

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroekologie a rostlinné produkce



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Sekvestrace uhlíku do půdy prostřednictvím pěstování
meziplodin**

Bakalářská práce

Eliška Mlejnková

Vedoucí práce: Ing. Pavel Fuksa, Ph.D.

© 2024 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Sekvestrace uhlíku do půdy prostřednictvím pěstování mezipločin" jsem vypracovala 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 autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 26.4.2024

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Pavlu Fuksovi, Ph.D. za laskavé vedení mé práce, pozitivní motivaci a cenné poznatky k tématu. Dále děkuji mým blízkým za podporu v době psaní této práce. Jmenovitě pak Daliboru Mlejnkovi, Martinu Sittovi a Klokočským skalám.

Sekvestrace uhlíku do půdy prostřednictvím pěstování meziplodin

Souhrn

Bakalářská práce je zaměřena na vypracování literární rešerše o principech a poznacích sekvestrování uhlíku na orné půdě a možnostech jejího zvyšování pomocí pěstování meziplodin.

Půda má veliký potenciál vázat uhlík a jeví se tedy jako vhodné řešení pro jeho ukládání. Nejde přitom o složité technologické postupy, ale pouze změny v zemědělské činnosti na půdě. Při přeměně přirozených ekosystémů v agroekosystémy dochází k uvolnění značného množství uhlíku do atmosféry a ve světovém měřítku orné půdy jde společně s emisemi, které produkuje obhospodařování půdy, o velké množství skleníkových plynů. Snaha o navrácení uhlíku do půdy je tedy na místě. Světové půdy zároveň trpí erozí, nedostatkem organické hmoty a dostupných živin. Snaha o navrácení uhlíku do půdy je tedy na místě i kvůli zdraví půd.

Živá půdní organická hmota v podobě rostlin je velkým činitelem ovlivňování obsahu uhlíku v půdě, a právě obdělávání půdy rozhoduje o emisích CO₂ či ponechání uhlíku v podobě humusové hmoty v půdě. Zvýšení míry sekvestrace lidskou činností by tedy nemělo vliv pouze na odebrání skleníkových plynů z atmosféry, ale i zmíněné benefity ze zvýšeného obsahu půdní organické hmoty. Děje vedoucí k sekvestraci jako je rhizodepozice, činnost mikroorganismů a půdní mykorhizy lze podpořit lidskou činností pro zadržení i následném udržení uhlíku v půdě. Klíčovým faktorem jsou zde agrotechnické postupy, především zpracování půdy a pěstování meziplodin. Mnoho zdrojů se shoduje, že zpracování půdy negativně ovlivňuje půdní strukturu, způsobuje erozi půdy a degradaci půdní organické hmoty. Tedy změny, které podporují emise oxidu uhličitého do atmosféry.

Zařazení meziplodin do osevního postupu se jeví jako vhodné řešení pro rekarbonizaci půdy po zemědělské činnosti. Meziplodiny mají mnoho produkčních i mimoprodukčních benefitů, mezi které se řadí: omezení eroze a zhutnění půdy, zlepšení vodního hospodářství, zlepšení využívání energetických vstupů, podpora biodiverzity a bezobratlých a zelené hnojení. Dokážou nejen stabilizovat organické sloučeniny do více kvalitních humusových molekul, ale i zadržet přebytečný dusík v půdě a fixovat ho zde po delší dobu a předejít tak vyplavování dusíku z půdy. Prostřednictvím pěstování meziplodin čeledi bobovitých lze dosáhnout fixace nejen atmosférického uhlíku, ale i dusíku a zmenšit tak vstupy dusíkatých hnojiv. Odhady míry sekvestrace meziplodinami v globálním měřítku jsou uváděny 0,6 Gt CO₂ za rok. Pro představu množství odpovídá zhruba 10 % z 5 až 6 Gt CO₂.rok⁻¹, které podle odhadů pocházejí ze zemědělství.

Klíčová slova: organický uhlík v půdě; biomasa; kořenový systém; půdní ekosystém; agrotechnika

Soil carbon sequestration through cultivation of catch crops

Summary

The bachelor thesis is focused on the literature research on the principles and knowledge of carbon sequestration on arable land and the possibilities of its increase by intercropping.

Soil has a great potential to sequester carbon and therefore appears to be a suitable solution for carbon storage. This does not involve complex technological practices, but only changes in agricultural practices on the land. The conversion of natural ecosystems into agroecosystems releases a significant amount of carbon into the atmosphere and on a global scale, arable land, together with emissions from land management, accounts for a large amount of greenhouse gases. Effort to return carbon to the soil is therefore a logical step. At the same time, the world's soils are suffering from erosion, a lack of organic matter and available nutrients. So efforts to return carbon to the soil are also appropriate for the sake of soil health.

Living soil organic matter in the form of plants is a major factor in influencing the carbon content of the soil, and it is the cultivation of the soil that determines the CO₂ emissions or the retention of carbon in the form of humus in the soil. Thus, an increase in the rate of sequestration by human activity would not only affect the removal of greenhouse gases from the atmosphere, but also the aforementioned benefits from increased soil organic matter. Processes leading to sequestration such as rhizodeposition, microorganism activity and soil mycorrhizae can be enhanced by human activity for the retention and subsequent storage of soil carbon. Agronomic practices, especially tillage and intercropping, are a key factor. Many sources agree that tillage negatively affects soil structure, causing soil erosion and degradation of soil organic matter. These changes promote the emission of carbon dioxide into the atmosphere.

Incorporating intercropping into crop rotation seems to be a suitable solution for soil recarbonisation after agricultural activity. Intercropping has many production and non-production benefits, including: reducing soil erosion and soil compaction, improving water management, improving the use of energy inputs, promoting biodiversity and invertebrates, and green manuring. They can not only stabilise organic compounds into more high-quality humus molecules, but also retain excess nitrogen in the soil and fix it there for longer periods of time, preventing nitrogen leaching from the soil. Through the cultivation of legume intercrops, fixation of not only atmospheric carbon but also of nitrogen can be achieved, which causes for reducing nitrogen fertiliser inputs. Estimates of the global sequestration rate of intercrops are given as 0.6 Gt CO₂ per year. To give an idea, the amount corresponds to about 10 % of the 5 to 6 Gt CO₂.yr⁻¹ estimated to come from agriculture.

Keywords: soil organic carbon; biomass; root system; soil ecosystem; agrotechnology

Obsah

1 Úvod	7
2 Cíl práce	8
3 Literární rešerše	9
3.1 Význam uhlíku pro klima současnosti	9
3.1.1 Cyklus uhlíku.....	9
3.1.2 Zvyšování obsahu uhlíku v atmosféře	10
3.1.3 Změna klimatu a zemědělství	11
3.2 Uhlíková politika Evropské unie	12
3.3 Půdní organická hmota	13
3.4 Bilance uhlíku v rostlinách	14
3.5 Procesy sekvestrace uhlíku	15
3.5.1 Rhizodepozice.....	15
3.5.2 Mykorrhiza.....	17
3.5.3 Půdní symbiotické mikroorganismy	18
3.5.3.1 Vliv pěstování meziplodin na půdní mikrobiální společenstva	18
3.6 Sekvestrovaný uhlík v půdě	18
3.7 Agrotechnika	19
3.7.1 Zpracování půdy	20
3.8 Meziplodiny	22
3.8.1 Rozdělení meziplodin podle doby založení porostu:	24
3.8.1.1 Podsevové meziplodiny	24
3.8.1.2 Strniskové meziplodiny	24
3.8.1.3 Letní meziplodiny	24
3.8.1.4 Ozimé meziplodiny.....	24
3.8.2 Vliv pěstování meziplodin na půdu	25
3.8.2.1 Organické hnojení.....	25
3.8.2.2 Omezení eroze půdy	26
3.8.2.3 Vliv na omezení zhutnění půdy	27
3.8.2.4 Vliv kořenů	27
3.8.2.5 Regulace plevelů a škůdců.....	29
3.8.2.6 Podpora biodiverzity a bezobratlých	29
3.8.3 Potenciál meziplodin k sekvestraci uhlíku	31
4 Závěr	35
5 Literatura	36

1 Úvod

Se zvyšujícím množstvím skleníkových plynů v atmosféře a jejich vlivem na klimatickou změnu je téma pohlcování uhlíku velmi aktuální. Výzvou dnešního světa je také rostoucí populace, zvyšování životní úrovně, nadměrné užívání syntetických hnojiv, potravinová bezpečnost a půdní úrodnost. To vše má jistou spojitost s globálním cyklem uhlíku v prostředí a stojí za to se zaměřit na nerovnováhu způsobenou člověkem v této oblasti.

Navzdory tomu, že světové půdy obsahují 1 500 Gt půdního organického uhlíku do hloubky 1 m, tedy mnohem menší množství uhlíku než oceány (38 000 Gt C), jsou to půdy, které přitahují pozornost, protože reagují na změny hospodaření. Bylo zahájeno několik iniciativ ke zvýšení zásob organického uhlíku v půdě s cílem kompenzovat globální emise skleníkových plynů z antropogenních zdrojů a zároveň posílit udržitelnost ekosystémů.

Debatu o vlivu zemědělství na klimatickou změnu také vzbuzuje fakt, že každý rok se zemědělství podílí na produkci 10 – 12 % celkového množství skleníkových plynů, které odpovídá asi 5 – 6 Gt ekvivalentního oxidu uhličitého (FAO 2009). Přičemž u přístupů jako je ekologické hospodaření je menší nejen negativní vliv na ekosystémy, ale i emise skleníkových plynů.

Jako adaptace na klimatickou změnu je obecně doporučováno pěstování meziplodin v období mezi pěstováním hlavních produkčních plodin, dále minimalizace orby a vybírání odrůd vhodných do současných podmínek antropocénu.

Hospodaření s krycími plodinami rovněž umožňuje adaptaci na extrémní výkyvy počasí díky snížení náchylnosti k erozi v důsledku extrémních dešťů a zlepšení hospodaření s vodou v půdě během období sucha. Také dokážou zadržovat přebytečný dusík v půdě, který by jinak byl vyplaven a ohrožoval povrchové vody eutrofizací.

2 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je vypracovat literární rešerši zaměřenou na problematiku poutání atmosférického uhlíku a možnosti jeho zadržení v půdě pomocí pěstování meziplodin.

3 Literární rešerše

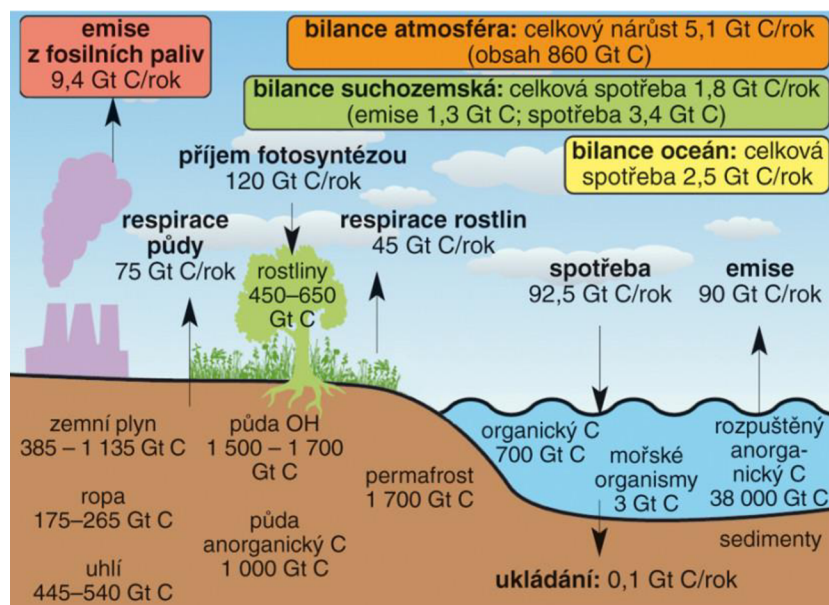
3.1 Význam uhlíku pro klima současnosti

3.1.1 Cyklus uhlíku

Uhlík se svými unikátními vlastnostmi je základní stavební jednotkou života na Zemi. Celkové množství uhlíku se odhaduje v řádu 32×10^{23} g (Schlesinger & Bernhardt 1997). Nejvíce zásob uhlíku je v sedimentárních horninách a na dně oceánu, ty reagují velmi pomalu, v rámci milionů let. Aktivní zásobníky obsahují přibližně 40×10^{18} g uhlíku, mezi ty patří biosféra, pedosféra, atmosféra a hydrosféra. Uhlíkové toky mezi jeho jednotlivými zásobníky zemského ekosystému nazýváme cyklus uhlíku. Tyto interakce mohou být buď velmi pomalé, např. vznik vápence a pohyby litosférických desek, nebo rychlé jako jsou absorpce hladinou oceánů a dýchání živočichů a rostlin. Pro globální cyklus tohoto prvku je charakteristický přenos mezi suchozemskými ekosystémy a oceány a atmosférou (Šimek 2021).

Nejdynamičtější výměnou cyklu je absorpce oxidu uhličitého hladinou oceánů a moří. Tato schopnost slané vody se velmi výrazně odvíjí od teploty a platí tu vztah, čím větší je teplota, tím menší množství CO_2 se absorbuje. Naopak s menší teplotou se absorbuje více oxidu uhličitého. Ve vodě se uhlík rozpouští ve slabou kyselinu uhličitou (H_2CO_3), hydrogenuhličitany (HCO_3^-), uhličitany (CO_3^{2-}) a vodíkové ionty (Gatusso & Hanson 2012). Mořské organismy dokážou uhlík rozpuštěný ve vodě zpracovávat rychlostí $0,1 \text{ Gt.rok}^{-1}$ a ukládají ho na mořské dno. S dnešní nadmírou CO_2 v atmosféře však dochází k tzv. acidifikaci oceánů. Za posledních 200 let kleslo pH z původní hodnoty 8,2 na dnešních 8,1 (IPCC 2014). Tento fakt se neobejde bez dopadu a trpí tím vodní organismy jako korály, jejichž schránky z uhličitánu vápenatého jsou rozpouštěny.

Následující schéma popisuje obsahy a bilance jednotlivých zásobníků v jednotkách gigatun. Je zde vidět, že zemská kůra je velkým zásobníkem uhlíku. Uvedené schéma je pouze jedním z možných, různí autoři odhadují zásoby i přenosy uhlíku odlišně. V základních rysech se ale shodují, včetně „přebytku“ globální bilance v posledním období v rozsahu asi $3\text{--}5 \text{ Gt C.rok}^{-1}$, který se projevuje nárůstem množství uhlíku v atmosféře.



Obrázek 1 Schéma cyklu uhlíku na Zemi (Šimek 2021).

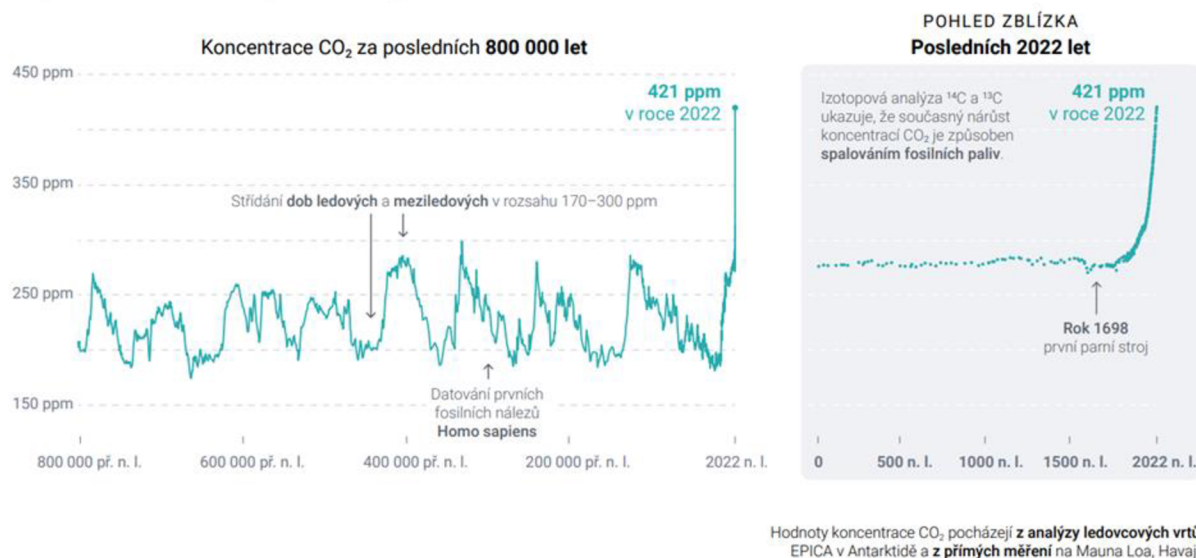
3.1.2 Zvyšování obsahu uhlíku v atmosféře

Obsah oxidu uhličitého v atmosféře se přirozeně mění a vyvíjí od vzniku Země. Jeho měření člověkem probíhá až od roku 1950, ale díky vzduchovým bublinám v antarktických ledovcích můžeme koncentraci CO_2 datovat až dva miliony let nazpět. Díky izotopovým metodám se dostaneme i dále do minulosti. Dnešní hodnoty ukazují, že s vysokou pravděpodobností současnost představuje období s nejvyššími koncentracemi oxidu uhličitého za posledních 23 milionů let (Cílek 2020). Po většinu historie planety se koncentrace pohybovala hluboko pod hranicí 300 ppm (particles per milion), dnes překračuje hodnoty 420 ppm. Abnormalitou v geologickém záznamu je dle Cílka (2020) také rychlost zvyšující se koncentrace v období antropocénu.

Klimatická změna je komplexní problém vzájemně provázaných jevů. Změna jednoho faktoru, např. právě narušení přirozeného toku uhlíku na Zemi má několik příčin a řadu různých následků (Příbyla 2022). Z poznatků paleoklimatologie a hlubinných vrtů byl vymodelován graf koncentrace CO_2 za posledních 800 000 let. Zde jsou zřetelně vidět doby ledové a meziledové způsobovány Milankovičovými cykly a také nárůst koncentrace CO_2 v atmosféře od doby průmyslové revoluce. Tento nárůst dle Buise (2020) a IPCC (2007) není způsoben Milankovičovými cykly, ale právě činností člověka.

Antropogenní oxid uhličitý vypuštěný do atmosféry má 3 osudy, dle výzkumu bylo v letech 2000–2008 29 % CO_2 pohlceno zemskou biosférou, 26 % hladinou moří a oceánů a zbylých 45 % zůstalo v atmosféře, jak zmiňují Gatusso a Hanson (2012).

Dle Reese (2005) je pravděpodobné, že nejen snížení závislosti na zásobách fosilních paliv, ale i změny ve využívání půdy budou hrát zásadní roli v přispění k odstraňování atmosférického CO_2 .



Obrázek 2 Historický vývoj koncentrace CO₂ v atmosféře. (Příbyla et al. 2022).

3.1.3 Změna klimatu a zemědělství

Dle speciální zprávy IPCC (mezivládního panelu pro změnu klimatu) zaměřené na využívání krajiny pokrývá zemědělská půda 12–14 % celosvětového povrchu bez ledu. Od roku 1961 se světová spotřeba kalorií per capita zvýšila o jednu třetinu, přičemž spotřeba rostlinných olejů a masa se více než zdvojnásobila. Zároveň se téměř devítinásobně zvýšilo používání anorganických dusíkatých hnojiv a zhruba zdvojnásobilo použití závlahové vody (IPCC 2019). Vyšší koncentrace CO₂ vedla k vyššímu růstu a produktivitě rostlin v důsledku zvýšené fotosyntézy, ale zvýšená teplota tento efekt kompenzuje, protože vede ke zvýšené rychlosti respirace plodin a evapotranspirace, vyšší zamoření škůdci, posun ve flóře plevelů a zkrácení doby sklizně. Změna klimatu také ovlivňuje mikrobiální populaci a jejich enzymatické aktivity v půdě (Malhi et al. 2020).

Zemědělství je nejvíce zranitelným sektorem pro zasažení změnou klimatu. Velmi úzce se opírá o přírodní podmínky a zároveň je velmi ovlivňuje. Agroekosystémy narušují přirozenou rovnováhu ekosystémů a jejich obhospodařování se podílí na vypouštění CO₂ do atmosféry. Zemědělský sektor jako takový odpovídá za 10–12 % celosvětových antropogenních emisí CO₂, ale co je nejdůležitější, produkuje největší podíl emisí jiných než CO₂, konkrétně 84 % oxidu dusného (N₂O) a 52 % metanu (CH₄), které mají 265 a 28-krát vyšší potenciál globálního oteplování ve srovnání s CO₂ (Shakoor et al. 2024).

Značným producentem skleníkových plynů je i živočišná výroba. Podle Steinfeld et al. (2006), asi 18 % celosvětových emisí skleníkových plynů je nějakým způsobem spojeno s živočišnou výrobou. Chov hospodářských zvířat je dokonce největším producentem metanu z lidské činnosti (Steinfeld et al. 2006).

Schmidhuber & Tubiello (2007) očekávají, že se globální a regionální počasí se stane proměnlivější než v současnosti, a to v souvislosti se zvýšením frekvence a závažnosti extrémních událostí, jako jsou cyklóny, záplavy, krupobití a sucha. Tím, že přinášejí větší výkyvy ve výnosech plodin a místních zásob potravin a vyšší riziko sesuvů půdy a poškození erozí, mohou nepříznivě ovlivnit stabilitu dodávek potravin, a tím i potravinovou bezpečnost.

Data Evropské agentury pro životní prostředí uvádějí, že celkové hlášené ekonomické ztráty způsobené extrémní klimatu a počasí v členských zemích v období 1980–2015 dosáhly přibližně 433 miliard EUR. Průměrné roční hospodářské ztráty se v období 1980–1989 pohybovaly mezi 7,5 miliardy EUR, 13,5 miliardy EUR v období 1990–1999 a 14,3 miliardy EUR v období 2000–2009. V období od roku 2010 do roku 2015 činila průměrná roční ztráta přibližně 13,3 miliardy EUR (Ministerstvo zemědělství 2017).

3.2 Uhlíková politika Evropské unie

Závazek EU snížit emise uhlíku se datuje od počátku 90. let 20. století založením Evropské agentury pro životní prostředí v reakci na Kjótský protokol a zavedením prvních rámcových směrnic o kvalitě ovzduší. V průběhu let EU postupně posilovala svůj postoj, který vyvrcholil cíli stanovenými v Pařížské dohodě z roku 2015. ČR jako člen EU přihlásila s ostatními členskými státy EU společně snížit do roku 2030 emise skleníkových plynů o nejméně 40 % ve srovnání s rokem 1990 (Rada Evropské komise 2023).

Evropská zelená dohoda, představená v roce 2019 strategie Evropské unie (EU) zaměřená na transformaci ekonomiky do udržitelnější a čistější budoucnosti si klade za cíl dosáhnout neutrality v oblasti emisí uhlíku do roku 2050. Mezi klíčové prvky patří:

- **Čistá energetika**

Zatímco v roce 2019 šlo o sektor s nejvyššími emisemi skleníkových plynů – 26 %, v roce 2021 tento podíl klesnul na 20,2 %. Emise z energetiky vznikají především spalováním fosilních paliv (zejm. uhlí a zemní plyn) při výrobě elektřiny a tepla.

- **Udržitelná mobilita**

Doprava následuje v objemu emisí skleníkových plynů EU těsně za energetikou, v roce 2021 se rovněž podílela na 23,9 % z nich. Na rozdíl od všech ostatních sektorů hospodářství emise z dopravy stále rostou – v roce 2019 byly o 33 % vyšší než v roce 1990.

- **Renovace budov**

Sektor budov spotřebuje až 40 % energie vyrobené v EU. V roce 2019 vyprodukoval až 36 % emisí skleníkových plynů (Evropská komise 2020). Ty vznikají jednak spalováním fosilních paliv v samotných budovách a jednak ve stavebnictví (při výrobě stavebního materiálu, stavbě či renovaci).

- **Dekarbonizace průmyslu a oběhové hospodářství**

Průmysl se v roce 2021 podílel na unijních emisích skleníkových plynů přibližně 21 %. Podíl emisí se zde prolíná s předchozí kategorií při výrobě cementu, železa a oceli.

- **Udržitelné zemědělství**

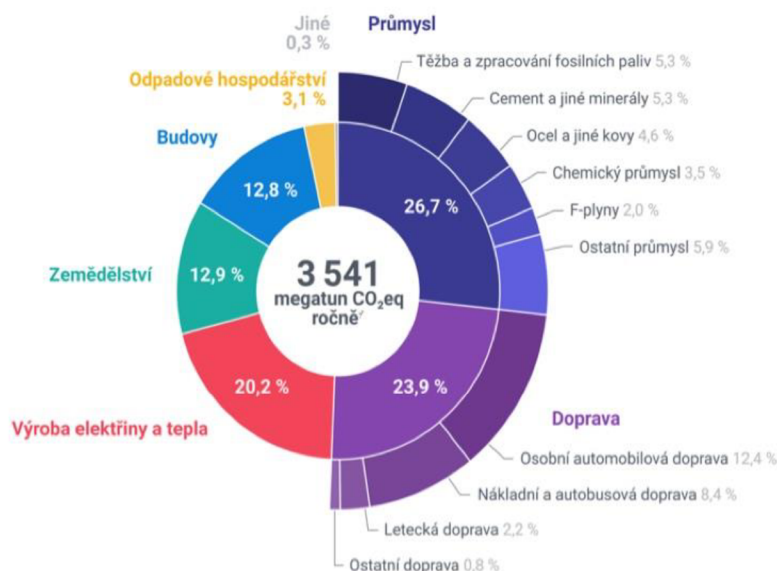
Zemědělství se v roce 2019 podílelo na celkových emisích skleníkových plynů v EU z 10 %. Emise zde vznikají především při živočišné výrobě a při obdělávání zemědělské půdy.

- **Ochrana biodiverzity a ekosystémů**

Klimatická a biodiverzitní krize spolu úzce souvisejí – změna klimatu je jednou z příčin ubývání biodiverzity. Mezi další příčiny patří mizení biotopů, nadměrná exploatace, vysoká míra znečištění a šíření nepůvodních druhů (Evropská komise 2019; Kolouchová 2022).

EMISE SKLENÍKOVÝCH PLYNŮ V EU PODLE SEKTORŮ

Celkové emise Evropské unie za rok 2021.



Obrázek 3 Emise EU podle sektorů (Fakta o klimatu 2022)

3.3 Půdní organická hmota

Pevná fáze půdy tvoří zhruba polovinu objemu půdy a organická hmota v příznivém stavu pro růst rostlin kolem 5 % objemu půdy (Černý et al. 2019). Organická složka vzniká rozpadem rostlinných a živočišných zbytků a syntetizující činností mikroorganismů (Schnitzer & Khan 1978). Nejde jen o mrtvou hmotu, ale řadí se sem i půdní život, tedy zoedafon tvořený půdní faunou a fytoedafon, kam řadíme mikroorganismy jako sinice, řasy, bakterie, archea a houby. Dělení na fyto a zoedafon je však na ústupu a v anglicky psané literatuře se setkáváme s termínem soil organisms. Organismy se v půdě vyskytují v různé abundanci, diverzitě i biomase, podle typu půdy (Šimek 2020). Odhadem však mikroorganismy tvoří 80 % biomasy edafonu. Tato živá složka zajišťuje tok energie a látek v půdě, rozkladné a syntetické procesy. Mezi edafon se nepočítají kořeny a jiné části rostlin, které do organického materiálu půdy také patří.

Neživá organická hmota je dělena na primární humusovou hmotu a humusové substance. Primární humusovou hmotu tvoří široká škála organických látek od jednotlivých molekul po odumřelé části rostlin v různé fázi rozkladu. Řadí se sem i posklizňové zbytky a statková hnojiva. Většina této organické hmoty je časem mineralizována (prodýchána půdou na CO₂ a minerální živiny) a jen malá část je proměněna na humusové látky. Primární organická hmota slouží tedy převážně jako zdroj živin pro půdní mikroflóru. Humusové látky jsou výsledkem

procesu humifikace a jde o vysokomolekulární látky. Můžeme je podle rozpustnosti v kyselinách nebo zásadách dělit na huminové kyseliny, fulvokyseliny a huminy.

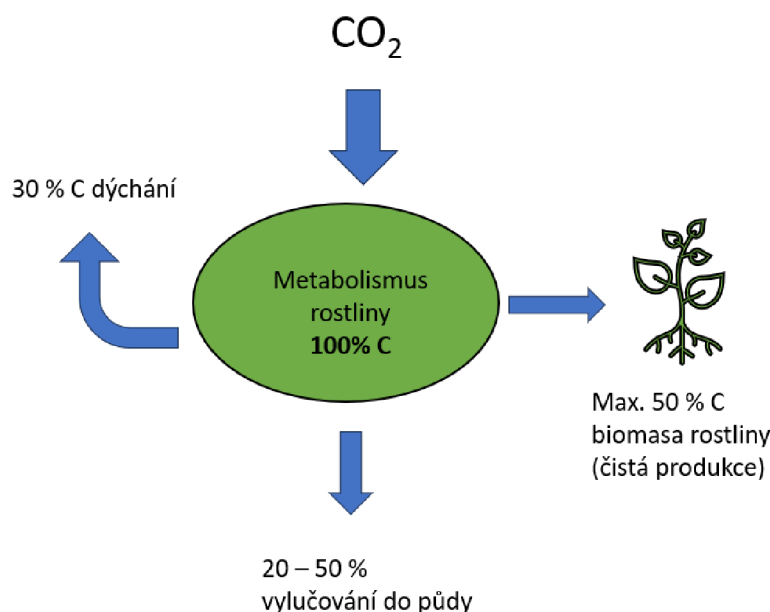
Podle Bohna (1976) je hmotnost půdní organické hmoty vyšší než v ostatních sférách dohromady (v biomase, atmosféře, sladké i mořské vodě v součtu). Organická hmota v půdě má nezastupitelný význam pro celý ekosystém. Mezi její hlavní funkce patří: zlepšování půdní struktury tvořením agregátů, zadržování vody, vázání živin, absorpce polutantů, podpora biodiverzity a uhlíkové hospodářství.

Kvalita půdy je jedním ze základních faktorů ovlivňujících rostlinnou produkci. Řada vlastností půdy je dána faktory, které nemůžeme změnit (nadmořská výška, mateční hornina). Naproti tomu řadu vlastností můžeme ovlivnit způsobem užívání půdy (Frouz & Frouzová 2021). Proto lidskou činností jako je intenzivní zemědělství a lesní hospodářství může docházet k výrazným změnám v obsahu organických sloučenin v půdě.

Dle Badalíkové (2019) je půdní organická hmota v agroekosystémech vystavena rozkladu a její nadměrný úbytek je jedním ze závažných degradačních faktorů. To je problém i České republiky, kde došlo k úbytku humusu o 5–15 % u odvodněných půd a dále u půd na zrnitostně lehčích substrátech, přičemž největším nebezpečím je nedostatečné doplňování kvalitní organické hmoty. Proto jsou doporučovány takové způsoby obhospodařování, které povedou ke zvýšení obsahu uhlíku v půdě

3.4 Bilance uhlíku v rostlinách

Je známo, že ve dne rostliny fotosyntetizují a získávají uhlík asimilací CO_2 z atmosféry. Vzniklé organické látky se asi z 30 % dostávají prodýcháním zpět do atmosféry, 20-50 % těchto látek proudí do kořenů a jsou uvolňovány do půdy jako kořenové exsudáty. Zbytek, cca 50 % organického C, tvoří nadzemní a podzemní biomasu rostliny (Šimek et al. 2021).



Obrázek 4 Bilance uhlíku v rostlině. Upraveno dle Šimka et al. 2021.

Právě uhlík vylučovaný do půdy má potenciál v půdě zůstat velmi krátce, nebo se zde vázat až po tisíce let.

3.5 Procesy sekvestrace uhlíku

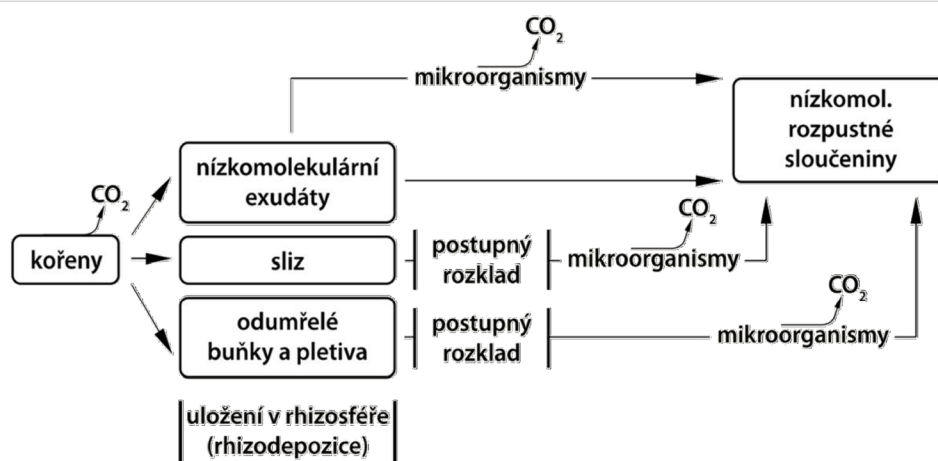
Sekvestrace půdního organického uhlíku je definována jako proces přenosu CO_2 z atmosféry do půdy prostřednictvím rostlin, rostlinných zbytků a jiných organických pevných látek, které jsou skladovány a zadržovány jako součást půdní organické hmoty (Lal 2015). Z důvodu konverze přirozených ekosystémů na zemědělskou půdu obsah půdního organického uhlíku klesá o 25-75 % oproti přirozenému stavu. Může za to nižší návratnost biomasy, ztráty organické hmoty erozí, mineralizace a vyplavování. Mezi další faktory Lal zmiňuje degradační změny půdy jako salinizace, snižování obsahu půdních živin a zhoršování půdní struktury. Nejlepším řešením k rekarbonizaci půdy se podle mnoha zdrojů jeví udržitelný přístup k zemědělství. Ten stojí převážně na třech principech – minimální mechanické narušování půdy, trvalý půdní organický pokryv a diverzifikaci plodin (FAO 2019).

Potenciál půd k pohlcení uhlíku je odhadován různě. FAO (Organizace pro výživu a zemědělství Spojených národů) odhaduje světový potenciál orné půdy a trvalých zemědělských kultur sekvestrovat asi $200 \text{ kg C} \cdot \text{ha}^{-1}$ za rok a pastevní systémy $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, světová sekvestrace uhlíku může činit $2,4 \text{ Gt ekv. CO}_2 \cdot \text{rok}^{-1}$. Tento minimální scénář pro přechod na ekologické zemědělství by zmírnil 40 % emisí skleníkových plynů ze světového zemědělství. Maximální světové odhady zní, že půdy mají roční potenciál sekvestrovat až 4 Gt ekvivalentního CO_2 , tedy skleníkových plynů odebraných z atmosféry přepočtených na odpovídající množství oxidu uhličitého, který by způsobil stejný efekt na skleníkový jev.

Přechodem na ekologické zemědělství dalších přibližně 20 % emisí skleníkových plynů ze zemědělství by bylo možné snížit opuštěním průmyslově vyráběných dusíkatých hnojiv (FAO 2009).

3.5.1 Rhizodepozice

Uvolňování uhlíku z kořenů do půdy, také nazývané rhizodepozice, je velice proměnlivé, ale pro jednoleté rostliny činí cca 40 % a pro lesní stromy, jako je douglaska tisolistá, je to obvykle 70 % z množství uhlíku transportovaného do kořenů (Lynch & Whipps, 1990). Depozice v kořenové sféře vzrůstá při různých formách stresu, jako je mechanický odpor, sucho, nedostatek minerální výživy. Proto se hodnoty u jednotlivých rostlin stejného druhu velmi liší a mohou být např. 2–4 x vyšší pro rostliny pěstované v půdě než pro rostliny pěstované v živném roztoku (Trofymow et al. 1987). Mikroorganismy v rhizosféře zvyšují rhizodepozici zejména u nízkomolekulární frakce depozitů. Během třítydenního pokusu vyloučily kořeny pšenice 7-13 % z čisté produkce fotosyntézy za nepřítomnosti mikroorganismů a 18-25 % produkce za přítomnosti mikroorganismů (Barber & Martin 1976). Bylo dokázáno, že tento zesilující účinek mikroorganismů rhizosféry není primárně způsoben zvýšením toku exudátů, nýbrž snížením množství části nízkomolekulární frakce kořenových exudátů, která se zpětně absorbuje kořeny (Jones a Darrah 1993).



Obrázek 5 Schéma transformace uhlíku v rhizosféře (Warembourg a Biles 1979)

Balík (2009) uvádí, že obsah uhlíku v podobě CO₂ je v rhizosféře také několikanásobně vyšší než v okolní půdě. Durand a Bellon (1993) naměřili koncentraci CO₂ v rhizosféře mladých rostlin kukuřice zpravidla 4–10 krát větší než byl průměr okolí, ale byly také zjištěny případy se 100 krát větší koncentrací. Nejvyšší koncentrace oxidu uhličitého v rhizosféře pak byla naměřena u rostlin s arbuskulární mykorhizou a nejintenzivnější respirace organismů je v blízkosti kořenové špičky (Balík 2009).

Následující tabulka uvádí, že již 2 cm od povrchu kořene je počet bakterií zhruba 10-krát menší než na jeho povrchu.

Vzdálenost od povrchu kořene [mm]	Počet bakterií [miliard buněk.cm ⁻³]
0-1	120
1-5	96
5-10	41
10-15	34
15-20	13

Obrázek 6 Tabulka obsahu bakterií podle vzdálenosti od povrchu kořene (Šimek et al. 2021)

Na povrchu kořene a převážně na kořenové špičce je také důležitá přítomnost vysokomolekulárního slizu (mucigelu). Tvoří ji látky rostlinného i mikrobiálního původu a je především tvořena polysacharidy. Množství produkce slizu přímo pozitivně koreluje s rychlostí růstu kořenů (Trollenier & Hecht-Buchholz 1984).

Již bylo zmíněno, že stres a ztížené podmínky rostlin zvyšují rhizodepozici. Dobrým příkladem pro představu je pokus s kukuřicí. Nárůst objemové hmotnosti půdy z 1,2 g.cm⁻³ na 1,6 g.cm⁻³ drasticky snižuje délku kořene u kukuřice, ale alokace produktů fotosyntézy do kořenů zůstává podobná (40 % čisté produkce fotosyntézy), což vede ke zvýšení spotřeby

produktů fotosyntézy na jednotku délky kořene na dvojnásobek (Balík 2009). Jde tedy o reakci kukuřice na zvýšení mechanického odporu půdy s dopadem na dynamiku živin v rhizosféře.

3.5.2 Mykorhiza

Většina hub si buduje síť z mnohobuněčných vláken nazývaných hyfy. Hyfy rostou napříč povrchy, absorbují živiny ze substrátu a jsou také schopné růstu vzduchem, a tudíž s lehkostí překlenují póry půdy. Mají tak vliv na půdní strukturu, tvorbu agregátů a zadržování vody v půdě (Sheldrake 2022).

Některé houby, zejména ty, které se podílejí na tvorbě stabilní organické hmoty, přispívají k sekvestraci uhlíku v půdě. Přeměnou organické hmoty na stabilnější formy, které odolávají rozkladu, houby pomáhají ukládat uhlík v půdě po delší dobu. Tím snižují množství uhlíku uvolněného do atmosféry v podobě CO₂ (Ritz & Young 2004).

Půdní mykorhiza představuje klíčový aspekt půdní biologie a ekologie. Tyto mutualistické interakce mezi rostlinami a houbami jsou nezbytné pro zdraví a produktivitu ekosystémů. Prostřednictvím těchto asociací houby usnadňují přenos sloučenin uhlíku z rostlin do půdy, kde je mohou ukládat nebo využívat jiné půdní organismy (Ritz & Young 2004).

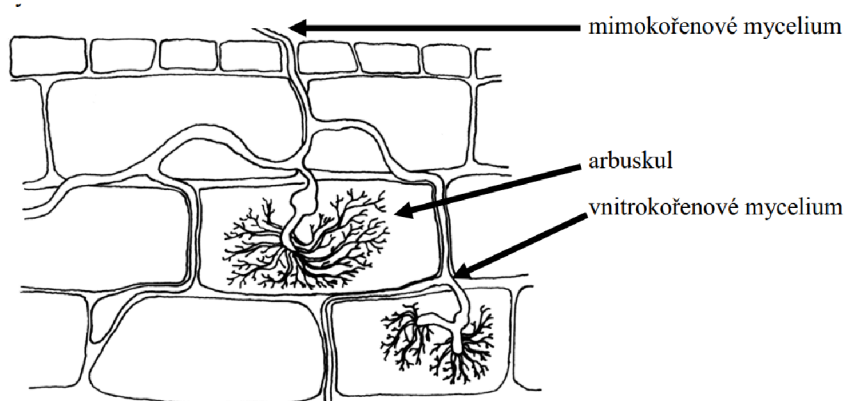
Existují dva hlavní typy půdních mykorhiz: ekto- a endo-. Každý z těchto typů má specifické vlastnosti a interakce s hostitelskými rostlinami. Studie odhadují, že ektomykorhiza tvoří přibližně jednu třetinu živé biomasy v lesních půdách a arbuskulární mykorhizní houby by mohly tvořit až polovinu živé biomasy v zemědělských systémech. Již bylo zmíněno, že mykorhiza má významný vliv na půdní strukturu a tvorbu půdních agregátů. I malé změny v procesech řídicích tok uhlíku do a z mykorhiz mohou mít velký dopad na globální rovnováhu uhlíku (Johnson et al. 2013).

Ektomykorhiza je symbiotický vztah, který se vyskytuje hlavně u dřevin, zejména u jehličnatých stromů a některých listnatých stromů. V tomto typu mykorhizy houby obklopují kořeny rostliny a tvoří rozsáhlé myceliální síť, které pronikají do okolní půdy. Tyto houby jsou obvykle ze skupiny Basidiomycetes nebo Ascomycetes.

Tento typ vnitřní mykorhizy, je symbiotický vztah, který se vyskytuje u široké škály rostlin, včetně mnoha zemědělských plodin. Tento typ mykorhizy je charakterizován tím, že houby vstupují do buněk kořenové kůry rostliny a vytvářejí tam intracelulární myceliální síť. Hlavními skupinami hub spojených s endo-mykorhizou jsou zástupci rodů *Glomus*, *Rhizophagus* a *Gigaspora*.

Endo-mykorhizální symbióza umožňuje efektivní výměnu živin mezi houbou a rostlinou uvnitř kořenové kůry. Hlavními živinami, které jsou přenášeny, jsou dusík, fosfor a další mikroelementy. Tyto houby také produkují enzymy, které pomáhají rozkládat organickou hmotu a zvyšují tak dostupnost živin pro rostliny. Endo-mykorhizální symbióza je klíčovým faktorem zlepšení půdní struktury a stability.

Arbuskulární mykorhiza, známá také jako vesikulárně-arbuskulární mykorhiza, je nejběžnějším typem mykorhizy u vyšších rostlin. Tento typ mykorhizy vytváří intracelulární struktury nazývané arbuskuly, jelikož pod mikroskopem vypadají jako malé stromy. Výměna živin mezi rostlinou a houbou je díky nim efektivnější. Nepřeberné množství prací ukazuje, jak mykorhiza zvyšuje odolnost rostlin vůči řadě abiotických i biotických stresů, zejména suchu, zasolení půdy nebo patogenům (Janoušková 2017).



Obrázek 7 Schéma arbuskulární mykorhizy, na obrázku viditelné kořenové buňky a houbové arbuskuly (Živa AV ČR 2017).

3.5.3 Půdní symbiotické mikroorganismy

Na nejzákladnější úrovni vědci věděli, že mikrobi se s rostlinami spojují již více než století, ale i dnes je mnoho podrobností o interakcích stále neznámých. Vědecké odhady zní, že asi jen 1 % všech půdních mikrobů lze pěstovat na Petriho misce, což je konvenční model pro takový výzkum (Graber 2014). Není tak zatím možné postihnout celou jejich širokou škálu, a především vztahy mezi půdními mikroorganismy.

Mikrobiální biomasa a aktivita jsou hlavními biologickými ukazateli kvality půdy a rychle reagují na agrotechnické změny, zejména hnojení, aplikace pesticidů a zpracování půdy.

3.5.3.1 Vliv pěstování meziplodin na půdní mikrobiální společenstva

Meziplodiny vyvolávají změny ve velikosti a struktuře mikrobiálních společenstev a v aktivitě půdních enzymů. Rostliny podporují vývoj vybraných skupin půdních mikroorganismů, zatímco inhibují růst a enzymatickou aktivitu jiných mikrobiálních skupin. Tyto rozdíly vyplývají ze změn fyzikálních vlastností půdy a dodávky snadno dostupného uhlíku a dusíku, které tvoří substráty pro půdní mikroby.

Wanic et al. (2018) uvádí, že pěstováním meziplodin čeledi lipnicovitých vzrostla bakteriální biomasa o 70 % a biomasa mycelia o 90 %. Dále zmiňuje, že v půdě s porostem hrachu setého jako meziplodiny stoupla hojnost mikrobiální biomasy (o 30-50 %). Zvýšila se i mikrobiální biomasa v půdě o více než 20 % u půdy se směsí meziplodin jílku vytrvalého, čekanky obecné, jetele lučního a jetele plazivého.

3.6 Sekvestrovaný uhlík v půdě

Organické sloučeniny uhlíku, které již byly vyloučeny kořeny do půdy jsou dále ovlivňovány půdními faktory jako je pH, teplota, obsah živin, vlhkost a další. Zmíněné faktory mají velký vliv na tzv. uhlíkový obrat. Ten je definován jako podíl vstupů a výstupů uhlíku do půdy a jeho akumulace je tedy závislá na pozitivní nerovnováze těchto veličin. Není tedy cílem pouze zvyšování vstupů uhlíku do půdy, ale jeho udržení zde.

Za stabilizaci organické hmoty jsou zodpovědné dva hlavní procesy – biochemická přeměna a fyzikálně-chemická ochrana. S biochemickou přeměnou je uhlík transformován biotickými a abiotickými procesy na chemické formy, které jsou odolnější vůči rozkladu a v některých případech snadněji se zadržují sorpcí do půdních pevných látek. Obecně se hovoří o procesu humifikace a vznikají zde humusové materiály (Jastrow 2006). Charakteristické postupy, které by mohly podporovat (bio)chemické změny, zahrnují minimalizaci zpracování půdy, udržování pH půdy blízko neutrální a zajištění dostatečného odvodnění. Na některých typech půd může být tento přístup dále rozšířen o úpravy s různými povrchy mikro- a mezoporézní sorbenty, které stabilizují enzymy a zlepšují vlastnosti zadržování vlhkosti (Jastrow 2006). Mezi takové sorbenty se řadí např. popílek – anorganický materiál vznikající při spalování uhlí a biochar – biomasa zuhelnatělá procesem pyrolýzy za účelem aplikace do půdy.

V případě biocharu jde o velmi stabilní materiál s odhadovanou životností stovek až tisíců let (Lehmann 2007). Jde zároveň o skutečnou sekvestraci uhlíku, jelikož oxid uhličitý byl odčerpán biomasou z atmosféry. S dlouhodobým hnojením dřevěným uhlím mají zkušenosti např. v Amazonii, kde již před naším letopočtem vznikaly antropogenní půdy tzv. terra preta (portugalsky tmavá země) – velmi kvalitní antropogenní černozemě (Sohi et al. 2010).

Při fyzikálně-chemických přeměnách organického uhlíku v půdě dochází ke stabilizaci přes sorpci na povrch půdy, ukládání v pórech a okluzi v agregátech (Carter & Steward 1995). Význam a potenciální nasycení těchto dvou stabilizačních mechanismů se liší v závislosti na typu půdy, vegetaci, způsobech hospodaření, a podmínkách prostředí.

3.7 Agrotechnika

Pojmem agrotechnika rozumíme technologie používané v zemědělství. Konkrétně například zavlažování, používání hnojiv a přípravků k ochraně rostlin, mechanizace a automatizace. Dohromady má agrotechnika zásadní vliv na ekosystémy a agroekosystémy.

Například Bai et al. (2019) zmiňuje, že klíčem k sekvestraci většího množství uhlíku v půdě je zvýšení uhlíkových vstupů a snižování uhlíkových výstupů. Často doporučované přístupy pro sekvestraci půdního organického uhlíku zahrnují přidání krycí plodiny do osevního postupu, aplikace biocharu do půdy a minimalizace zpracování půdy.

FAO (2009) mluví o organickém (ekologickém) přístupu hospodaření, které podporuje především zdraví agroekosystému, přirozené cykly prvků a minimalizuje používání syntetických přípravků. Přechod na takové zemědělství by mohl znamenat celosvětové snížení výnosů. Podle různých studií by toto snížení výnosu mohlo být 30 až 40 % intenzivně obhospodařované oblasti za nejlepších geoklimatických podmínek. V klimaticky méně příznivých v regionech by však ztráty na výnosech byly téměř nulové.

3.7.1 Zpracování půdy

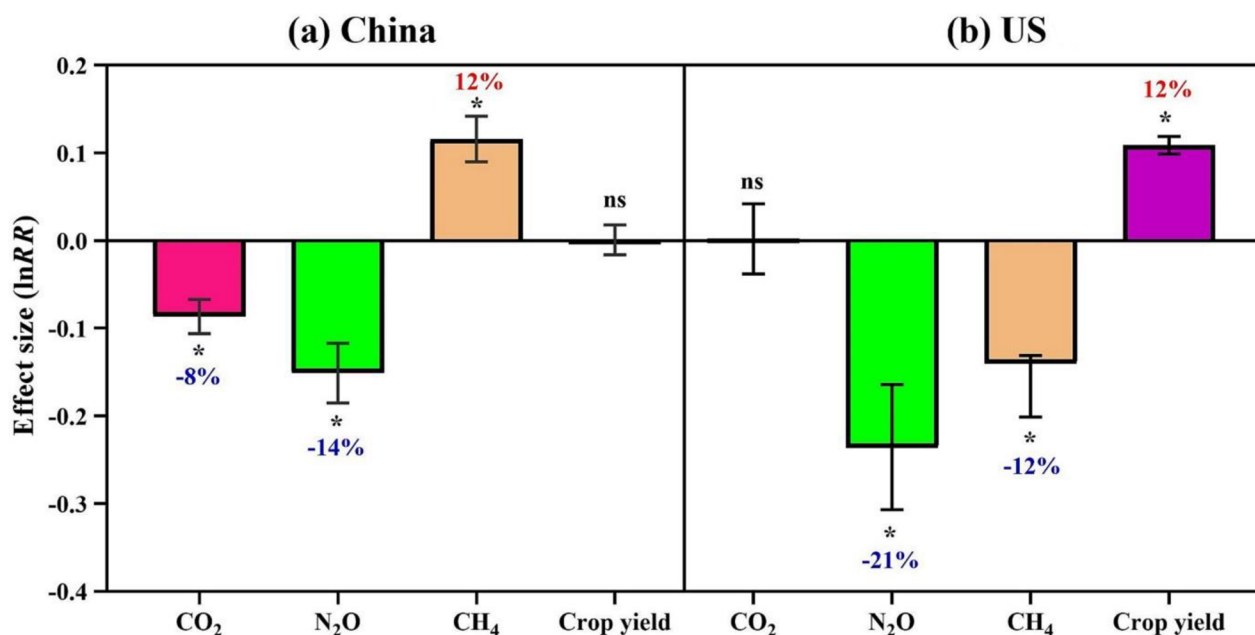
Zpracování půdy je jednou z hlavních technik hospodaření na půdě. Je používáno k přípravě seťového lůžka a zakládání porostů polních plodin, zapravování hnojiv a zbytků rostlin do půdy a k regulaci plevelů. Zpracování půdy tak zahrnuje řadu rozdílných zásahů (orbu, podrývání půdy, kypření, vláčení, válení) a jejich modifikací používaných v různých kombinacích. Způsob a intenzita zpracování půdy jsou významné faktory ovlivňující strukturu půdy a stabilitu půdních agregátů. Při hodnocení vlivu zpracování půdy na stabilitu struktury půdy jsou dosahovány rozdílné a často kontroverzní výsledky (Mayerová 2022).

Primárním účinkem zpracování půdy je fyzické narušení půdního profilu. Mikrobiální obyvatelé půdy budou na takové narušení reagovat odlišně. Konkrétní účinek bude do značné míry záviset na narušení, ke kterému dochází v prostorovém měřítku, na které jsou organismy citlivé. Například rozsáhlá síť houbových hyf rozrůstajících se půdním profilem může být dramaticky ovlivněna orbou, která roztrhává hyfální spojení a narušuje toky látek v myceliu (Ritz & Young 2000).

Mnoho studií prokázalo, že intenzivní zpracování půdy zhoršuje strukturu půdy a zvyšuje erozi půdy. Zejména orba, která mísením ředí organickou hmotu v povrchovém horizontu na ní bohatém s horizonty s jejím nízkým obsahem, může narušit kontinuitu porů v půdě a stabilitu agregátů, jejichž velikost se snižuje (Al-Kaisi a kol. 2014). Rozpad půdních agregátů zvyšuje dostupnost a kontakty organické hmoty s mikroorganismy, které ji rozkládají. Výsledkem je podpora mineralizace a úbytek organické hmoty (Liang et al. 2009).

Současné poznatky bezorebného zemědělství poukazují na dalekosáhlý globální dopad na emise půdních skleníkových plynů a výnosy plodin, i když výhody bezorebného přístupu jsou často založeny o kompromisech mezi rostlinnou produkcí a emisemi skleníkových plynů. Velkými proměnnými jsou zde však převládající klimatické a půdními podmínkami stanoviště, jako jsou pH, vlhkost půdy, půdní typ, teplota, množství uhlíku a dusíku v půdě (Shakoor et al. 2024).

Na vliv bezorebného zemědělství v různých klimatických podmínkách na emise skleníkových plynů a výnosy se zaměřila studie z USA a Číny publikovaná v roce 2024. Pěstovanými plodinami zde byly pšenice, kukuřice a rýže. Zatímco v USA se emise CO₂ téměř nezměnily, v Číně klesly o 8 % v porovnání s konvenčním hospodařením. V obou případech výrazně klesly emise oxidu dusného, v Číně šlo o 14 %, v případě USA to bylo 21 %. Nejvýraznější změna nastala v případě emisí methanu. Zatímco v USA klesly emise methanu o 12 %, v Číně o 12 % vzrostly. Průměrné výnosy plodin se výrazně změnily pouze v případě USA a to o 12 %. V Číně se výnosy v bezorebném přístupu změnily jen zanedbatelně.



Obrázek 8 Graf emisí skleníkových plynů a výnosů plodin v bezorebném režimu v porovnání s konvenčním hospodařením. (Shakoor 2024)

Dle studie Reese z roku 2005 hospodaření s půdou a plodinami může hrát významnou roli při rozsahu sekvence uhlíku půdou. Srovnání 11 terénních studií ukázalo, že respirace půdy se pohybuje mezi 4 a 26 t C.ha⁻¹.rok⁻¹, z důvodu managementu půdy jako je obdělávání půdy, odvodňování, pastvy a aplikace hnoje. Tedy nejen půdní podmínky, ale i agrotechnika hraje významnou roli v sekvestraci, obsahu a udržení organického uhlíku v půdě.

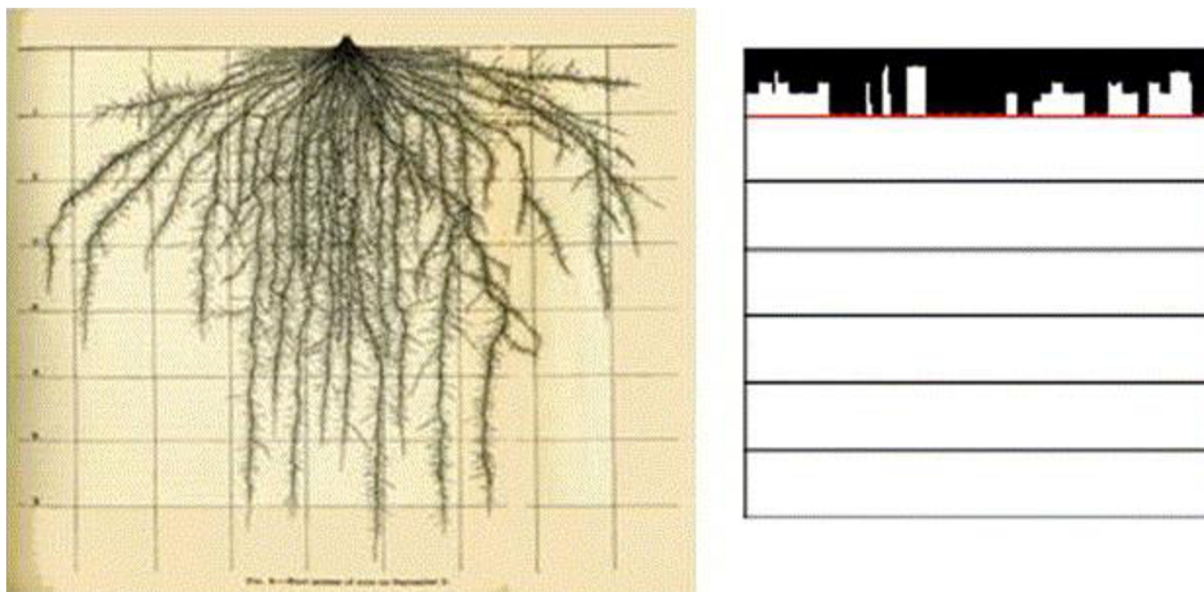
Bai et al. zkoumal v souhrnné studii z roku 2020 vliv tzv. climate-smart agriculture (klimaticky šetrného zemědělství) na obsah organického uhlíku v půdě. Zaměřil se konkrétně na používání minimálního zpracování půdy, porost meziplodin a aplikaci biocharu. Jeho výsledky ukázaly, že kombinace těchto faktorů climate-smart agriculture mohly významně zlepšit sekvestraci uhlíku do půdy.

V teplých oblastech se obsah půdního organického uhlíku zvýšil o 13 % při kombinaci minimálního zpracování půdy a krycí plodiny. V jílovitých půdách, kombinace meziplodin a minimální orby významně snížily obsah organického uhlíku o 19 %.

Baker et al. (2007) poukázali na to, že studie o hospodaření s půdou, např. o obdělávání půdy, by měly uvažovat celé půdní profily místo do hloubky 0,3 m nebo méně, protože mělké vzorkování přineslo nepřesné závěry. Pokud se odběr vzorků provádí hlouběji než 0,3 m, studie ukazují, že opuštění zpracování půdy nevede ke zvýšení zásoby organického uhlíku, ale pouze k jeho redistribuci. Vyšší koncentrace uhlíku se tak hromadí blízko povrchu půdy na úkor ztrát v hlubších vrstvách půdy. To bylo dále potvrzeno Luo et al. (2010) s použitím 69 experimentů bez orby.

Následující obrázek poukazuje na hloubku kořenů v porovnání s prováděnými odběry mnoha studií, tedy nejčastěji do hloubky 30 cm. Vlevo je schéma kořenového systému kukuřice

se čtverci o měřítku 1x1 stopa, tedy přibližně 30 cm. Vpravo jsou ve stejném měřítku znázorněny černou barvou nejčastější odběry půdních vzorků.



Obrázek 9 Porovnání hloubky kořenového systému kukuřice s hloubkou odebíraných vzorků půdy (Baker 2007).

3.8 Meziplodiny

Obecně se dají meziplodiny popsat jako rostliny pěstované vedle hlavních produkčních plodin s cílem zlepšit udržitelnost a produktivitu zemědělství. Jde především o rostliny s krátkou vegetační dobou (rychlým růstem). Jejich funkce může být produkční i mimoprodukční.

Mimoprodukční funkce meziplodin mohou být především vnímány v kontextu zachování a ochrany přírodních zdrojů a mohou sloužit jako prostředek k stabilizaci toků energie a hmoty v krajině. Naopak produkční funkce jsou spojeny s integrovanými systémy hospodaření na orné půdě, které se zaměřují na efektivní využívání přírodních podmínek a vstupů energie. Tímto způsobem se snaží dosáhnout požadovaných výnosů a kvality rostlinných produktů při optimalizaci přidaných energetických vstupů (Brant 2008).

Rozvoj zemědělských systémů je spjat s vývojem osevních postupů v rámci pravých zemědělských systémů. Ty lze na rozdíl od tzv. primitivních systémů spojovat s trvalým osídlením, pravidelným obhospodařováním půdy a s potřebou udržování půdní úrodnosti. Jejich základem v Evropě je přechod od trojpolního systému hospodaření a jeho modifikací ke střídavým osevním postupům. Ty vycházely ze střídavých osevních postupů vzniklých v 18. století ve Flandrech a následně rozšířených do Anglie. Mluvíme o tzv. norfolském osevním postupu. Zavedení střídavých osevních postupů lze jednoznačně považovat za výrazný faktor vedoucí k pestrosti struktury plodin pěstovaných na orné půdě, se současným zvýšením půdní úrodnosti a výnosů. Nárůst pestrosti struktury osevních postupů v Evropě lze zaznamenat od

počátku 17. století do 60. let 20. století. Následně dochází v důsledku změny druhové a odrůdové skladby plodin, využívání minerálních hnojiv a pesticidů a dalších faktorů k poklesu pestrosti osevních postupů. Vysoký tlak na efektivitu a ekonomiku výroby, změny struktury chovu hospodářských zvířat a globalizace trhu monotónnost osevních postupů dále prohlubují. Důsledkem je absence výhod střídání plodin, která je jednou z primárních příčin negativního vlivu zemědělství na kvalitu přírodních zdrojů (Brant 2019).

Nové postupy pěstování plodin se zaměřují na zvýšení druhové pestrosti osevních sledů a samotné pestrosti struktury pěstovaných plodin na půdním bloku. Jednou z možností je dlouhodobé a systémové zařazování porostů meziplodin do stávající struktury plodin. Především v 90. letech minulého století se v Evropě jednalo o rozvoj tzv. integrovaných osevních postupů, jejichž cílem bylo na základě zvýšeného využívání meziplodin zlepšit bilanci toku energie a hmoty na orné půdě (Brant 2019).

Mnohostranné pozitivní účinky pěstování meziplodin jsou v zemědělské praxi dlouhodobě a všeobecně uznávány. I v současné rostlinné výrobě zůstávají nezbytnou součástí systémů hospodaření v produkčních oblastech České republiky. V posledních letech výrazně stoupá význam meziplodin v osevních postupech, kde se postupným rozšiřováním jejich pěstování stále zřetelněji potvrzuje jejich příznivý vliv na půdní prostředí (Vach et al. 2009).

Pěstování meziplodin je v současnosti státem podporováno přímou finanční podporou určenou na pěstování meziplodin v podobě dotace v rámci agroenvironmentálně-klimatických opatření (AEKO). V rámci podopatření týkajícího se meziplodin jsou stanoveny dva tituly – meziplodiny proti utužení půdy a meziplodiny pro zlepšení struktury půdy, u nichž jsou stanoveny odlišné specifické směsi osiv (Ministerstvo zemědělství 2023).

Brant (2019) uvádí, že meziplodiny v pěstebních systémech řeší následující okruhy problémů:

- omezení dodatkových vstupů energie, zejména z neobnovitelných zdrojů, stabilizace bilance energie a hmoty na základě fixace sluneční energie do biomasy neopouštějící půdní blok
- zamezení degradačních procesů půdy, včetně eroze, s využitím bioefektů
- cílené zadržování vody v půdě, zvýšení jejího využití a omezení jejího znečišťování,
- snížení vstupů pesticidů a dalších škodlivých látek na jednotku plochy půdy
- snížení spotřeby a zvýšení efektivity využití průmyslově vyráběných hnojiv
- stabilizace a zpestření potravní nabídky pro mikrobiální společenstva v půdě a zajištění druhové pestrosti půdní mikroflóry,
- podpora druhové pestrosti rostlinných společenstev v agroekosystému za účelem volně žijících organismů ve vztahu k omezení škod škodlivými činiteli
- zachování či zvýšení produktivity pěstebních systémů na základě využívání biotických principů
- zvyšování pestrosti osevních postupů a využití modifikovaných principů střídání plodin ve stávajících systémech pěstování
- propojení biotických intenzifikací a moderních technologií v návaznosti na automatiku a robotiku

3.8.1 Rozdělení meziplodin podle doby založení porostu:

3.8.1.1 Podsevové meziplodiny

Představují skupinu meziplodin zakládaných na podzim nebo na jaře do porostů kulturních rostlin. Podsevové meziplodiny lze využít pro výsevy do plodin s úzkými řádky nebo do širokořádkových plodin. Z hlediska jejich využití v těchto porostech se jedná o regulaci zaplevelení po dobu růstu porostu a následně po jeho sklizni, a podílejí se i na eliminaci eroze (Brant 2008). Literatura je zmiňuje i pod názvem živého mulče.

Z hlediska vlivu podsevových meziplodin na kvalitu produkce a výši výnosu obilnin se literární údaje rozcházejí. Vliv podsevu na výnos hlavní plodiny je ovlivňován rostlinným druhem použitým jako podsev a termínem výsevu a určován je i průběhem povětrnostních podmínek. Hartl (1989) uvádí, že výsevy tolíce dětelové a jetele zvráceného založené v polovině dubna do ozimé pšenice způsobily pokles výnosu. Naopak u porostů s podsevem jetele plazivého byl zaznamenán nárůst výnosu (Brant 2008).

3.8.1.2 Strniskové meziplodiny

Strniskové meziplodiny jsou v současné době nejpěstovanější skupinou. Vysévají se po sklizni obilovin, luskovin nebo olejnin, nejčastěji v průběhu srpna. Vegetační doba je za dostatečné vlhkosti půdy 60 dnů. Nejčastěji jsou zaorávány na zelené hnojení, podmínkou jejich využití je rychlé pokrytí půdy, krátká vegetační doba, velká produkce biomasy a levné osivo. Nejčastějšími druhy jsou hořčice bílá, svazenka vratičolistá, pohanka setá, řepice ozimá a ředkev olejná (Mendelu 2024).

3.8.1.3 Letní meziplodiny

Uplatnění typických letních meziplodin je v rámci České republiky spíše sporadické. Důvodem poklesu zájmu zemědělské praxe o tuto skupinu meziplodin je výnosová nejistota při krmném využití a nekonkurenceschopnost vůči silážní kukuřici. Ještě v osmdesátých letech minulého století byly letní meziplodiny standardní součástí plánů zeleného krmení, kdy se v osevním postupu zařazovaly zejména po sklizených ozimých meziplodinách. Dnes nalézají širší využití díky odplevelujícímu účinku jen v systémech ekologického zemědělství.

Jako letní meziplodiny jsou nejčastěji vysévány druhy tvořící velké množství biomasy. Jedná se o lupiny, hrách setý, bob obecný, kukuřici, slunečnici, vikve, krmnou kapustu a ředkev vodnici (Brant 2008).

3.8.1.4 Ozimé meziplodiny

Význam ozimých meziplodin spočívá jednoznačně v produkci píce na jaře a v časném létě. Podzimní výsevy těchto druhů v souvislosti s jejich biologií je činí využitelnými ve všech výrobních oblastech.

Podobně jako letní meziplodiny, i ozimé meziplodiny vykazují nižší produkci a kvalitu biomasy ve srovnání se silážní kukuřicí a mají omezené uplatnění v rámci dominantních

osevních postupů zaměřených na tržní plodiny v konvenčních zemědělských systémech. Avšak v ekologických systémech hospodaření mají stále své místo, neboť přispívají nejen k výrobě objemných krmiv, ale také působí jako efektivní přerušovače osevních sledů, což má významný účinek na regulaci zaplevelení a fytosanitaci (Brant 2008).

3.8.2 Vliv pěstování meziplodin na půdu

3.8.2.1 Organické hnojení

Zeleným hnojením rozumíme zaorávání zelených rostlin (celých nebo jen jejich částí) za účelem zvýšit obsah organických látek a zásobu půdních živin. Patří k nejefektivnějším způsobům náhrady organických látek do půdy a jeho význam je především v podmínkách s nízkou produkcí statkových hnojiv. V půdě upravuje poměr C:N a při užší specializaci rostlinné výroby (např. vysokém podílu obilovin) minimalizuje negativa vyplývající z nedodržování osevních postupů.

Meziplodiny umí efektivně zabudovávat přebytečné živiny z půdy do rostlinných pletiv. Takto zabudované živiny jsou poté postupně uvolňovány při rozkladu organické hmoty po skončení jejich vegetační doby.

Wanic et al. (2018) uvádí, že množství dusíku fixovaného meziplodinami se liší napříč jejich druhy a je určeno biologickou schopností fixace dusíku, objemem biomasy, datem výsevu, dostupností dusíku v půdě a stanovištních podmínkách. Za nejprůzračnějších klimatických podmínek meziplodiny nahromadily 50–100 kg dusíku (v některých studiích až 200 kg N), 7–10 kg fosforu a 40–60 kg draslíku na hektar.

Dle Wanic et al. (2018) však meziplodiny nejsou příliš účinným hnojivem na půdách chudých na živiny, jelikož nedosahují vysokých výnosů biomasy.

FAO (2009) zmiňuje, že meziplodiny, podsevné luskoviny a střídání plodin s hlubokým a mělkým kořenovým systémem poskytují další přístupy ke zvýšení produktivity a účinnosti živin prostřednictvím řízení zdrojů dusíku. Potřebný dusík lze dodávat pomocí symbiotické i nesymbiotické fixace dusíku. Pro zlepšení využívání vodních zdrojů a půdního fosforu doporučuje FAO podporovat symbiotickou mykorhizu.

Díky použití intenzivních vstupů, jako jsou dusíkatá hnojiva a syntetické pesticidy, se produktivita plodin výrazně zvýšila. Avšak pouze 17 % ze 100 milionů tun dusíku vyprodukovaných a aplikovaných v roce 2005 bylo skutečně využito plodinami. Ostatní byl vyloučen do životního prostředí.

Mezi lety 1960 a 2000 došlo ke snížení účinnosti spotřeby dusíku pro produkci obilovin z 80 na 30 procent. Vysoká koncentrace reaktivního dusíku (NH_4 , NO_3) v půdách může přispívat k emisím oxidů dusíku, což představuje hlavní zdroj zemědělských emisí. Dusíkem jsou ohroženy i vodní toky, kde dochází k eutrofizaci povrchových vod. Účinnost využívání hnojiv klesá s růstem jejich použitím, neboť velká část aplikovaného hnojiva není absorbována rostlinami, ale místo toho je vypouštěna do vodních toků a do atmosféry. Emise skleníkových plynů v ekvivalentu CO_2 z výroby a aplikace dusíkatých hnojiv z fosilních paliv dosáhly 750 až 1 080 milionů tun (FAO 2009).

Globální potenciál dostupnosti dusíku prostřednictvím recyklace a jeho fixace je však mnohem větší než současná produkce syntetického dusíku.

Konvenční podniky s rostlinnou výrobou na orné půdě se stávají závislými na vstupu syntetických dusíkatých hnojiv, zatímco statková hnojiva z chovů hospodářských zvířat se stávají environmentálním problémem.

Koncept buď smíšených farem nebo úzké spolupráce mezi živočišnou a rostlinnou výrobou je běžnou praxí většiny forem udržitelného zemědělství, zejména ekologického. Taková změna i pro konvenční zemědělství by mohla významně přispět ke zmírnění dopadů zemědělství na klimatickou změnu (FAO 2009).

Tabulka 1 Roční bilance dusíku (FAO 2009)

Dusík získaný z průmyslové výroby (procesem Haber-Boschovy fixace dusíku využitím spalováním fosilních paliv).	90-100 Mt dusíku ročně
Potenciální produkce dusíku bobovitými meziplojinami (bez konkurenční tržní plodiny).	140 Mt dusíku ročně
Dusík z trusu hospodářských zvířat	160 Mt dusíku ročně

3.8.2.2 Omezení eroze půdy

Mimo přínos biomasy do půdy mají meziplojiny funkci protierozní, dále mění albedo povrchu země a vodní režim půdy. Badalíková (2019) zmiňuje, že pokud jsou meziplojiny včas zasety a nárůst biomasy je dostatečný, spolehlivě ochrání povrch půdy před erozí. Je potřeba vybrat vhodnou meziplojinu pro danou oblast ať už vymrzající nebo nevymrzající, která bezpečně chrání povrch půdy až do setí hlavní plodiny. Vhodnost využití meziplojin jako půdoochranného systému se osvědčila pro svůj ochranný efekt pokrytí půdy listovou plochou a během zimy vymrzlými rostlinnými zbytky, přičemž se významně ovlivňuje vodní režim půdy znamenající velký přínos z hlediska protierozní ochrany.

Badalíková a Hrubý v letech 2006–2008 uskutečnili pokus na půdní erozi vodou. Pokusná lokalita se nacházela v řepařské výrobní oblasti s nadmořskou výškou 246 m s dlouhodobým průměrným úhrnem srážek 500 mm, průměrnou roční teplotu 8,4 °C. Sklon

svahu byl určen na 10–12 %. Zde byly založeny 3 sledované varianty s použitím dvou netradičních meziplodin.

1. varianta s meziplodinou žito svatojánské – trsnaté) – nevymrzající meziplodina
2. varianta s meziplodinou sléz krmný – vymrzající meziplodina
3. varianta kontrolní bez osetí meziplodinou

V případě nevymrzajícího žita byla plodina na jaře desikována. Sléz krmný přirozeně vymrznul přes zimu. Ve všech variantách byla na jaře zasetá kukuřice po spádnici svahu a od začátku vegetace byl sledován smyv půdy. Následný smyv byl podroben rozboru živin. Z každé varianty a ve smyté půdě bylo zjištěno množství živin, včetně humusu a vlhkost půdy. Během dvouletého sledování funkce meziplodin v protierozní ochraně povrchu půdy bylo zjištěno, že nejvyšší smyv půdy vlivem eroze během dvou let byl zjištěn u varianty kontrolní, která byla bez pokryvu půdního povrchu. Celkem za dva roky zde ubylo $2,25 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ půdy. U varianty s meziplodinou žito svatojánské-trsnaté byl zjištěn smyv půdy pouze v roce 2006 koncem srpna v celkovém množství $0,12 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. U varianty s meziplodinou sléz krmný také pouze v roce 2006, a to dvakrát v červnu a srpnu, celkem $1,14 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Podle analýzy variance byly zjištěny průkazné rozdíly ve smyvu půdy mezi variantami 1 x 2 a 1 x 3, což potvrzuje, že nejlepší ochranu proti vodní erozi splňuje varianta se svatojánským žitem desikovaným na jaře. Zbytky organické hmoty této meziplodiny nejlépe pokrývá povrch půdy od zasetí kukuřice po její plné zapojení.

3.8.2.3 Vliv na omezení zhutnění půdy

Pěstování meziplodin je vnímáno jako faktor přispívající k omezení zhutnění půdy. Některé studie poukazují na skutečnost, že utužení spodní vrstvy půdy od šedesátých do devadesátých let minulého století narůstalo. Poté s intenzivnějším nástupem bezorebného zpracování půdy, s obnovením pěstování meziplodin a se změnou konstrukce pneumatik došlo v období let 1990–2003 k poklesu utužení půdy v podorniči na hodnoty stanovené v šedesátých letech (Brant 2019).

3.8.2.4 Vliv kořenů

Kořeny mají nezanedbatelný mechanický vliv na stabilizaci půdy a prevenci eroze. Kořenový systém je v půdě výrazně modifikován abiotickými a biotickými faktory, které jsou ovlivněny antropogenním působením při agrotechnických operacích. Hudek et al. (2021) uvádí, že celková délka kořene a plocha kořenového povrchu dobře koreluje se stabilitou agregátu a makroporozitou půdy. Nejen délka a plocha, ale i rozdíly v morfologii kořenů mezi různými druhy krycích plodin zdůrazňují funkční rozdíly, které plodiny poskytují při zmírňování degradace půdy.

Kemper et al. (2020) rozlišují meziplodiny podle kořenění na:

- S kořeny rozmístěné především v orničním profilu s širokými průměry, např. luštěniny jako vikev, bob obecný, jetel egyptský
- S kořeny rozmístěné především v orničním profilu s velmi hustým kořenovým systémem a mnoha jemnými kořeny, např. žito, pohanka

- S hustými kořeny s vysoce rozvětvenými hustými kořenovými systémy: např. ředkev olejná, svazenka vratičolistá
- S primárními kořeny nízko rozvětvenými, jako je len setý a oves

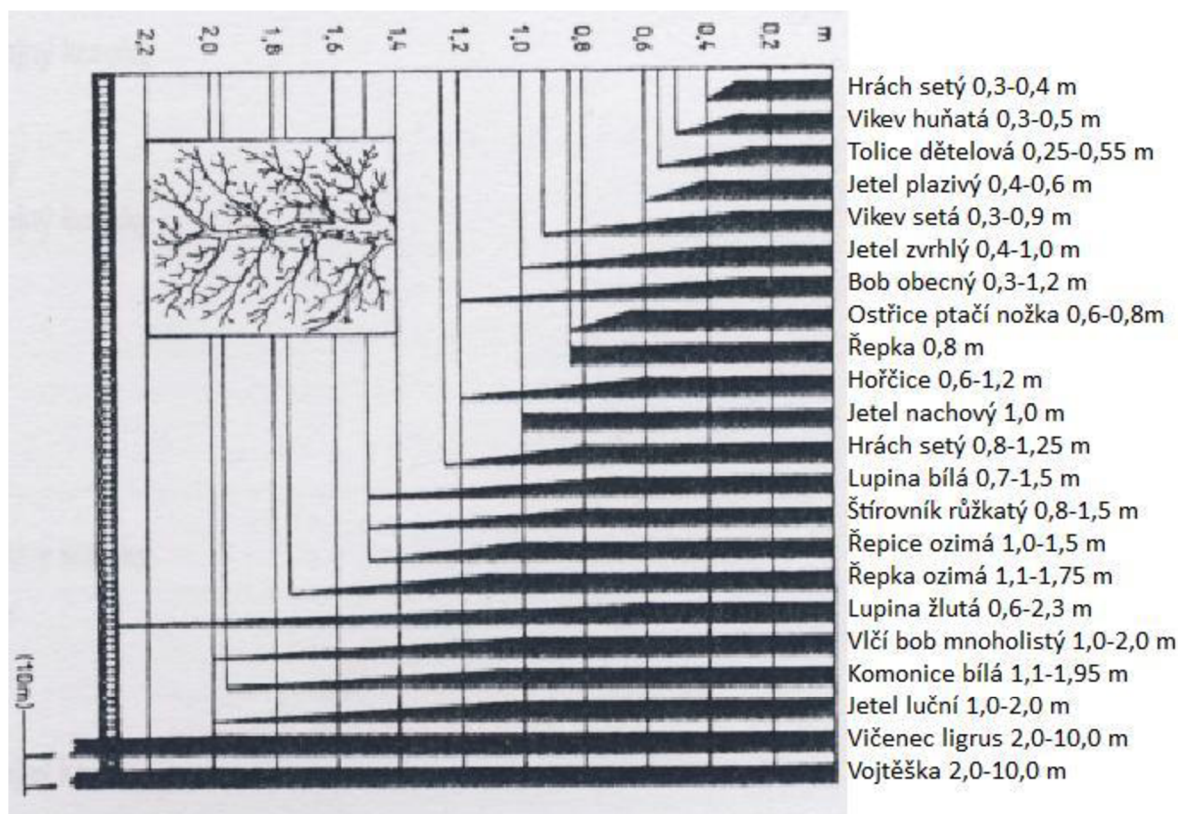


Obrázek 10 Architektura kořenů vybraných meziplodin. Zleva jde o svazenku, žito, vikev, oves, hořčici, pohanku a ředkev na posledních dvou snímcích (Hudek et al. 2020).

Dle Kempera et al. (2020) je pro půdu nejpříznivější kombinovat krycí plodiny s intenzivním zakořeňováním v orničním horizontu s krycími plodinami s křovými kořeny využívajícími biopóry.

Při zjišťování vlivu meziplodin na stabilitu půdních agregátů v ornici, Hudek et al. (2021) zjistili, že největší zvýšení stability agregátů dosáhla půda s pohankou a pšenicí. Nejmenší stabilitu poskytla vikev. Agregáty v ornici (0–15 cm) pro hořčici, žito, oves a pohanku byly stabilnější než v případě vikle, svazenky, ředkvičky a kontrolní holé půdy. Stabilita agregátu rostla s délkou kořene.

Průměr kořene negativně koreloval s makroporozitou půdy, což značí, že krycí plodiny s jemným kořenovým systémem jsou pro vytvoření pórového prostoru výhodnější než ty s tlustšími kořeny. Výběr krycích plodin se správnými kořenovými vlastnostmi je proto zásadní pro zlepšení zdraví půdy (Hudek et al. 2021).



Obrázek 11 Délka kořenů u meziplodin (Fecenko a Ložek 2000)

3.8.2.5 Regulace plevelů a škůdců

Výskyt plevelů na stanovišti určují povětrnostní podmínky, množství klíčivých semen plevelů v půdě, samotný druh meziplodiny, rychlost vývoje porostů meziplodin a jejich následná dominance, adaptabilita meziplodiny na sníženou dostupnost vody a způsob zpracování půdy. Plevelné spektrum také určuje termín založení porostu v průběhu vegetace. V ozimých plodinách tedy půjde o ozimé plevele, v plodinách vysévaných brzy na jaře časně jarní druhy a v širokořádkových plodinách pozdně jarní plevele (Brant 2008).

Dle Vacha (2009) jsou meziplodiny na zelené hnojení jsou nezbytnou součástí systému ochrany rostlin proti plevelům, omezují také rozvoj chorob i škůdců. Výrazně omezují zaplevelení zejména v mezporostním období tím, že konkurují plevelným rostlinám a zesilují tak účinky eventuálních aplikací herbicidů. Pravidelné zařazení strniskových meziplodin ve vhodně zvoleném osevním sledu tak umožňuje i v intenzivních oblastech rostlinné výroby značně omezit použití pesticidů. Z hlediska ochrany půdy se udržováním dostatečně hustého a souvislého rostlinného krytu omezuje neproduktivní výpar a nezanedbatelné jsou i fyto-sanitární účinky některých meziplodin na půdu.

3.8.2.6 Podpora biodiverzity a bezobratlých

Významný pozitivní vliv mají meziplodiny na biodiverzitu na orné půdě. Její nezanedbatelnou součástí jsou bezobratlí živočichové, kteří v agroekosystému plní celou řadu

ekologických funkcí. Meziplodiny, které jsou ponechány na pozemku až do doby jejich kvetení, stávají se významným zdrojem potravy pro opylovače a další druhy bezobratlých, kteří se živí pyllem a nektarem. Zde je potřeba připomenout, že většina pěstovaných plodin (co do osevní plochy) pro tyto organismy v podstatě žádnou potravu nenabízí (obilniny, cukrová řepa, většina druhů zeleniny, pomineme-li možnost sběru medovice z porostů napadených mšicemi) a jejich porosty pro ně představují značně nepříznivé prostředí. Zde je pro přežívání těchto druhů významný především výskyt plevelů, které kvetou velkou část vegetace a stávají se tak pro opylovače zdrojem potravy. Výskyt plevelů v porostech je však cíleně omezován a setkáváme se i s porosty téměř bezplevelnými. Kvetoucí meziplodiny tak představují velmi atraktivní a hojně využívaný zdroj potravy v zemědělské krajině.

Obrovskou výhodou meziplodin je to, že mohou začít kvést velmi brzy po začátku vegetace (časné ozimé druhy) a díky postupným výsevům kvetou až do jejího konce. U později zakládaných porostů, které ale ještě stihnou vykvést, je kvetení přirozeně ukončeno v podstatě až příchodem silnějších mrazů. Vhodným naplánováním druhové skladby pěstovaných meziplodin a termínů zakládání jejich porostů mohou tyto druhy poskytovat potravu pro opylovače a další druhy, živící se nektarem a pyllem, prakticky po celé vegetační období.

rostlinný druh	měsíc																			
	IV.			V.			VI.			VII.			VIII.			IX.			X.	
řepice ozimá	■	■	■	■																
řepka ozimá			■	■	■	■	■													
hořčice bílá					■	■	■	■	■											
ředkev olejná						■	■	■	■	■	■									
lnička setá						■	■	■												
hořčice polní				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ředkev ohnice					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Obrázek 12 Doba kvetení vybraných brukvovitých meziplodin (Brant et al. 2022).

Kvetoucí porosty meziplodin jsou vyhledávány celou řadou druhů hmyzu. Jsou atraktivní jak pro včelu medonosnou, tak i pro celou řadu samotářských včel. Velká část druhů opylovačů sbírá nektar či pyl z celé řady rostlin patřících do různých čeledí.

Půdní bezobratlí, stejně jako ostatní zástupci půdní bioty, reagují na pěstování meziplodin převážně pozitivně. Již během růstu vytvářejí v půdě příznivé mikroklima, půdu prokypřují, jejich kořenové výměšky slouží za potravu bakteriím, kterými se živí další půdní organismy, některé druhy se pak živí přímo jejich kořeny. Po ukončení vegetace se pak celá jejich biomasa stává potravou půdních organismů, ať již jsou přímo zapraveny do půdy, nebo ponechány na povrchu jako mulč. Vzhledem k tomu, že meziplodiny jsou do půdy zapravovány v relativně raných vývojových fázích, nejsou dřevnaté, mají velmi příznivý poměr C:N a pro půdní organismy představují kvalitní a snadno dostupný zdroj živin a energie (Brant et al. 2022).

3.8.3 Potenciál meziplodin k sekvestraci uhlíku

Dle slov Branta (2008) je hledání vztahu mezi pěstováním meziplodin a změnami obsahu CO₂ v půdě, či dokonce stanovení jejich vlivu na podporu nebo eliminaci těchto změn velice problematické. Na následujících řádcích proto byly přiblíženy aktuální poznatky o vlivu meziplodin na míru sekvestrace uhlíku do půdy.

V letech 2016-2018 proběhla studie v Polsku zaměřená na vliv meziplodin na sekvestraci uhlíku se zohledněním hlavní plodiny provedená Kwiatkowskim et al. Pokus probíhal na sprašové půdě s 18 hlavními plodinami a 14 druhy meziplodin. Pěstovanými meziplodinami byly porosty monokultur a různých směsí. Nejčastější zastoupené druhy byly hořčice bílá, řepka olejná, svazenka vratičolistá, jetel luční, serradella, jílek mnohokvětý a hrách setý. Výsledek sekvestrovaného uhlíku byl zprůměrován ze všech vzorků.

Ve studii byly všechny zkoumané druhy pěstovány v rámci konvenčního zemědělského systému, kde probíhalo zpracování půdy v běžném režimu. Hnojení a ochrana rostlin byly aplikovány podle doporučených dat a dávek specifických pro každý druh. Výzkum probíhal nedaleko města Lubin v Polsku, necelých 100 km od hranic s ČR, tedy s podobnými klimatickými podmínkami jako jsou v České republice.

Tabulka 2 Srovnání sekvestrace CO₂ meziplodinami k různým skupinám hlavních plodin (Kwiatkowski et al. 2020).

	CO₂ sekvestrovaný hlavní plodinou (t.ha⁻¹.rok⁻¹)	CO₂ sekvestrovaný meziplodinou (t.ha⁻¹.rok⁻¹)	Celkový CO₂ sekvestrovaný hlavní plodinou a meziplodinou (t.ha⁻¹.rok⁻¹)	Procentické zastoupení celkového CO₂ sekvestrovaného meziplodinou (%)
Obilniny (ozimá pšenice, jarní pšenice, jarní ječmen, ozimé žito, ozimé triticales, oves setý, kukuřice setá, proso seté, pohanka obecná, laskavec)	13,08	5,36	18,44	29,06
Olejniny (ozimá řepka, sója luštinatá)	11,80	5,36	17,16	31,23
Kořenová zelenina (lilek brambor, cukrová řepa, mrkev obecná)	65,13	5,36	70,49	7,60

Bobovité plodiny (čočka kuchyňská, lupina úzkolistá)	7,85	5,36	13,21	40,57
---	------	------	-------	-------

Jako komentář k výsledkům studie sami autoři uvádějí, že pěstování meziplodin v následujícím střídání plodin: obiloviny - meziplodiny - obiloviny umožňuje dosáhnout přibližně o 30 % vyšší sekvestrace CO₂ za rok ve srovnání s pěstováním obilovin bez meziplodin. Míra sekvestrace také nejvíce koreluje s množstvím celkové biomasy, která vyrostla v daném období. Relativně vysokého nárůstu půdní organické hmoty zde dosáhla kořenová zelenina, olejnin a obilniny.

Kaye a Quemada (2017) v souhrnné studii tvrdí, že existuje mnoho důkazů o tom, že pěstování krycích plodin zvyšuje sekvestraci uhlíku v půdě. Toto zvýšení odhalují jak modely, tak metaanalýzy polních studií. Mezi jednotlivými lokalitami však existuje značná variabilita a zdá se, že vliv pěstování krycích plodin na organický uhlík v půdě se zvyšuje při sníženém obdělávání půdy, komplexním střídání plodin a vysokých vstupech dusíku. Na experimentálních lokalitách ve Španělsku byla míra sekvestrace uhlíku o 24 g.m⁻².rok⁻¹ vyšší u krycích plodin než u kontrolního ošetření. Nízká sekvestrace uhlíku je typická pro teplejší podnebí v důsledku rychlé mineralizace.

Dále zmiňují, že rozšířené přijetí krycích plodin by mělo za následek míru sekvestrace uhlíku v půdě 0,24 Gt.rok⁻¹ v horních 30 cm nebo 12 Gt během příštích 50 let. To dělá z krycí plodiny jednu z nejslibnějších strategií prevence a odvrácení degradace půdy, protože uhlík je hlavní složkou organické hmoty, tedy nejdůležitějšího ukazatele kvality půdy. Tento názor nyní dosáhl všeobecného uznání a mnohé vlády začaly rozdělovat uhlíkové kredity (Kaye & Quemada 2017).

Smith et al. (2007) předpokládá, že 25 % globálních ploch orné půdy, nebo 4 miliony km² by mohly být potenciálně pokryty meziplodinami. Tato hodnota je založena na údajích, které ukazují, že polovina zemědělské půdy již osázená ozimými obilovinami (není tedy k dispozici pro krycí plodiny) a předpoklad, že další čtvrtina nemusí být pokryta plodinami kvůli jiným omezením (např. nízké teploty, nízká dostupnost vody). Pokud by byla tato úroveň přijetí realizována, krycí plodiny by mohly zmírnit emise 0,6 Gt CO₂ rok. To představuje asi 10 % z 5 až 6 Gt CO₂.rok⁻¹, které podle odhadů IPCC pocházejí ze zemědělství.

Při srovnání vlivu plodin víceletých a jednoletých na sekvestraci uhlíku Mikhailovova et al. (2000) prováděli vzorkování půdy až do hloubky 2 m. Zde bylo porovnáno pole jednoletých plodin jako je kukuřice, cukrová řepa a sója a víceletou vegetací trvalých travních porostů. Bylo zjištěno, že louky vykazovaly větší množství půdního organického uhlíku než každoročně obdělávané pole.

Studie Jiana et al. (2020) zdůrazňuje poznatky, že větší vliv na sekvestraci uhlíku mají rostliny čeledi lipnicovitých, tedy žito seté, jilek mnohokvětý než čeleď bobovitých, jmenovitě vikve a vigna čínská. Je tomu tak kvůli nízkému poměru C:N u bobovitých plodin. Částečně

zde hraje roli jejich schopností vázat atmosférický dusík, zatímco travní meziplodiny mají často vyšší biomasu, ale také vyšší poměr C:N.

Z porovnání 131 studií bylo zjištěno, že krycí plodiny způsobily zvýšení půdního organického uhlíku o 15,5 %, (v 95 % případů šlo o zvýšení o 13,8-17,3 %) v půdách v blízkosti povrchu (tj. v hloubce ≤ 30 cm). V této hloubce tedy zařazení krycích plodin do osevních postupů má potenciál zvyšovat půdní organický uhlík (Jian et al. 2020).

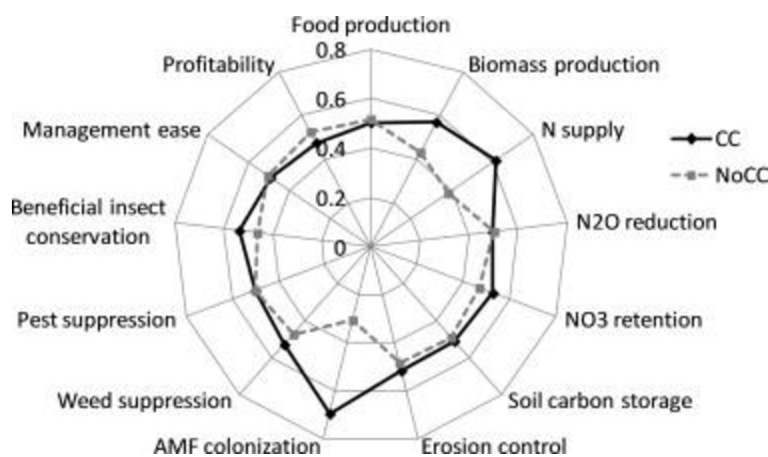
N'Dayegamiye a Tran (2001) prokázali, že meziplodiny (jetel, proso, pohanka, řepka a hořčice) významně zvýšily celkový obsah C a N v půdě (převážně proso a řepka), ale neovlivnily obsah C a N v těžkých frakcích organické hmoty. Ve výzkumu Pałyse et al. (2009), serradela, jetel luční, jetel plazivý a jetel ladní také přispěly k výraznému zvýšení obsahu uhlíku v půdě. Zmíněné meziplodiny však nevedly ke změnám chemických vlastností půdy ve tříletém pokusu (Eichler-Löbermann et al. 2008), čtyřletém (Wanic et al. 2013) a osmiletém pokusu. experiment (Debosz et al. 1999). To ukazuje, že meziplodiny mají nízký objem biomasy a jsou rychle mineralizované (Wanic et al. 2013). Ve švédské modelové studii Blombäcké et al. (2003) zvýšily meziplodiny pěstované po dobu 6 let obsah organické hmoty v půdě o necelé 2 %.

Opačný pohled na meziplodiny mají Chaplot a Smith (2023). Dle nich na základě šesti pokusů splňujících nejzákladnější požadavky pro dosažení spolehlivých závěrů nevedly krycí plodiny k významnému nárůstu zásob uhlíku. Nízká účinnost krycích plodin potvrzuje, že významně rostoucí vstupy uhlíku do půdy, například přidáním krycích plodin do pěstebních systémů, se nemusí nutně promítnout do většího ukládání uhlíku v půdě. Čerstvý přísun uhlíku do půdy může stimulovat rozklad staré a stabilní půdní organické hmoty prostřednictvím bakterií, aby získaly klíčové živiny pro svůj metabolismus. Studie Constantina et al. 2010 ukazuje, že významnou míru sekvestrace uhlíku může poskytnout použití krycích plodin v prostředí bohatém na živiny a přidáním čerstvého organického materiálu.

Nedostatek živin, jehož původ v orné půdě je pravděpodobně způsoben ohromným množstvím živin exportovaných obilím a dalšími zemědělskými produkty a potřebou živin dekompozitory, která není zohledněna v programech hnojení, vede k nízké míře humifikace a destrukci organické hmoty. Je třeba více pracovat na zkoumání obojího, tedy zvýšení přísunu uhlíku a živin zemědělskými postupy do půdy za účelem zvýšení jejich dlouhodobých zásob pro udržitelné zemědělství a řadu dalších environmentálních přínosů. Zároveň je třeba vyvážit dopad na klimatickou změnu a další environmentální rizika přidávání dalších živin do půdy (Chaplot & Smith 2023).

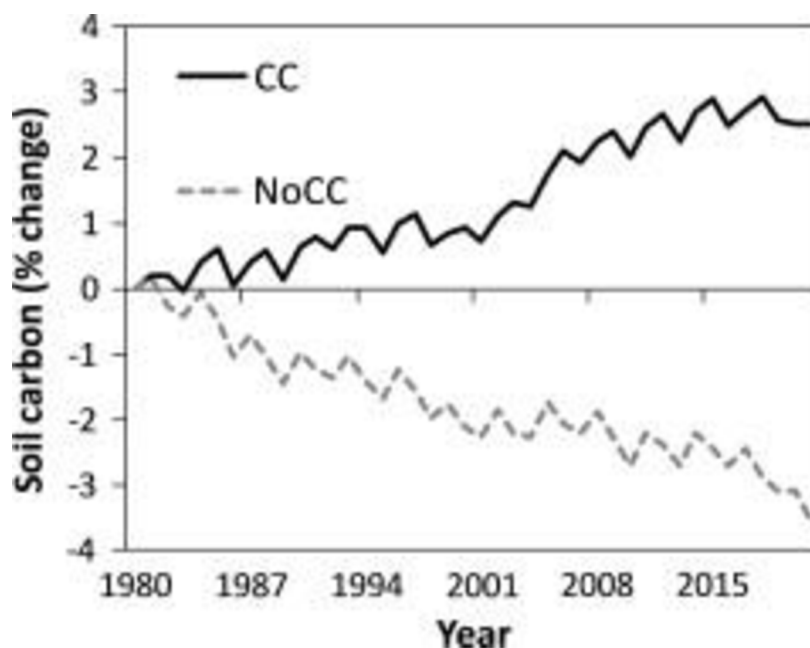
Na celkový vliv meziplodin na ekosystém se zaměřili Schipanski et al. (2014). Na následujícím grafu č. 13 zachytili, jak se liší 13 ekosystémových ukazatelů na tříletém pokusu pěstování meziplodin v obilném osevním postupu oproti kontrolnímu vzorku bez meziplodin. Plnou čarou jsou znázorněny hodnoty s meziplodinami (cover crops), přerušovanou čarou potom vzorek bez meziplodin (no cover crops).

Z grafu je také vyplývá, že některé hodnoty výrazně stouply, jako je zásoba dusíku, produkce biomasy a kolonizace arboskulárně-mycorhizními houbami. Mírně však klesla hodnota rentability.



Obrázek 13 Graf vlivu pěstování meziplodin na ekosystémové ukazatele (Schipanski et al. 2014).

Pro bližší zaměření na hodnoty uhlíku v půdě byl vymodelován graf za více než 30 let pěstování meziplodin a procentickém navýšení obsahu uhlíku v půdě. Zde je vidět, že při pěstování meziplodin je potenciál navýšení organického uhlíku oproti nepěstování časem více než 7 %.



Obrázek 14 Graf vlivu pěstování meziplodin oproti vzorku bez meziplodin (Schipanski et al. 2014).

4 Závěr

Hlavní vizí této bakalářské práce bylo prozkoumat řešení zmírnění klimatických změn pomocí meziplodin. Po zjištění nových poznatků o pěstování meziplodin se práce také věnuje celkovému pojetí vlivu jejich pěstování na agroekosystémy a životní prostředí.

Zatím není snadné přesně říci jakou mírou se meziplodiny podílejí na odebrání uhlíku z atmosféry, jelikož půda v interakcích s atmosférou má mnoho činitelů a proměnných. Na míru sekvestrace uhlíku má nepochybně vliv agrotechnika a zemědělská činnost, ale stejně tak se podílí vliv klimatu a půdního typu. Pro přesná čísla míry sekvestrace bude třeba více detailnějších studií na různých typech půd. Zatím bylo zjištěno, že výběr meziplodiny pro daný půdní typ a klima může ovlivnit míru sekvestrace i celkový pozitivní vliv na půdu. Je to především z důvodu stavby kořenového systému, jeho mohutnosti a rozvětvení. V orničním horizontu se zvyšuje obsah organické hmoty při zařazení meziplodin do osevního postupu, ale není jasné zda nejde jen o relokaci uhlíku skrz celým půdním profilem.

Zejména ekologické zemědělství se v mnoha studiích ukázalo jako vhodné pro pohlcení i udržení uhlíku v půdě. Velmi diskutované jsou pak bobovité plodiny, které ukazují odlišné výsledky míry sekvestrace napříč studiemi. Při srovnání s čeledí lipnicovitých byly výsledky bobovitých výrazně lepší i horší. Jako jednoznačně prospěšné se ukázaly trávy, především zkoumané byli jílek mnohokvětý a žito seté. Díky jejich jemně větvenému kořenovému systému vznikají po kořenovém rozkladu půdní makropóry. Také jsou zde lepší podmínky pro rozklad na stabilnější humusové materiály. Dle jiných názorů je pro zvyšování půdní organické hmoty nejpriznivější kombinovat krycí plodiny s intenzivním zakořeňováním v orničním horizontu s krycími plodinami s křovými kořeny využívajícími biopóry. Sekvestrace se na určitém typu půdy a klimatu může pohybovat od 100 – 150 g CO₂ m⁻².rok⁻¹, což je více než hodnoty při přechodu na bezorebné zemědělství. Vliv meziplodin na zvyšování uhlíku v půdě se výrazněji ukázal v pokusech, které trvaly více let. Zatímco hodnoty z tříletých pokusů byly téměř neznamatelné, po šesti letech byl rozdíl obsahu organické hmoty 2 %. Po třiceti letech by se tato hodnota mohla lišit až o 7 % oproti hospodaření bez meziplodin.

Hospodaření s krycími plodinami tedy nutně nebude mít zásadní vliv na zmírnění klimatické změny, ale ekosystém bude díky nim odolnější vůči jejím projevům.

5 Literatura

- Al-Kaisi M et al. 2014. Soil microaggregate and macroaggregate decay over time. *Journal of Soil and Water Conservation* 69.
- Arnell A et al. 2019. Framing and Context. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. IPCC, Ženeva
- Bai X et al. 2019. Responses of soil carbon sequestration to climate-smart agriculture practices: A Meta Analysis. *Global Change Biology* 25: 2591-2606.
- Balík J. 2009. Význam rhizosféry v životním prostředí. Výzkumný ústav rostlinné výroby. Ruzyně.
- Barber D, Martin J K. 1976. The release of organic substances by cereal roots into soil. *New Phytologist*: 76: 69-80.
- Blomback K et al. 2003. Simulations of soil carbon and nitrogen dynamics during seven years in a catch crop experiment. *Agricultural Systems* 76: 95-114.
- Bohn H L, 1976. Estimate of organic carbon in world soils. *Soil Science Society of America Journal* 40: 468-470.
- Brant V et al. 2008. *Meziplodiny*. Kurent s r. o., České Budějovice.
- Brant V et al. 2019. *Pomocné plodiny v pěstebních systémech polních plodin*. Agrární komora České republiky, Praha.
- Brant V et al. 2022. *Brukvovité meziplodiny*. Agrární komora České republiky, Praha.
- Buis A. 2020. Milankovitch (Orbital) Cycles and their role in Earth's climate. *Global climate change Vital signs of the planet*. Available from https://dataho.in/wp-content/uploads/2023/01/Milankovitch_Orbital_Cycles.pdf (accessed November 2023).
- Carter M R, Steward M A. 1995. *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. CRC Press, Boca Raton.
- Cílek V. 2020. Jak kolísá obsah CO₂ za posledních 23 milionů let? *Vesmír* 99: 511.
- Corsi S, Muminjanov H. 2019. *Conservation agriculture*. Food and Agriculture Organisation United Nations, Rome.
- FAO. 2009. *Low greenhouse gas agriculture – mitigation and adaptation potential of sustainable farming systems*. Food and Agriculture Organizations of the United Nations, Rome.
- Fecenko J, Ložek O. 2000. *Výživa a hnojení polních plodin*. Slovenská poľnohospodárska univerzita, Nitra.
- Frouz J, Frouzová J. 2021. *Aplikovaná ekologie*. Univerzita Karlova, Praha.
- Gatusso J P, Hansson L. 2012. *Ocean acidification*. Oxford University Press, New York.

- Graber C. 2014. The Next Green Revolution May Rely on Microbes. Nova Next. Available from <https://www.pbs.org/wgbh/nova/article/more-food-with-microbes/> (accessed February 2024)
- Hudek C et al. 2021. Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties. *European Journal of Soil Science* **73**.
- IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. IPCC, Geneva, Switzerland
- Janoušková M. 2017. Může Arbuskulární Mykorrhiza Pomoci v Zemědělské Produkci? *Živa* **5**: 207-240
- Jastrow J D, Amonette, J E, Bailey V L. 2007. Mechanisms Controlling Soil Carbon Turnover And Their Potential Application For Enhancing Carbon Sequestration. *Climatic Change* **80**: 5–23.
- Jian J et al. 2020. A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping. *Soil Biology and Biochemistry* **143**.
- Johnson N C et al. 2013. Predicting Community And Ecosystem Outcomes Of Mycorrhizal Responses To Global Change. *Ecology Letters* **16**: 140-153.
- Jones D L, Darrah P R. 1993. Re-sorption of organic compounds by roots of *Zea mays* L. and its consequences in the rhizosphere. *Plant and Soil* **153**: 47-59
- Kahnt, G. 1980: Gründung. DLG-Verlag, Frankfurt am Main
- Kaye J, Quemada P. 2017. Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **37**.
- Kwiatkowski C, Harasim E, Pawlowski L. 2020. Can catch crops be an important factor in carbon dioxide sequestration? *International Journal of Conservation Science* **11**: 1005-1018.
- 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.
- Liang A Z et al. 2009. Short-term Impacts of No-tillage on Soil Organic Carbon Associated With Water-stable Aggregates in Black Soil of Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica* **42**: 2801–2808.
- Luo Z et al. 2010. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **139**: 224–231.
- Lynch J M, Wipps J M. 1990. Substrate Flow in the Rhizosphere. *Plant Soil* **129**: 1-10.
- Malhi G S et al. 2021. Impact of Climate Change on Agriculture and Its Mitigation Strategies: A Review. *Sustainability* **13**: 1318.
- Mayerová M et al. 2022. Metody a Agrotechnické Postupy Vedoucí ke Zvýšení Stability Půdních Agregátů. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. Praha – Ruzyně

- Mendelu. 2024. Organická Hnojiva Ostatní. Available from https://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=1555&typ=html (accessed March 2024).
- Mendelu. 2024. Pícninářství. Available from https://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=6804&typ=html (accessed March 2024).
- Ministerstvo zemědělství. 2023. Agroenvironmentálně-klimatická opatření. Available from <https://eagri.cz/public/portal/mze/dotace/szp-pro-obdobi-2021-2027/rozvoj-venkova/agroenvironmentalne-klimaticka-opatreni/agroenvironmentalne-klimaticka-opatreni/agroenvironmentalne-klimaticka-opatreni> (accessed March 2024).
- Ministerstvo zemědělství. 2017. Adaptace zemědělství na změny klimatu v podmínkách ČR souhrn aktuálních informací Ministerstvo zemědělství, Praha.
- Příbyla O. et al. 2020. Atlas klimatické změny. Změny v atmosféře a rizika oteplování. Lipka – školské zařízení pro environmentální vzdělávání Brno.
- Rada Evropské unie. 2023. Evropská rada. Rada Evropské unie. Available from <https://www.consilium.europa.eu/cs/policies/climate-change/paris-agreement/> (accessed February 2023)
- Rees R M et al. 2005. The Role of Plants and Land Management in Sequestering Soil Carbon in Temperate Arable and Grassland Ecosystems. *Geoderma* **128**: 130-154.
- Ritz K, Young I M. 2000. Tillage, Habitat Space and Function of Soil Microbes. *Soil and Tillage Research* **53**: 201-213.
- Ritz K, Young I M. 2004. Interactions Between Soil Structure and Fungi. *Mycologist* **18**: 52-59.
- Schipanski M E et al. 2014. A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. *Agricultural Systems* **125**: 12-22.
- Schlesinger W H, Bernhardt E S. 2020. Biogeochemistry an analysis of global change. Academic Press. Cambridge, Massachusetts.
- Schmidhuber J, Tubinello F N, 2007. Global food security under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**: 19703–19708.
- Schnitzer M, Khan S U. 1978. Soil organic matter. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- 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.
- Šimek M (ed.). 2019. Živá půda. Academia, Praha.
- Šimek M et al. 2020. Živá půda 1. Kdo v půdě žije? *Živa* **1**: 27.
- Šimek M et al. 2021. Živá půda praktický manuál. Academia, Praha.

- Trofymow J A et al. 1987. Rates of rhizodeposition and ammonium depletion in the rhizosphere of axenic oat roots. *Plant and Soil* **97**: 333-344.
- Trolldenier G, Hecht-Buchholz Ch. 1984. Effect of aeration status of nutrient solution on microorganisms, mucilage and ultrastructure of wheat roots. *Plant and Soil* **80**: 381–390.
- Vach M et al. 2009. Pěstování strniskových meziplodin – Metodika pro praxi. Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha – Ruzyně
- Wanic M et al. 2018. Catch crops and the soil environment: A Review of The Literature. *Journal of Elementology* **24**: 31-45.
- Warembourg F R, Biles G. 1979. Estimation carbon transfers in the plant rhizosphere. *The Soil- Root Interface* **197**: 183-196.

