně tak Afrika (s více než 2,6 milionu km² orné půdy) vykazuje velký potenciál pro ukládání uhlíku v půdě, který se pohybuje od 0,15 do 0,31 Pg C/rok. Jižní Asie a severní Afrika vykazují nejvyšší potenciál pro ukládání uhlíku na hektar (0,62-1,28 t C/ha), ale severní Afrika má velmi málo orné půdy a tudíž jen malý potenciál pro celkové vázání uhlíku v půdě.

Z hlediska jednotlivých zemí světa vykazují Spojené státy nejvyšší celkový roční potenciál v půdním organickém uhlíku (1,2-2,6 Pg), s průměrným přírůstkem 0,62-1,27 t C/ha/rok na více než 2 milionech km² orné půdy. Nicméně Indie s přibližně stejně vysokým průměrným přírůstkem na hektar (0,63-1,27 t C/ha/rok) na více než 1,6 milionu km² orné půdy vykazuje potenciální celkový roční přírůstek v rozmezí od 1,0 do více než 2,1 Pg uhlíku. Stejně tak Čína a Rusko (každý stát s přibližně 1,2 milionu km² orné půdy) mají velký potenciál pro zvýšení celkového ukládání uhlíku, a to v rozmezí od 0,63 - 1,3 Pg C/ha/rok. Celá řada dalších menších zemí vykazuje poměrně vysoké roční přírůstky na hektar, ačkoliv jejich celková sekvestrace uhlíku je nízká kvůli malým plochám orné půdy. Tak například 45 zemí se pohybuje ve vyšším pásmu: 0,58 -1,2 t C/ha/rok, ale mnoho z nich leží v sušším podnebí, kde může být limitujícím faktorem dostupnost vody a biomasy.

3.8 Porovnání zásob uhlíku v půdách ČR se zahraničními údaji

Množství C se v zemědělských půdách značně liší, a to zejména v závislosti na jejich managementu (plodiny, obdělávání a hnojení). Převážná většina zemědělských půd v ČR se nachází v intervalu od 1–2 % C, u orných půd je to více než 77 % (Kubát a kol. 2008).



Obrázek 6: Mapa zásoby humusu v zemědělských půdách ČR. Zdroj: Žížala a kol. (2020)

Obrázek č.6 znázorňuje mapu zásob humusu v zemědělských půdách ČR. (jedná se o predikční modelování nástroji digitálního mapování půd, objemová hmotnost půdy: 0-30 cm; 30 – 60 cm; 60 – 100 cm) (Žížala a kol. 2020). Nejvyšších hodnot (250-275 t/ha) dosahují oblasti Hané, Jižní Moravy a Slovácka. Dále oblasti Polabí a okolí řeky Ohře (75-225 t/ha). V rámci porovnání se zahraničními údaji jsou tyto

hodnoty srovnatelné s oblastmi s nejvyšším obsahem půdního organického uhlíku (Rusko, USA, Čína). Zcela analgicky jako u celosvětového rozložení zásob půdního organického uhlíku lze pozorovat velké rozdíly v zásobě uhlíku v rámci všech zemědělských půd též v ČR. Příčinou jsou různé způsoby zemědělského využití půdy (orná půda, louky, pastviny) a různé obhospodařování půd (typ kultur, intenzita hnojení).

3.9 Možnosti navýšení půdního organického uhlíku

Dle aktuálních informací Ministerstva zemědělství (z ledna 2022) je důležitá úloha pro sekvestraci uhlíku přisuzována dostupnosti environmentálně šetrných technologií a aplikaci klimaticky neutrálních postupů. Sekvestrace uhlíku v půdě s tímto efektem by bylo možné dosáhnout pomocí podpory (platby za environmentální služby) při ceně uhlíku, která by odpovídala výše uvedenému celosvětovému úsilí o udržení nárůstu globální teploty pod 2 °C. Dále k efektivní sekvestraci přispěje správný management půd. K využití uvedeného potenciálu sekvestrace uhlíku, která by pozitivně přispěla k agendě ochrany klimatu, je dle analýz zapotřebí komplex politických opatření. Např. regulační opatření, předávání znalostí na podporu vzájemně prospěšných řešení a též tržně orientované pobídky dobrovolných aktivit. V oblastech již satureovaných je třeba zabránit ztrátám CO₂ podporou ochrany stávajících zásob uhlíku v půdě. Dále bude nutné identifikovat oblasti, kde agronomická opatření mohou zvýšit zásoby uhlíku i zisky zemědělců. Struktura těchto politických balíčků a jejich uplatnění ve velkém měřítku bude záviset na konkrétních opatřeních v dané oblasti a též na analýze jejich nákladů a přínosů. Uvedený proces musí být podpořen smluvními řešeními, která zohlední zejména obavy z nestability zachycení/uložení uhlíku a nutnost průběžného měření a ověřování stavu uhlíku včetně souvisejících vysokých nákladů. Tato řešení umožní zavedení uhlíkových kreditů z půdní sekvestrace uhlíku v zemědělském hospodaření a obchodování s těmito kredity (Publikace OECD - Sekvestrace uhlíku v zemědělství (Ministerstvo zemědělství, eAGRI).

V rámci výčtu konkrétních možností navýšení půdního organického uhlíku je důležité vzít do úvahy zpomalení degradace organické hmoty. Jde o omezení klasické orby a kultivačních operací. K optimální sekvestraci vede racionální agrotechnika, která spočívá v dodávání chlévského hnoje, kompostů a tzv. zeleného hnojení (Šimek et al. 2019).

Dále ke snížení ztrát uhlíku vede ochrana před mineralizací a erozí. Zvýšené dodání uhlíku představuje dodání hnojiv a použití biouhlu (viz výše uvedené kapitoly). Efekt způsobů hospodaření ukazuje následující tabulka č.7. Mezi další postupy patří: střídání plodin (hluboko kořenící víceleté pícniny), použití mulče, podpora zalesňování, rekultivace degradovaných půd a zvýšení efektivity závlah (Lal et al. 2015)

Tabulka 7: Doručené postupy k sekvestraci uhlíku

<i>Způsoby hospodaření</i>	<i>efekt</i>
Omezené /žádné obdělávání půdy	snížení ztrát uhlíku
Ochrana před mineralizací a erozí	snížení ztrát uhlíku
Přidávání organických doplňků (hnojiva, biouhel)	zvýšené dodání uhlíku
Použití krycích plodin	snížení ztrát/zvýšené dodání uhlíku

4 Diskuze

Aktuální zprávy IPPC ukazují, že omezení nárůstu globální teploty pod 2 °C do konce století nebude možné bez významného odstraňování CO₂ z atmosféry. Zvýšená pozornost věnovaná vztahu mezi půdním uhlíkem a klimatickými změnami v poslední době je dána tím, že půda působí jako velká zásobárna organického uhlíku a může tak přispívat k omezení emisí CO₂ jako skleníkového plynu. Půda tak hraje významnou roli v regulaci klimatických problémů. Vzhledem k ohroženosti půd a potřebě produkce potravin byl v roce 2012 zaveden pojem „půdní bezpečnost“ (McBratney et al. 2012), což znamená udržování a zlepšování světových půdních zdrojů. Tato bezpečnost je spojena s šesti základními globálními výzvami, mezi něž patří klimatické změny (mezi další výzvy patří: lidské zdraví, biodiverzita, potravinová, energetická a vodní bezpečnost).

Vlivem degradačních či ekosystémových disturbancí jsou půdy náchylné ke ztrátám organického uhlíku (Frank et al. 2014). Odhaduje se, že celosvětově trpí v posledních 25 letech čtvrtina půdy degradací v souvislosti se ztrátou půdního organického uhlíku (De Milne et al. 2015). Mezi ekosystémy s nejvyšší ztrátou jsou řazeny rašeliniště, aridní a semi-aridní oblasti, tropické lesy a případně i oblast permafrostu. Ztráty půdního organického uhlíku v zemědělských půdách v mírném pásmu jsou též problémem ve vztahu k půdní úrodnosti (Powlson et al. 2011).

Výzkumné práce z posledních let ukazují, že různé postupy hospodaření mohou zvýšit zásoby uhlíku v zemědělské půdě. Tyto postupy zahrnují: přidávání organických hnojiv, mulčování, omezené obdělávání půdy, hospodaření s úrodou, agrolesnictví a rotační pastvu. Práce ukazují na obecnou shodu, že technický potenciál pro sekvestraci uhlíku v půdě je značný. Též panuje určitá shoda ohledně velikosti tohoto potenciálu (Zomer et al. 2017). Na základě těchto faktů si mezinárodní iniciativa „4 na 1000“ (*4 per 1000*) klade za cíl sekvestrovat přibližně 3,5 Gt uhlíku v půdě ročně. Tato mezinárodní iniciativa má snahu ukázat, že zemědělství a zejména zemědělská půda může hrát velice důležitou roli při změně klimatu. Iniciativa byla zahájena dne 1. prosince 2015 na konferenci COP 21 a chce spojit všechny subjekty z veřejného i soukromého sektoru (státy, podniky, místní orgány, profesní organizace, výzkumné instituce, nevládní organizace). Obdělávaná zemědělská půda bude v tomto úsilí nesmírně důležitá, neboť je aktivně obhospodařována, a je možné na ní provádět zlepšené postupy. Navíc téměř všechny obdělávané půdy ztratily již značný podíl uhlíku (který byl uložen před obhospodařováním nešetřícím uhlík) a představují tak značný potenciální rezervoár k opětovné sekvestraci zavedením efektivních postupů z hlediska půdního uhlíku.

Termín „sekvestrace uhlíku“ se běžně používá k popisu jakéhokoli zvýšení obsahu organického uhlíku v půdě způsobeného změnou hospodaření s půdou. Vyplývá z toho, že zvýšené ukládání uhlíku (C) v půdě zmírňuje změnu klimatu. To však platí pouze v případě, že daný způsob hospodaření způsobuje dodatečné čisté ukládání uhlíku z atmosféry do půdy (Powlson et al. 2011).

Z hlediska efektivity sekvestrace uhlíku je nutné připomenout též určité limitace tohoto procesu. Jedná se o následující aspekty:

a) množství uhlíku uloženého v půdě je konečné. Navyšování půdního organického uhlíku ustoupí, jakmile dojde k přiblížení se k rovnovážné hodnotě. Tento jev je zřejmý z dlouhodobých studií, které ukazují, že organický uhlík v půdě se nehromadí do nekonečna (Johnston et al. 2009).

b) proces je vratný (změna hospodaření s půdou vedoucí ke zvýšení obsahu C v půdě nebo vegetaci musí trvale pokračovat, aby se udržely zvýšené zásoby půdního organického uhlíku) Například pokud je založen nový les, uhlík akumulovaný ve stromech a půdě se ztratí, pokud se stromy vykácejí (Saarsalmi et al. 2010).

c) změny v obhospodařování půdy vedoucí ke zvýšení obsahu půdního uhlíku mohou zvýšit nebo snížit výměnu a produkci dvou významných skleníkových plynů - N₂O a metan. A tak v řadě situací mohou být tyto změny významnější než změny v množství půdního uhlíku, neboť uvedené skleníkové plyny mají 25x vyšší potenciál globálního teplování než CO₂ (IPCC, 2007b).

Zvyšování obsahu organického uhlíku globálně na rozsáhlých plochách orné půdy, která je již intenzivně obhospodařována, je praktičtější a efektivnější než na jiných dostupných typech využití půdy, např. na lesních pozemcích nebo pastvinách. Na těchto orných půdách se zavádí zlepšené hospodaření, které nabízí možnost zachycení významného množství uhlíku a může tak potenciálně významně přispět ke globálnímu úsilí o zmírnění dopadů klimatických změn. K dosažení globálního zmírnění klimatických změn byl Iniciativou 4p 1000 vytvořen ambiciózní cíl - sekvestrace uhlíku 3,5 Pg /rok. Odhady studie (Zomer et al.2017) naznačují, že z 26 % až 53 % (což odpovídá 0,90-1,85 Pg uhlíku) uvedeného cíle by mohlo být dosaženo pouze ve svrchních 30 cm půdy orné půdy. Toto ukládání by mohlo pokračovat po dobu nejméně 20 let vzhledem k zavedení managementu zvyšujícího podíl organického uhlíku v půdě.

To vyžaduje, aby orná půda zvýšila ukládání půdního organického uhlíku v rozmezí 0,55-1,15 t/ha/rok. Nicméně, jak upozorňují další autoři, lze očekávat, že zavádění bude mít zpoždění v závislosti na různých zemích, výrobních systémech a typech zemědělských podniků (Sommer & Bossio 2014). Stejně tak i odhady autorů nezohledňují rozdíly v podnebí a důležitých procesech v půdě, zejména omezení vody a živin, produkce a rychlost obratu biomasy (Zomer et al. 2017).

Vzhledem k potenciální dostupnosti a velkému množství orné půdy je však sekvestrace uhlíku prostřednictvím zvýšení obsahu v zemědělské půdě dosažitelnou a efektivní cestou k rychlému zvýšení sekvestrace CO₂ v budoucnosti (Lal 2015).

Navzdory velkému technickému potenciálu pro zachycování uhlíku v půdě existují značná omezení, která by mohla vést k efektivnímu ukládání uhlíku. Týkají se zejména konkrétních míst a konkrétních zemědělských systémů, včetně nedostatku biomasy a dalších vstupů. Kromě toho mohou existovat kompromisy s produktivitou, potravinovou bezpečností nebo hydrologickou bilancí a také obavy týkající se dalších skleníkových plynů, jako je N₂O.

Podobně jako u všech snah o udržení významných změn v praxi je třeba porozumět a vzít v úvahu též kulturní, politické a socioekonomické souvislosti. Přesné zhodnocení potenciálu půdy je rovněž nezbytné pro efektivní sekvestraci půdního organického uhlíku (Kane 2015).

5 Závěr

- Sekvestrace uhlíku patří mezi významné globální transformační mechanismy vedoucí ke snížení emisí CO₂ a pomáhá tak v zabránění nevratných důsledků klimatických změn. Dle dostupných studií by do konce století mohla půda potenciálně vázat 2 - 4 % ročních globálních emisí.

- Sekvestraci půdního organického uhlíku lze podpořit omezením mineralizace a eroze nebo zvýšením dodáním organických hnojiv a biouhlu do půdy.

- Celosvětově je v orné půdě ve svrchních 30 cm půdy uloženo více než 140 Pg uhlíku. Největší množství uhlíku v současnosti ukládají oblasti Severní Ameriky, Eurasie (Rusko) a Evropy v orné půdě s více než 21 Pg uhlíku v každé z nich. Současná celková zásoba uhlíku v České republice činí 950 393 943 t. Největší podíl na zásobách představuje uhlík uložený v půdě (57,6 %), v nadzemní biomase (31,4 %), podzemní biomase (7,7 %).

- V porovnání se zahraničními údaji jsou nejvyšší hodnoty půdního organického uhlíku v ČR srovnatelné s oblastmi s nejvyšším obsahem jako je Rusko, USA a Čína. Nejvyšších hodnot (250-275 t/ha) v ČR dosahují oblasti Hané, Jižní Moravy a Slovácka. Dále oblasti Polabí a okolí řeky Ohře (75-225 t/ha). Stejně jako u celosvětového rozložení zásob půdního organického uhlíku jsou velké rozdíly u zemědělských půd též v ČR. Příčinou jsou různé způsoby zemědělského využití půdy (orná půda, louky, pastviny) a různé obhospodařování půd (typ kultur, intenzita hnojení).

- Je třeba též upozornit na limity sekvestrace. Uhlík se ukládá ve formě organických látek, která obsahují značné množství dalších živin. Živiny, produktivita biomasy, typ vegetace a dostupnost vody mohou být proto hlavními omezujícími faktory bránícími zvýšení sekvestrace uhlíku v půdě.

- Zvyšování obsahu organické hmoty v půdě je výhodné nejen pro zmírnění nepříznivých změn klimatu. Sekvestrace uhlíku má též další velmi pozitivní přínosy, mezi které patří infiltrace a zadržování vody, ovlivnění úrodnosti půdy, zlepšující se potravinové a nutriční zabezpečení a tím potenciální zvýšení zemědělské produktivity.

- Zlepšení našich znalostí o technickém potenciálu sekvestrace uhlíku v půdě a praktickém provádění lepšího hospodaření s půdou zaměřeného na zvyšování půdního organického uhlíku nabízí strategii pro zvýšení benefitů v oblasti životního prostředí s potenciálně pozitivními důsledky pro potravinovou bezpečnost a ekologickou udržitelnost v dlouhodobém horizontu.

6 Literatura

- Banwart S, Black H, Cai Z, Gicheru P, Joosten, et al. 2014. Benefits of soil carbon: report on the outcomes of an international scientific committee on problems of the environment rapid assessment workshop. *Carbon Management* **5**: 185-192.
- Batjes NH. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* **47**:151–163.
- Boysen L, Lucht W, Gerten D, Heck V, Lenton TM, Schellnhuber HJ. 2017. The limits to global-warming mitigation by terrestrial carbon removal. *Earth's Future* **5**: 463-474.
- Ellis S, Mellor A. 1995. *Soils and environment*. Routledge, London.
- Field CB, Mach KJ. 2017. Rightsizing carbon dioxide removal. *Science* **356**:706–707.
- Frank D, Reichstein M, Bahn M, Thonicke K, Frank D, Mahecha MD, Smith P, van der Velde M, Vicca S, Babst F et al. 2015. Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: concepts, processes and potential future impacts. *Glob Change Biol* **21**: 2861-2880.
- Freund P, Ormerod WG. 1997. Progress Toward Storage of Carbon Dioxide. *Energy Conversion and Management* **38**:10.1016/S0196-8904(96)00269-5.
- Grandy AS, Robertson GP. 2007. Land-use intensity effects on soil organic carbon accumulation rates and mechanisms. *Ecosystems* **10**:59–74.
- Hicks P, Castanha CE, Porras RC, Torn MS. 2017. The whole-soil carbon flux in response to warming. *Science* **355**:1420-1423.
- IPCC 2007. *Synthesis Report: Climate Change 2007*, WMO, UNEP, Geneva, Switzerland. Available from AR4 Climate Change 2007: Synthesis Report — IPCC (accessed January 2007)
- IPPC 2014. *Synthesis Report: Climate Change 2014*, WMO, UNEP, Geneva, Switzerland. Available from AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014 — IPCC (accessed January 2014)
- IPPC 2023. *Synthesis Report: Climate Change 2023*, WMO, UNEP, Geneva, Switzerland. Available from AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 (ipcc.ch) (accessed January 2023)
- Jenkinson DS, Rayners JH. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science* **123(5)**:298-305.

- Johnston AE, Poulton PR, Coleman K. 2009. Soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. *Advances in Agronomy* **101**:1-57.
- Kane, Daniel A. "Carbon Sequestration Potential on Agricultural Lands: A Review of Current Science and Available Practices." 2015. Available from http://sustainableagriculture.net/wpcontent/uploads/2015/12/Soil_C_review_Kane_Dec_4-final-v4.pdf (accessed from March 2015)
- Kapička J, Novotný I, Žižala D. 2017. Monitoring eroze zemědělské půdy. Závěrečná zpráva.: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Praha.
- Kubát J. a kol., 2008. Metodika hodnocení množství a kvality půdní organické hmoty v orných půdách, VURV, Praha.
- Kurel V. Carboneg. 2021. Způsoby odstraňování uhlíku z atmosféry | Carboneg, Available from [Způsoby odstraňování uhlíku z atmosféry | Carboneg](#) (accessed February 2021)
- Lal R. 2002. Soil Carbon Dynamics in Cropland and Rangeland. *Environmental Pollution* **116**: 353-362.
- Lal R. 2004a. Agricultural activities and the global carbon cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **70**:103-116.
- Lal R. 2004b. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* **123**:1-22.
- Lal R. 2008. Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **363(1492)**:815-30.
- Lal R, Negassa W, Lorenz K. 2015. Carbon sequestration in soil. *Current Opinion in Environmental Sustainability* **15**:79-86.
- Lehmann J. 2007. A handful of carbon. *Nature* **447**:143-144.
- Li HL, Wang W, Mortimer P. et al. 2015. Large-scale phylogenetic analyses reveal multiple gains of actinorhizal nitrogen-fixing symbioses in angiosperms associated with climate change. *Scientific Reports* **5**:14023-8.
- McBratney AB, Minasny B, Wheeler I, Malona BP. 2012. Frameworks for digital soil assessment. Pages 9-14 in: Minasny B, Malone BP, McBratney AB. (Eds). *Digital soil assessment and beyond*. Taylor and Francis, London.
- Milne E, Banwart S, Noellemeyer E, Abson D et al. 2014. Soil carbon, multiple benefits. *Environmental Development* **13**:35-38.

- Pechanec V, Purkyt J, Benc A, Nwaogu CH, Štěrbová L, Cudlín P. 2018. Modelling of the carbon sequestration and its prediction under climate change. *Ecological Informatics* 47: 50-54.
- Publikace OECD - Sekvestrace uhlíku v zemědělství (Ministerstvo zemědělství, eAGRI)
- Powlson DS, Whitmore AP, Goulding KWT. 2011. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science* 62:42-55.
- Saarsalmi A, Tamminen P, Kukkola M, Hautajarvi R. 2010. Whole tree harvesting at clear-felling: impact on soil chemistry, needle nutrient concentrations and growth of Scots pine. *Scandinavian Journal of Forest Research* 25: 148-156.
- Six J, Conant R, Paul E, Paustian K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant Soil* 241(2):155-176.
- Smatanová M. 2021. Hodnocení vybraných parametrů půdní organické hmoty v zemědělských půdách ČR. Průběžná zpráva za roky 2014-2019. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brno.
- Sohi S, Krull E, Lopez-Capel E, Bol R. 2010. A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. *Advances in Agronomy* 105:47-82.
- Sommer R, Bossio D. 2014. Dynamics and climate change mitigation potential of soil organic carbon sequestration. *Journal Environmental Management* 144:83-87.
- Stewart C, Paustian K, Keith, Conant R, Plante A, Six J. 2007. Soil carbon saturation: Concept, evidence and evaluation. *Biogeochemistry* 86:19-31.
- Šimek M. et al. 2019. Živá půda: Biologie půdy (1), Academia, Praha
- Šimek M. et al. 2019. Živá půda: Ekologie, využívání a degradace půdy (2), Academia, Praha
- Verma MP, M'hamdi N, Dkhili Z, Brar SK, Misra K. 2014. Thermochemical Transformation of Agro-biomass into Biochar: Simultaneous Carbon Sequestration and Soil Amendment. Pages 51-70 in *Biotransformation of Waste Biomass into High Value Biochemicals*. Springer, New York.
- Zomer RJ, Bossio DA, Sommer R. et al. 2017. Global sequestration potential of increased organic carbon in cropland soils. *Scientific Reports* 7: 15794-8.
- Žížala D, Minařík R, Zádorová T, Juřicová A. 2020. Mapa zásoby humusu v zemědělských půdách ČR: Specializovaná mapa s odborným obsahem. Available from Portaro - katalog knihovny (vumop.cz) (Accessed February 2020).