

**Univerzita Karlova**

**Přírodovědecká fakulta**

Ochrana životního prostředí



**Michaela Štecová**

Vplyv otepľovania na organický uhlík v pôde

Impact of warming on soil organic carbon

Bakalárska práca

Školiteľka: RNDr. Olga Vinduškova, Ph.D.

Praha, 2024

### **Prehlásenie**

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu písala samostatne s využitím uvedenej literatúry a informácií, na ktoré odkazujem. Táto práca ani jej podstatná časť nebola predložená k získaniu iného, alebo rovnakého akademického titulu.

V Prahe dňa 30.4.2024

.....

## **Podakovanie**

Rada by som sa poďakovala mojej vedúcej práci RNDr. Olge Vinduškovej, Ph.D., za jej vedenie, veľmi cenné rady a veľkú podporu, keď ju som potrebovala. Na záver by som taktiež rada poďakovala svojej rodine a priateľom za ich trpezlivosť a podporu.

## **Abstrakt**

Klimatická zmena je hlavnou príčinou zvyšovania globálnej teploty po celom svete. Sekvestrácia uhlíka v terestrických ekosystémoch sa považuje za jeden z hlavných nástrojov na mitigáciu zmeny klímy, avšak súčasné odhady potenciálu sekvestrácie nezahŕňajú vplyvy budúcej klimatickej zmeny. Cieľom tejto práce je zosumarizovať naše súčasné poznatky o reakcii organického uhlíka v pôde na otepľovanie, samostatne, ako aj v kombinácií s ďalšími aspektami klimatickej zmeny. Doplňovým cieľom je porovnať rôzne metódy používané k štúdiu vplyvu otepľovania na pôdu. Zvýšenie teploty spôsobuje významné straty uhlíka z pôdy, avšak v spojení s ďalšími aspektmi klimatických zmien nebol zaznamenaný jednotný vplyv. Výskumy naznačujú, že straty uhlíka závisia od stability pôdných frakcií, pričom otepľovanie vedie k väčšiemu poklesu v časticovej organickej hmote (POM). Kombinácia zvyšovania teploty s rastúcou koncentráciou CO<sub>2</sub> viedla k celkovému prírastku uhlíka v pôde, naopak, v kombinácií so suchom boli zaznamenané straty. Vo výskume vplyvu otepľovania na zásoby uhlíka v pôde je dôležitý výber vhodnej metódy, pretože aktívne metódy umožňujú presnú kontrolu, ale sú nákladné a môžu ovplyvniť pôdnu biotu a naopak pasívne metódy sú lacnejšie, ale vyžadujú viac času. Tieto zistenia zdôrazňujú dôležitosť komplexného výskumu zahŕňajúce kombinácie rôznych aspektov klimatickej zmeny, v rôznych ekosystémoch, zohľadnenie rôznych frakcií pôdy a potrebu dlhodobých štúdií na porozumenie plného rozsahu vplyvu otepľovania na zásoby uhlíka v pôde.

**Kľúčové slová:** pôdna organická hmota, oxid uhličitý, globálne otepľovanie, priming efekt, stabilita, požiar

## **Abstract**

Climate change is the main cause of rising global temperatures around the world. Carbon sequestration in terrestrial ecosystems is considered one of the main tools for climate change mitigation, but current estimates of sequestration potential do not include the impacts of future climate change. The aim of this thesis is to summarize our current knowledge on the response of soil organic carbon to warming, alone as well as in combination with other drivers of climate change. A complementary aim is to compare the different methods used to study the impact of warming on soil carbon. Increased temperature causes significant losses of soil carbon, but no consistent effect has been observed in combination with other aspects of climate change. Research suggests that carbon losses depend on the stability of soil fractions, with warming leading to greater decreases in particulate organic matter (POM). The combination of warming with rising CO<sub>2</sub> concentration has led to an overall increase in soil carbon, although losses have been observed in combination with drought. When studying the effects of warming on soil carbon stocks, selecting the appropriate method is crucial. Active methods offer precise control but are more expensive and can impact soil biota, whereas passive methods are cheaper but require more time. These findings highlight the importance of comprehensive research involving combinations of different climate change aspects, in different ecosystems, accounting for different soil fractions and the need for long-term studies to understand the full extent of the impact of warming on soil carbon stocks.

**Keywords:** soil organic matter, carbon dioxide, global warming, priming effect, stability, fire

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Klimatická zmena</b>	<b>8</b>
2.1	<b>Globálny kolobeh uhlíka</b>	<b>8</b>
2.2	<b>Príčiny klimatickej zmeny</b>	<b>9</b>
2.3	<b>Prejavy klimatickej zmeny</b>	<b>10</b>
2.3.1	Zmeny teploty	10
2.3.2	Ďalšie prejavy klimatickej zmeny	11
<b>3</b>	<b>Organický uhlík v pôde ako prepad a zdroj uhlíka pre atmosféru</b>	<b>11</b>
3.1.1	Pôdna organická hmota	12
3.1.2	Proces ukladania uhlíka do pôdy	14
3.1.3	Mechanizmy stabilizácie POH	15
<b>4</b>	<b>Vplyv zmien teploty na uhlík v pôde</b>	<b>16</b>
4.1	<b>Vplyv teploty na vstupy uhlíka do pôdy</b>	<b>16</b>
4.1.1	Priming efekt	17
4.2	<b>Vplyv teploty na straty uhlíka z pôdy</b>	<b>18</b>
4.2.1	Teplotná citlivosť pôdnej respirácie	19
4.3	<b>Vplyv teploty v závislosti na hĺbke</b>	<b>19</b>
4.4	<b>Vplyv teploty v závislosti na stabilite organickej hmoty</b>	<b>21</b>
4.5	<b>Celkový vplyv zmien teploty na uhlík v pôde</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>Metódy výskumu vplyvu otepľovania na uhlík v pôde</b>	<b>26</b>
5.1.1	Pasívne metódy ohrievania pôdy	26
5.1.2	Aktívne metódy ohrievania pôdy	26
5.1.2.1	Ekotrony	27
5.1.2.2	Inkubačné zahrievanie pôdy	28
5.1.3	Metódy s využitím prirodzených gradientov	28
5.1.3.1	Klimatické gradienty	29
5.1.3.2	Geotermálne gradienty	29
5.1.4	Metódy – zhrnutie, porovnania a odporúčanie pre ďalší výskum	30
<b>6</b>	<b>Kombinácia teploty s ďalšími prejavmi klimatickej zmeny</b>	<b>31</b>
6.1.1	Sucho a zvýšenie teploty	31
6.1.2	CO <sub>2</sub> a zvýšenie teploty	33
6.1.3	Požiare a zvyšovanie teploty	34
<b>7</b>	<b>Záver</b>	<b>37</b>
7.1	<b>Vplyv otepľovania na C v pôde</b>	<b>37</b>
7.1.1	Metódy	37
7.2	<b>Kombinácia teploty spolu s ďalšími prejavmi klimatickej zmeny</b>	<b>38</b>
7.2.1	Odporúčanie pre ďalší výskum	38
<b>8</b>	<b>Použitá literatúra</b>	<b>40</b>

# 1 Úvod

Postupujúca zmena klímy, ktorá sa prejavuje najmä zvyšovaním teploty má aj ďalšie prejavy, ako sú vlny horúčav, extrémne suchá, alebo zvýšené riziko požiarov. Suchozemské ekosystémy patria medzi hlavné **pohlcovače uhlíka (C)** a sekvestrácia uhlíka v pôde sa presadzuje ako nástroj na zmiernenie zmeny klímy. **Sekvestrácia** je proces, pri ktorom sa C zachytáva a následne ukladá do pôdy, čím sa odstraňuje z atmosféry. Súčasný odhad jej potenciálu však nezahŕňajú vplyvy budúcich klimatických zmien (Roe et al., 2021). Ak by zvyšovanie teploty spôsobilo, že by pôda bola náchylnejšia na straty C, tieto straty sú schopné ďalej posilniť a urýchliť skleníkový efekt, čo by vyvolalo ďalšie otepľovanie.

Množstvo uhlíka v pôde je určitou bilanciou medzi **vstupmi** a **stratami**. Predpovede očakávajú väčšie vstupy C do pôdy spôsobené zintenzívneným rastom rastlín, ako následok zvýšenej teploty. Avšak akumulácia uhlíka v pôde v dôsledku **priming efektu** nie je nevyhnutne zaručená. Naopak prísunom čerstvej organickej hmoty do pôdy sa poskytuje energický zdroj pre mikroorganizmy, ktoré ho využijú na rozklad nových aj existujúcich organických zložiek. Tento proces spôsobuje zvýšenú aktivitu mikroorganizmov a zrýchlený mikrobiálny rozklad, čo v konečnom dôsledku zvyšuje straty CO<sub>2</sub> z pôdy (Šimek, 2019). Zvyšovanie teploty tak môže celkovo spôsobiť pozitívnu spätnú väzbu na zmenu klímy, pretože aktivuje mikroorganizmy a stimuluje ich mikrobiálny rozklad, čím sa urýchlia straty z pôdy (Davidson & Janssens, 2006).

Stabilizácia pôdnej organickej hmoty, zabezpečuje ochranu pred rozkladom a zabraňuje následným stratám C z pôdy. Značná pozornosť v skúmaní dopadu zvyšujúcej teploty na C je venovaná hlavne trvalo zamokreným pôdam, alebo permafrostu. V oboch týchto prípadoch je dôsledkom anaerobných podmienok podmienená stabilizácia organickej hmoty. Vysušenie, alebo rozmrazovanie podmienené zvyšovaním teploty by však v oboch týchto prípadoch zrýchliło mikrobiálny rozklad (Sim et al., 2021). V mojej práci sa ale zameriavam na nezamrznuté a nezamokrené pôdy, ktoré sú chránené hlavne inými mechanizmami **stabilizácie** (Hartley et al., 2021).

Cieľom tejto práce je zhrnúť naše doterajšie poznatky o vplyve zmien teploty na pôdny organický uhlík samostatne a v kombinácii s inými prejavmi klimatických zmien a formulovať odporúčania pre ďalší výskum. Súvisiacim cieľom je zároveň zhrnúť metódy použité na skúmanie tohto vplyvu. Z dôvodu obsiahlej témy sa moja práca zameriava len na nezamokrené a nezamrznuté pôdy.

## 2 Klimatická zmena

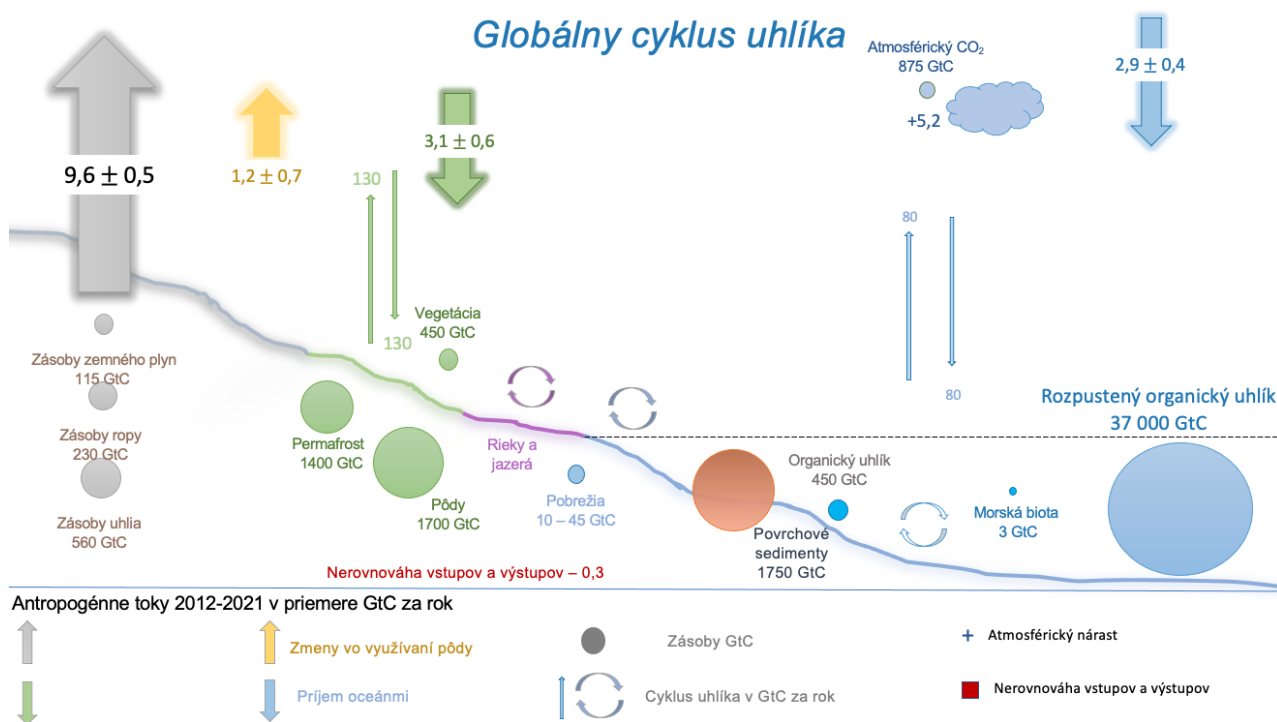
### 2.1 Globálny kolobeh uhlíka

**Uhlík (C)** je základným stavebným prvkom, na ktorého reťazce sú viazané ďalšie biogénne prvky ako kyslík, dusík, vodík a fosfor (Čapek & Šantrůčková, 2016). Je nezameniteľnou súčasťou všetkých organizmov. Hlavnými **rezervoármi** uhlíka sú atmosféra, suchozemská biosféra, oceány a hlavne pôda v ktorej je uloženého trikrát viac uhlíka ako v atmosfére alebo v rastlinách dohromady (Lal, 2004). Tieto pohlcovače sú v neustále meniacej sa rovnováhe medzi **vstupmi** a **stratami**.

Ak v rámci rezervoáru dominujú vstupy C, označuje sa ako **prepad**, ak ale dominujú straty C von, nazývame ho **zdrojom**. Uhlíkový globálny cyklus (Obr. 1) je založený na prenose C medzi suchozemskými ekosystémami, atmosférou a oceánom (Friedlingstein et al., 2022). Hlavnou súčasťou biogeochemického cyklu uhlíka je biologický cyklus, ktorý je pomerne rýchly a ktorý je určovaný rovnováhou medzi dýchaním a fotosyntézou (Moldan, 2015). Zelené rastliny sú najdôležitejšími fotosyntetizujúcimi organizmami. Na pevnine sú najvýznamnejšími zelené rastliny a v oceánoch je to fytoplankton. Oxid uhličitý je pri fotosyntéze viazaný z atmosféry a následne vnikajú organické látky pôsobením slnečného žiarenia. Respirácia sa nachádza na druhej vetve biologického uhlíkového cyklu, ktorá vyrovnáva fotosyntézu. Dýchanie aj fotosyntéza prebieha prostredníctvom sumárnej rovnice na veľmi podobnej báze, avšak v opačnom smere (Moldan, 2015).

Činnosť prirodzeného uhlíkového cyklu je v súčasnosti veľmi narušený dôsledkom **ľudskej** činnosti. Prispievajú k tomu zmeny vo využívaní pôdy, spaľovanie fosílnych palív, horenie ropných produktov, uhlia či zemného plynu, pri ktorých sa uhlík oxiduje na oxid uhličitý a ten uniká do atmosféry vo forme CO<sub>2</sub> (IPCC, 2023). Medzi hlavné prepady C patria terestrické ekosystémy, ktoré sú zároveň s oceánmi schopné zachytiť a pohltiť kvantum emitovaných plynov (Ballantyne et al., 2012). Ekosystémy pohlcujú asi 60% emisií tvorené ľudskou činnosťou (Obr. 1), z toho vyplýva ich dôležitosť a fakt, že ak by prestali tieto prepady fungovať, koncentrácie CO<sub>2</sub> by rástli oveľa rýchlejším tempom. Je ale otázne, aké veľké množstvo oxidu uhličitého bude do budúca možné v týchto rezervoároch **zachytiť** (Moldan, 2015). Pôdy sa pri zvyšujúcej teplote stavajú náchylnejšími na straty uhlíka, čo by len viac posilnilo pozitívnu spätnú väzbu (Davidson & Janssens, 2006). Zvyšujúcou teplotou dochádza k rýchlejšiemu **rozkladu**, čím sa uhlík vo väčšom množstve uvoľňuje do atmosféry, kde zintenzívňuje už prebiehajúci skleníkový efekt (Marek, 2022). Zvyšujúcou teplotou a okysličovaním sa oslabuje zároveň absorpčná schopnosť vrchných vrstiev oceánov pohlcovať plyny, čím sa znižuje jeho schopnosť rozpúšťať CO<sub>2</sub> (Marek, 2022).





**Obrázok 1:** Globálny cyklus uhlíka. Hodnoty uvedené gigatonách (Gt). Obrázok prepracovaný podľa Friedlingstein et al. (2022)

## 2.2 Príčiny klimatickej zmeny

Medzi hlavné príčiny klimatickej zmeny patrí najmä zvyšovanie koncentrácie skleníkových plynov, hlavne oxidu uhličitého (Marek, 2022). V atmosfére jeho koncentrácia aj naďalej stúpa dôsledkom ľudskej činnosti hlavne z emisií spaľovania fosílnych palív (Braniš & Hůnová, 2009). Prítomné sú aj ostatné skleníkové plyny, ako je metán, oxid dusný, či freóny, ktoré sa síce vyskytujú v nižších koncentráciách, ale majú vyššiu účinnosť, a teda prispievajú ku skleníkovému efektu rovnako výrazne (Moldan, 2015). Ich ohrievací potenciál, ktorý je dôležitý hlavne kvôli schopnosti pohlcovať infračervené žiarenie, je výrazne vyšší ako potenciál CO<sub>2</sub> (Braniš & Hůnová, 2009).

**Antropogénna činnosť** je zodpovedná za zmenu klímy vo viacerých smeroch (Marek, 2022). Koncentrácie skleníkových plynov sa v atmosfére menia a **zvyšujú**. Odhaduje sa, že k roku 2019 celosvetové čisté antropogénne emisie zo skleníkových plynov činili  $59 \pm 6,6$  Gt CO<sub>2</sub>, čo je o 12% viac ako v roku 2010 (21 Gt CO<sub>2</sub>) a o 54% viac ako v roku 1990 (IPCC, 2023). Za najväčší podiel v náraste hrubých emisií môže hlavne spaľovanie fosílnych palív a priemyselné procesy (Marek, 2022).

Mení sa aj krajinný pokryv a intenzita dopadajúceho slnečného žiarenia, ktoré majú za následok výkyv energetickej bilancie v klimatickom systéme (Marek, 2022). K ďalším výkyvom prirodzenej rovnováhy prispievajú aj zmeny vo využívaní pôdy ako, odlesňovanie, urbanizácia, či kultivácia ktoré ovplyvňujú už spomínaný cyklus uhlíka. To vedie k posilneniu zdrojových mechanizmov,

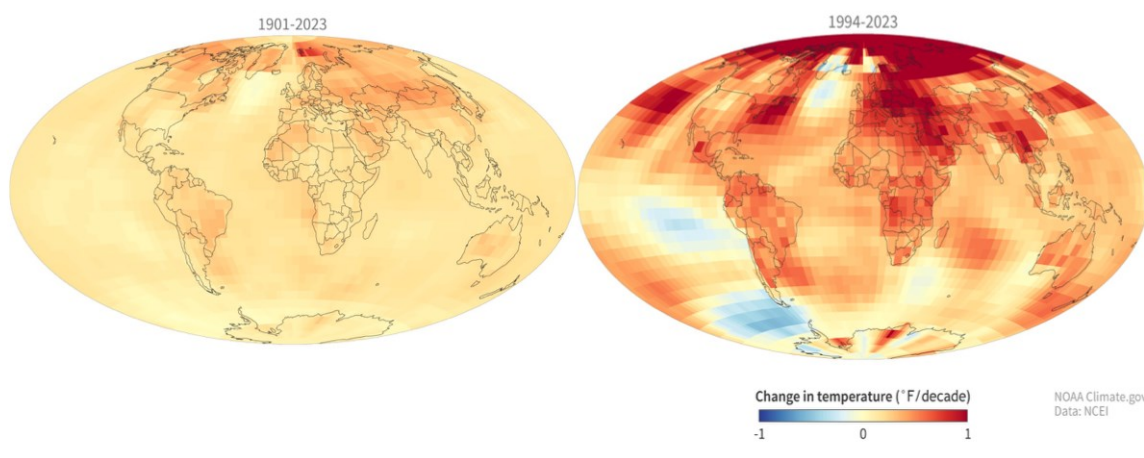
teda k prevahe zdrojov nad prepadmi a ku zvyšovaniu emisií CO<sub>2</sub> do atmosféry (Braniš & Hůnová, 2009).

## 2.3 Prejavy klimatickej zmeny

### 2.3.1 Zmeny teploty

Hlavným a zásadným prejavom klimatickej zmeny je zvyšovanie priemernej **teploty**. V dôsledku nárastu koncentrácií skleníkových plynov tak očakávame nárast priemernej globálnej teploty o 1,5 až 4,5 °C v prípade, že sa koncentrácia CO<sub>2</sub> v atmosfére zdvojnásobí oproti predindustriálnej hodnote 280 ppm (Braniš & Hůnová, 2009). Podľa Medzivládneho panelu pre zmenu klímy sa priemerná teplota z rokov 2011 – 2020 **zvýšila** oproti priemernej teplote z rokov 1850 – 1900 o 1,1 °C a globálne emisie skleníkových plynov sa aj naďalej zvyšujú (IPCC, 2023). A hoci sa zvyšovanie teploty nedá popierať, v niektorých častiach sveta najmä nad oceánmi sa prejavuje skôr klesajúci trend teplôt (Obr. 2). Mnohé štúdie sa zhodli na tom, že sú tieto zmeny pri ktorých je sledovaný pokles teploty spôsobené hlavne dôsledkom oceánskych morských prúdov, cirkuláciou atmosféry albedom, či zmenami vo využívaní pôdy. Práve tieto zmeny patria medzi dôležité hnacie sily viacdekádového ochladzovania (Grose et al., 2017). Klimatická zmena tak neznamená len **trend otepľovania**.

Človek neovplyvňuje klímu len na lokálnej, či regionálnej úrovni (Braniš & Hůnová, 2009). Zvyšujú sa priemerné teploty oceánov a vzduchu, dochádza k rozsiahlemu topeniu ľadovcov a snehu, zároveň sa zvyšuje hladina oceánov, čo spolu s miznúcou a degradujúcou biologickou rozmanitosťou najväčšie ohrozuje životné prostredie (Moldan, 2015).



**Obrázok 2:** Trend otepľovania na svete. Obrázok prevzatý od [www.climate.gov](http://www.climate.gov).

### 2.3.2 Ďalšie prejavy klimatickej zmeny

Oteplenie, ktoré sa nezdá byť tak dramatické, môže mať **trvalé následky** na biosféru i ľudskú činnosť. Hrozba totiž nie je len vo zvýšení priemernej teploty a následnom oteplení, ide taktiež o zmenu celkového klimatického systému a jeho režimu. Ten predstavuje vybalansovaný a vyvážený systém, v ktorom sú prítomné dva veľké subsystémy a to atmosféra a oceány a menšie subsystémy ako zrážky, oblaky, väzby stratosféry a troposféry, zemský kryt a biosféra (Moldan, 2015).

K ďalším dôležitým prejavom zmeny klímy patria zmeny zrážok, sucho, zvýšená frekvencia lesných požiarov, ústup ľadovcov, zvyšovanie hladiny morí a zmena oceánskych prúdov.

Zmeny v intenzite zrážok spolu s častejšími obdobiami sucha, majú zásadný dopad na klímu a životné prostredie vo svete. V trópoch a subtrópoch boli pozorované už od druhej polovice 20. storočia dlhšie a intenzívnejšie obdobia sucha. Znížil sa tak priemerný úhrn zrážok a zároveň sa zvýšila priemerná teplota, čo významne ovplyvňuje aj hydrologický cyklus (Braniš & Hůnová, 2009). Naprieč celým svetom pozorujeme zvyšovanie variability počasia a dochádza tak k častejším meteorologickým extrémom (Moldan, 2015).

Pri prebiehajúcom globálnom otepľovaní prispievajú extrémne teploty a suchá k výraznému zvyšovaniu rizika lesných **požiarov** (Rakshit et al., 2017). Hlavné stratégie na mitigáciu zmeny klímy sa spoliehajú na ukladanie C v lesoch, preto je dôležité pochopenie spojitostí a vzájomných interakcií medzi vegetáciou, kolobehom C a požiarimi. Posledné experimenty predpovedajú možné zvýšenia intenzity, trvania a frekvencie požiarov v lesných oblastiach a najmä v trópoch kde sú vysoké teploty. Režimy požiarov sa dôsledkom meniacej sa klímy a rôzneho využívania pôdy zmenili a očakáva sa, že bude naďalej dochádzať k zmenám v ich režimoch (Pellegrini et al., 2018).

Ustupujúce ľadovce a ich topenie spôsobuje radu zmien ktoré sú častokrát fatálne, zároveň sa mení aj chod morských prúdov, či monzúnov, ktoré dostávajú do nerovnováhy. Vo vyšších zemepisných šírkach severnej pologule pôsobí tento nárast teploty najviac (Braniš & Hůnová, 2009).

## 3 Organický uhlík v pôde ako prepad a zdroj uhlíka pre atmosféru

V pôdach je uloženého trikrát viac uhlíka ako v atmosfére alebo v rastlinách, to z nej vytvára významný zdroj, alebo prepad pre atmosférický uhlík (Li et al., 2020).

### 3.1.1 Pôdna organická hmota

Za **pôdnu organickú hmotu (POH)** je považovaná organická zložka pôdy, pozostávajúca z rastlinných a živočíšnych detritov v rozličných štádiách ich rozkladu (napr. koreňové exsudáty, extracelulárne enzýmy alebo exkrementy). Hovoríme o zložitej štruktúre, ktorá je tvorená produktami mikrobiálneho rozkladu a rastlinnou nekromasou. Podiel organickej hmoty sa v rámci jednotlivých pôdných typov líši (Šimek, 2019).

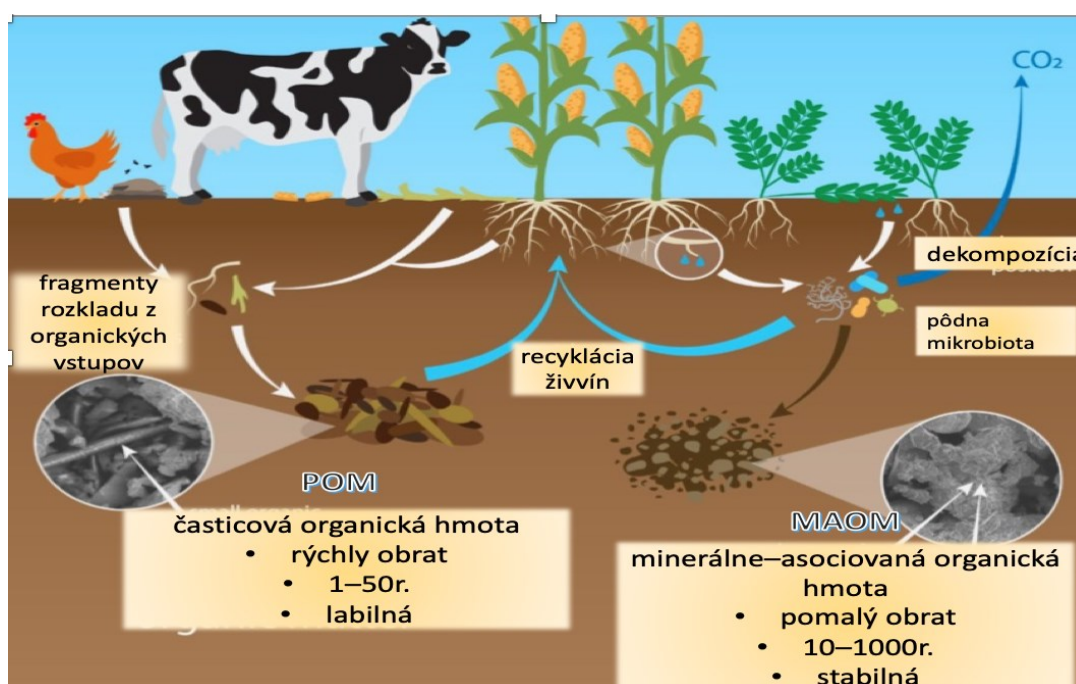
Stanovenie presného obsahu organickej hmoty nie je jednoduché hlavne kvôli pestrému pôvodu a forme organických látok. Stanoví sa preto obsah organického uhlíka, ktorý je násobený koeficientom od 1,7 – 2,0 a najčastejšie sa používa koeficient 1,724 (Šimek, 2019) to znamená, že organické pôdy s obsahom 20 hmotnostných percent organickej hmoty majú približne 12 hmotnostných percent organického uhlíka. Dostaneme tak približný obsah organickej hmoty, ktorý sa znižuje naprieč pôdnym profilom smerom dole, existujú však výnimky. Aj napriek svojmu malému zastúpeniu v pôde, POH zásadne ovplyvňuje ekologické vlastnosti danej pôdy (Šimek, 2019). Zlepšuje chemické a fyzikálne vlastnosti pôdy tým, že znižuje objemovú hmotnosť, udržiava štruktúru pôdy stabilnú a taktiež zvyšuje jej pórovitosť (Hoffland et al., 2020).

Pri rozdeľovaní POH na určité zložky sa metódy skôr sústreďovali na chemickú separáciu, ktoré vyústili do štúdia humíniových látok. V poslednom čase však dochádza ku zmene paradigmatu, kedy sa do popredia dostávajú **fyzikálne metódy separácie** namiesto chemických separácií (Lavallee et al., 2020). Metódy sú relatívne jednoduché a výsledkom sú dve, až štyri formy pôdnej organickej hmoty. Patria sem dve takéto formy, ktoré sa líšia odlišnými vlastnosťami a rýchlosťou obratu. Je to a **časticová organická hmota (POM, angl. particulate organic matter)** a **minerálne-asociovaná organická hmota (MAOM, ang. mineral-associated organic matter)** (Obr. 3). Rozdelenie objemových zásob uhlíka v pôde na dve funkčne odlišné frakcie nám umožňuje presnejšie predpovedať jej zraniteľnosť voči narušeniu, ako napríklad na zmenu klímy. Líšia sa svojím chemickým zložením a predpokladom je fakt, že ich tvorba sa deje rôznymi cestami (Cotrufo et al., 2015).

**POM** je tvorený hlavne relatívne nerozloženými ľahkými fragmentami a dôsledkom fragmentácie sa do minerálnej pôdy dostáva najmä z opadu, kde prechádza len čiastočným spracovaním pôdnymi organizmami (Lavallee et al., 2020). Obsahuje viac zlúčenín rastlinného pôvodu a pokiaľ nie je chránený fyzikálnou oklúziou v agregátoch je pomerne krátkodobý (Lugato et al., 2021) Jeho zotrvanie sa odhaduje v rozmedzí rokov až desaťročí (von Lützwow et al., 2007). Ak nie je POM chránený v agregátoch, je jeho pretrvávanie riadené biochemickou **rekalcitraciou** a mikrobiálnou inhibíciou (Lugato et al., 2021). Práve spomínaná rekalcitracia neposkytuje dlhodobú ochranu pred rozkladom, dá sa teda očakávať, že práve POM bude veľmi citlivý na zmeny prostredia, ako je

oteplňovanie zamrznutých a studených pôd, či vysychanie zamokrených pôd, ktoré uvoľňujú mikrobiálnu inhibíciu (Dutta & Dutta, 2016).

**MAOM** pozostáva z mikroskopických fragmentov alebo jednotlivých molekúl organického materiálu asociovaných s minerálami, ktoré vznikli z rastlinného materiálu, alebo sa chemicky transformovali pôdnou biotou (Lehmann & Kleber, 2015). Frakcia MAOM môže vznikáť dvoma cestami, pričom za najtrvalejšiu zložku MAOM sa považujú nízkomolekulárne zlúčeniny, ktoré sa buď vylúhovali z opadu rastlín alebo vznikli depolymerizáciou opadu a rovno sa spájali s minerálnou fázou (cesta modifikácie ex vivo). Druhým spôsobom je cesta mikrobiálneho obratu in vivo, dôsledkom ktorého sa rozkladá mikrobiota ktorá je transformovaná na organický materiál, ktorý je následne začlenený do MAOM (Liang et al., 2017). Frakcia MAOM pozostáva prevažne zo zlúčenín s nízkou molekulovou hmotnosťou, ktoré vznikli účinným mikrobiálnym spracovaním z rastlinných vstupov a sú zároveň **chránené pred rýchlym rozkladom** vďaka spojeniu s minerálnymi povrchmi. Minerálne asociácie zahŕňajú chemické väzby medzi POH a povrchmi minerálov a uzavretie v malých agregátoch (<50-63  $\mu\text{m}$ ) alebo mikropóroch, ktoré robia POH pre rozkladače menej prístupnou (Kleber et al., 2015; Kögel-Knabner et al., 2008). MAOM je na rozdiel od POM chránený ílovými minerálmi a oxidmi železa, ktoré sú vďaka špecifickému povrchu schopné viazať organický uhlík a tak podporovať jeho dlhodobé zachovanie v POH (Liu et al., 2022). Minerálna ochrana MAOM zaisťuje priemerný čas zotrvania v pôde v rádoch desaťročí až storočí a zároveň je jeho zraniteľnosť oproti POM v prípade zmien prostredia značne **nižšia** (Lugato et al., 2021).



**Obrázok 3:** Rozdiel medzi frakciami POM a MAOM. Prepracované podľa (Cotrufo & Lavallee, 2022).

### 3.1.2 Proces ukladania uhlíka do pôdy

Obsah uhlíka v pôde je bilanciou medzi **vstupmi** a **stratami**. Množstvo uhlíka vstupujúceho do pôdy závisí od produktivity vegetácie, ktorá vyrastá na danej pôde. Toto množstvo kvantifikuje **čistá primárna produkcia** (NPP). Mení sa podľa klímy, pokryvu danej krajiny, typov pôdy a druhového zloženia. Kolísanie NPP závisí od danej sezóny pričom je rastúca vegetácia závislá na teplote, svetle a prístupu k nim. Listnaté lesy vyrastajúce v miernom pásme tak vykazujú svoju vysokú produktivitu len v určitých častiach v roku (Smith et al., 2008).

Akumulácia organického uhlíka v pôde má potenciál zohrávať kľúčovú úlohu pri **mitigácii klimatickej krízy**. Sekvestráciou popisujeme spôsob akým sa na pomerne dlhú dobu odstraňuje uhlík z prostredia (Šimek 2019). **Sekvestrovaný uhlík** sa tak ocitne mimo geochemický cyklus. Pôdny zásobník má najväčší potenciál k akumulácii C práve cez odumretú biomasu z rastlín a živočíchov. Pôda je potenciálne dôležitým úložiskom pre uhlík, ktorý je vypúšťaný antropogénnou činnosťou a stáva sa tak súčasťou mitigačných stratégií. Pri sekvestracii prebieha absorpcia CO<sub>2</sub> z atmosféry skrz rastliny v procese fotosyntézy (Kögel-Knabner et al., 2022).

**Uhlík** vstupuje do pôdy výluhmi z rastlín, rozkladom opadu či koreňovými exsudátmi, ktoré sa skladajú hlavne z aminokyselín, cukrov a organických kyselín, ktoré sú schopné sa rozpustiť vo vode (Pausch & Kuzyakov, 2018). Po odumretí biomasy sa dostáva uhlík na pôdny povrch, kde následne podlieha dekompozícii.

**Dekompozícia** je rozkladný proces, pri ktorom je časť organických látok mineralizovaná na jednoduché anorganické zlúčeniny, časť je premenná v určitom stupni rozkladu a môže tak v pôde dlhšie zotrvať a určitá časť je využitá v procesoch syntézy nových látok (Šimek, 2019). Tento proces rozkladu je úzko spojený s aktivitou pôdnych mikroorganizmov a živočíchov. Časť uhlíka ktorý bol uložený do pôdy v procesoch dekompozície sa vracia späť do atmosféry vo forme CO<sub>2</sub> v rámci respiračných procesov. Týmto procesom sa z plochy 1 ha pôdy uvoľňuje priemerne okolo 25 – 30 kg CO<sub>2</sub> (Šimek, 2019).

Rad ďalších procesov ako požiare, alebo zber úrody taktiež odstraňujú C z pôdy, spolu s respiračnými procesmi (autotrofnými a heterotrofnými) reprezentujú straty C z pôdy, ktoré vyvažujú pozemský vstup CO<sub>2</sub> z primárnej hrubej produkcie. Klíma a to pre aký účel je pôda využívaná sú hlavné príčiny priestorových a časových fluktuácií medzi týmito protichodnými tokmi, ktorých bilancia určuje či je daný ekosystém prepadom alebo zdrojom pre uhlík (Smith et al., 2008).

### 3.1.3 Mechanizmy stabilizácie POH

Procesy zahrňujúce stabilizáciu a destabilizáciu organickej hmoty majú nezastupiteľný význam v obrate živín a toku uhlíka v terestrických ekosystémoch. Ak prevyšuje stabilizácia, stáva sa pôda prepadom pre C, ktorý je tým vyčlenený z globálneho kolobehu. Zahŕňame sem mechanizmy, ktoré spomaľujú, alebo bránia organickej hmote pred ďalším rozkladom a tým predlžujú jej zotrvanie v pôde (Hartley et al., 2021). Medzi dva hlavné typy týchto mechanizmov považujeme **chemické** a **fyzikálne** (von Lützow et al., 2007).

V prípade chemickej stabilizácie ide o chemickú **odolnosť** voči rozkladu. Inak nazývaná aj rekalcitrancia, je dôležitá v skorých štádiách rozkladu a postupne sa dôležitejšími stávajú mechanizmy fyzikálne. Rekalcitrancia je závislá na chemickej štruktúre danej látky, to znamená, že za chemicky odolné sú pokladané skupiny s aromatickým jadrom. Radíme sem napr. lignín, rôzne lipidy alebo fenolitické zlúčeniny. Lignín sa vzhľadom na jeho zložitú chemickú štruktúru považuje za rekalcitrantnú zlúčeninu a predpokladá sa, že na rozdiel od glukózy bude jeho rozklad vyžadovať vyššiu aktivačnú energiu (Liáng et al., 2023). Ich schopnosťou je pretrvávajúť v pôde celé desaťročia (Lavallee et al., 2020).

Fyzikálne mechanizmy stabilizácie spôsobujú ukrytie resp. **uzatvorenie** organickej hmoty vo vnútri pôdnych agregátov, čím sa zamedzí prístupu rozkladačov, dôsledkom obmedzenia difúzie plynov alebo živín (Hartley et al., 2021). Odumreté zvyšky mikroorganizmov, časti koreňov, ale aj opad z rastlín sa tak môže uzamknúť pri vzniku pôdnych agregátov (Lugato et al., 2021).

Druhý mechanizmus fyzikálnej stabilizácie je riadený interakciou medzi molekulami organického uhlíka a pôdnymi minerálmi. MAOM je na rozdiel od POM vďaka tomu chránený pred rozkladom (Lavallee et al., 2020). Pri tejto väzbe sú mikroorganizmy neschopné transportovať organickú hmotu do vnútra bunky pokiaľ ju neoddelia od minerálneho povrchu. Vytvorené **organominerálne komplexy** sú preto schopné chrániť organický uhlík pred mikrobiálnym rozkladom. MAOM má kvôli tomuto zásadnému rozdielu v úrovni ochrany schopnosť pretrvávajúť v POH oveľa dlhšie ako POM frakcia (Kögel-Knabner et al., 2008; Poeplau et al., 2018; Trumbore & Zheng, 1996).

Tretou možnosťou stabilizácie pôdnej organickej hmoty je jej vystavenie **anaeróbnym podmienkam**. Tie sú spôsobené mrazom, alebo trvalým zamokrením, ktoré len pozastavuje organickú hmotu v čase rozkladu, neprebíha tak jej premena na prirodzene rekalcitabilný materiál (Davidson & Janssens, 2006). Preto sa nedá označovať organický C v trvalo zamrznutých pôdach a rašeliniskách za stabilizovaný v rovnakom zmysle, v akom je stabilizovaný v minerálnych pôdach, kde dochádza k jeho adsorpcii na povrchu minerálov, poprípade ostáva chránený vo vnútri pôdnych agregátov (Smith et al., 2008). V súčasnosti sú tieto oblasti zvlášť ohrozené, v dôsledku

prebiehajúcej klimatickej zmeny. Môže tak dôjsť k uvoľneniu týchto veľkých zásob C do ovzdušia čo by spôsobilo posilnenie skleníkového efektu (Davidson & Janssens, 2006).

Topenie permafrostu má za následok zmenu anaeróbneho stavu a dôsledkom odvodnenia sa zlepšuje prevzdušnenie pôdy. Zvýši sa tak dostupnosť kyslíka pre mikroorganizmy, ktoré zrýchlia mikrobiálny rozklad, čo spôsobí degradáciu organickej hmoty (Liu et al., 2022). V trvalo zamrznutých pôdach sa rastlinný opad hromadí na vrchole permafrostu, prostredníctvom miešania, inak nazývaného aj kryoturbácia. Pri rozmŕzaní sa C stáva dostupným pre rozklad (Serreze et al., 2000).

Ohrozenými sa stávajú aj rašeliniská a teda pôdy vystavené trvalému zamokreniu (Leifeld & Menichetti, 2018). V oblastiach, kde sa očakáva zníženie pôdnej vlhkosti, bude dochádzať ku následnému vysychaniu vrchných vrstiev rašeliny a tým by sa značná časť uhlíka mohla stať aerobným a teda dostupným pre rozklad. V suchej rašeline môže následne uhlík podliehať požiarom, pričom by dochádzalo ku značnému uvoľňovaniu C do atmosféry (Davidson & Janssens, 2006).

## 4 Vplyv zmien teploty na uhlík v pôde

Vývoj **pôdneho organického uhlíka** (SOC) v reakcii na zmenu klímy, ktoré ovplyvňujú vstupné procesy, ale aj procesy rozkladu v globálnom meradle nie sú dostatočne známe (Guenet et al., 2018a). Predpovedať či bude pôda v budúcich dekádach pôsobením teplejšej klímy **prepadom**, alebo **zdrojom** atmosférického CO<sub>2</sub> bude závisieť od reakcií rastlín na ich rast, ktorý určuje koľko uhlíka do pôdy vstúpi a na dekompozícii, ktorá určuje koľko C sa do atmosféry uvoľní (Davidson & Janssens, 2006). Vzťah medzi klímou a SOC bol prijatý do ekosystémového cyklu uhlíka a do modelov zemského systému (ESM), aj napriek tomu v týchto predpovediach pretrvávajú značné neistoty a vykazujú veľký rozptyl budúcich projekcií. (Luo et al., 2016).

Za kľúčový a dominantný faktor ovplyvňujúci dynamiku C v pôde sa považuje **klíma** aj kvôli tomu, že často vysvetľuje najväčšie zmeny v rozklade SOC v regionálnom a globálnom meradle (Beer et al., 2010; Carvalhais et al., 2014).

### 4.1 Vplyv teploty na vstupy uhlíka do pôdy

Po celom svete predpovedali modely zemského systému, že primárna produkcia (NPP) sa v dôsledku rastúcej koncentrácie CO<sub>2</sub> môže zvýšiť o 10% až 60% v podmienkach otepľovania, aj napriek tomu, že účinok toto efektu hnojenia oxidom uhličitým (angl. CO<sub>2</sub>-fertilization effect) môže byť obmedzený dostupnosťou živín ako je fosfor, alebo dusík (Luo et al., 2020). Zvyšujúca



primárna produkcia by tak mala za následok **nárast** organického C v pôde najmä v modelových zásobníkoch so strednou, či rýchlou rýchlosťou obratu.

**Uhlík** sa do pôdy väčšinou dostáva z rozkladajúcich sa nadzemných a podzemných rastlinných tkanív, dôležitým zdrojom sú ale aj koreňové exsudáty, najmä u rastlín s aktívnym rastom (Bardgett et al., 2005). Rastlinné druhy ktoré rýchlo rastú, prispievajú do pôdnych zásobníkov veľkým množstvom uhlíka, oproti tomu pomaly rastúce druhy, prispievajú vstupmi nekvalitným rastlinným materiálom (Deyn et al., 2008).

To koľko C do pôdy vstupuje a aj jeho kvalita významne ovplyvňuje dynamiku SOC (Davidson & Janssens, 2006). Klimatické podmienky, hlavne **teplota** a zrážky sú hlavnými faktormi ukladania uhlíka do pôdy, pričom zrážky majú kľúčovú úlohu v určovaní čistej primárnej produkcie, dostatočné zrážky spolu so zvýšenou teplotou dokážu zvýšiť možné vstupy C do pôdy viz kapitola 6.2.1 – Sucho a zvyšovanie teploty. Pri začlenení priming efektu do budúcich modelov dochádza ale k zmene tejto klasickej reakcie pôdneho organického C, keďže následkom zvýšenej produktivity z rastlín a vstupom čerstvého uhlíka môže byť **stimulovaný rozklad** C v pôde (Guenet et al., 2018b).

#### 4.1.1 Priming efekt

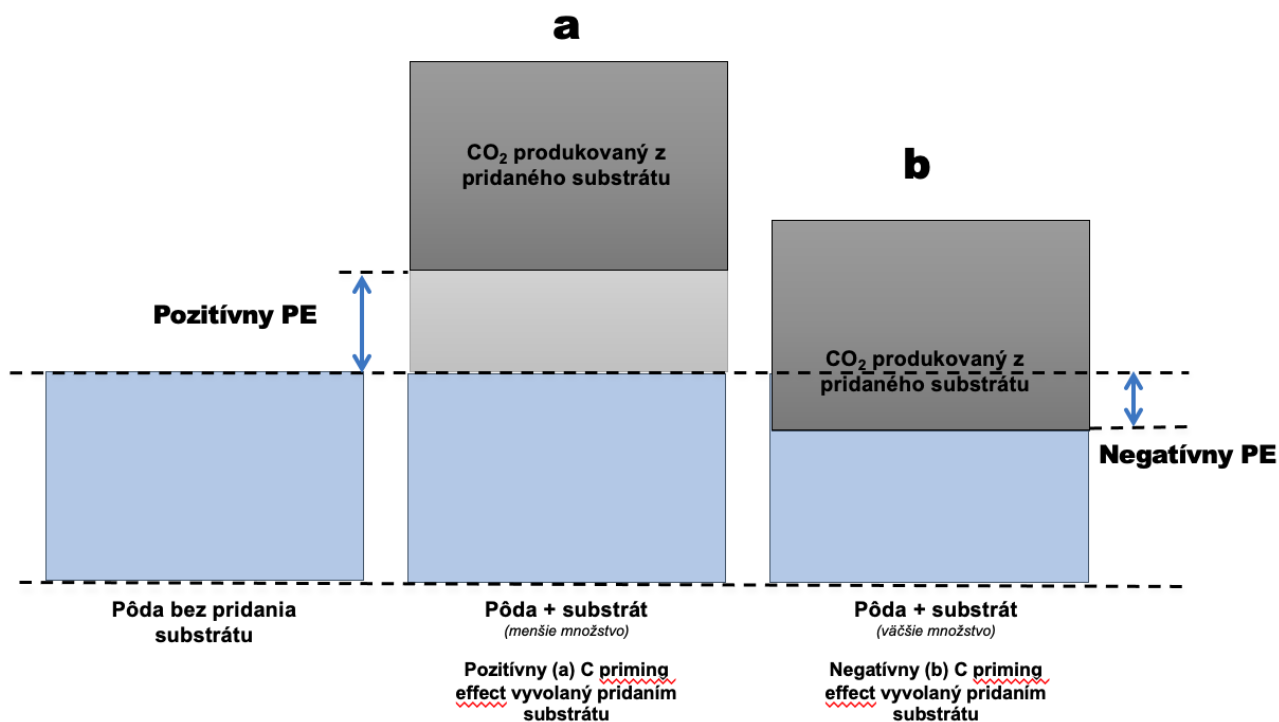
Kľúčovou zložkou globálneho kolobehu uhlíka je **pôdny priming** (Obr. 4), pri ktorom dochádza ku zmene mikrobiálneho rozkladu SOC dôsledkom prísunu čerstvého uhlíka (Guenet et al., 2018). Pri priming efekte dochádza ku **krátkodobej**, ale **výraznej zmene** v obrate pôdnej organickej hmoty dôsledkom relatívne malého zásahu do pôdy (Šimek, 2019). V zónach, kde dochádza k značným vstupom uhlíka, je čas obratu pôdnej organickej hmoty zvyčajne kratší, napr. na povrchu oproti hlbším horizontom (Basile-Doelsch et al., 2020).

Priming delíme na zdanlivý a skutočný, pričom zdanlivý zodpovedá zmene CO<sub>2</sub> ktorý bol uvoľnený z obratu mikrobiálnej biomasy po vstupe ľahko dostupných substrátov. Vyskytuje sa preto len pár dní a týždňov, zatiaľ čo skutočný priming je zodpovedný za zmenu uvoľňovania CO<sub>2</sub> z POH a trvá oveľa dlhšie. Je regulovaný mechanizmami, ktoré zahŕňajú abiotické a biotické faktory, preto sa označuje za komplexný jav (Wiesmeier et al., 2019). Predpokladá sa, že priming je hlavným faktorom, ktorý určuje, či bude daná pôda fungovať ako zdroj alebo pohlcovač CO<sub>2</sub>.

Prísun čerstvej organickej hmoty môže spôsobiť buď **pozitívny**, alebo **negatívny** priming (Kuzyakov et al., 2000). **Pozitívny** priming (Obr. 4a) stimuluje mikroorganizmy na zvýšenú aktivitu a rozklad organického materiálu čo následne vedie k uvoľňovaniu väčšieho množstva CO<sub>2</sub> do atmosféry (Kuzyakov et al., 2000). Naopak pod pojmom **negatívny** priming (Obr. 4b) rozumieme, že dôsledkom zníženého obratu mikrobiálnej biomasy, po pridaní labilného C do pôdy

bude potlačený rozklad POH (Guenet et al., 2010). Inak povedané, **negatívny** priming môže mať za následok zvýšenie množstva organického materiálu v pôde, keďže je inhibovaný rozklad.

Veľkosť prebiehajúceho priming efektu sa líši od zásob C v pôde. Z toho vyplýva, že pôdy obsahujúce dostatok labilného uhlíka nevykazujú veľkú odozvu na prísun labilného uhlíka, naproti tomu pôdy s nízkym obsahom počiatočného uhlíka vykazujú silný pozitívny priming (Šimek, 2019).



**Obrázok 4:** Rozdelenie priming efektu na pozitívny a negatívny. Prepracované podľa (Šimek, 2019).

Celkovo sa dá povedať, že vývoj modelovania v posledných rokoch naznačuje, že práve prebiehajúci priming v pôde je dôležitým aspektom na zahrnutie do predpovedí distribúcie C po celom svete, keďže zohráva významnú úlohu pri určovaní výmeny C medzi pôdou a atmosférou. Začlenenie PE do prognóz ESM by malo zohrávať nezastupiteľné miesto, aj kvôli tomu, že v experimentoch a štúdiách, kde nebol PE zahrnutý môžu výsledky značne nadhodnocovať schopnosť pôd uchovávať C pri ďalšom postupe klimateckej zmeny a zvyšovaní teploty.

## 4.2 Vplyv teploty na straty uhlíka z pôdy

V predpovediach sa očakáva, že straty C budú podporené **zvýšenou teplotou**, ktorá aktivuje mikroorganizmy a podnieti tak mikrobiálny rozklad čo podporí pozitívnu spätnú väzbu na zmenu klímy (Chen et al., 2018; Crowther et al., 2016). Heterotrofná respirácia pôdy zohráva v suchozemských ekosystémoch dôležitú úlohu, keďže reguluje kolobeh globálneho uhlíka.

V súvislosti s týmito predpovediami o zvýšených stratách, ktoré sú podmienené hlavne otepľovaním je dôležité poznamenať, že teplotná citlivosť pôdnej respirácie je kľúčovým faktorom, ktorý ovplyvňuje rýchlosť týchto procesov.

#### 4.2.1 Teplotná citlivosť pôdnej respirácie

**Teplotná citlivosť** pôdnej respirácie je jedným z významných faktorov, ktorý určuje smer a veľkosť spätnej väzby cyklu uhlíka v suchozemských ekosystémoch na otepľovanie (Zhou et al., 2009). Teplotná citlivosť inak označovaná aj ako **Q10**, je faktor, ktorým dôjde k **zvýšeniu rýchlosti** biologických procesov pri zvýšení teploty o 10 °C. Biologický výskum uznáva pravidlo, že rýchlosť rozkladu POH ako je tomu aj pri iných biologických reakciách má tendenciu pri každom zvýšení o teploty 10°C zdvojnásobiť svoju rýchlosť rozkladu, tzn.  $Q_{10} \sim 2$  (Davidson & Janssens, 2006).

Rozlišujeme dve definície teplotnej citlivosti. Prvá je vnútorná teplotná citlivosť a druhá je zdanlivá teplotná citlivosť. Vnútornou teplotnou citlivosťou sa rozumie teoretická citlivosť určená molekulárnou štruktúrou, kinetickými vlastnosťami zásobníkov a teplotou okolia (Sierra et al., 2015). Zdanlivá teplotná citlivosť je určená zároveň molekulárnou štruktúrou a environmentálnymi obmedzeniami, ktoré sú spôsobené heterogénnymi vlastnosťami pôdy (Zhou et al., 2009) Tieto environmentálne obmedzenia sú hlavnými faktormi riadiacimi zdanlivú teplotnú citlivosť, keďže sú ochranou pred rozkladom SOC (Dash et al., 2019). Environmentálne obmedzenia sú fyzikálne, biologické, chemické, alebo biochemické procesy, ktoré sú ovplyvňované teplotou a klimatickými faktormi, ale aj spôsobmi hospodárenia. Medzi hlavné environmentálne obmedzenia patrí hlavne stabilita pôdných agregátov a ich veľkosť (Dash et al., 2019).

Nedostatkom priamych meraní v reakciách zásob C v pôde na zvyšujúcu teplotu sa musia modely zemského systému (EMS) spoliehať na krátkodobé teplotné reakcie respirácie pôdy u ktorých dominuje odozva ľahko rozložiteľného labilného C (Liáng et al., 2023). Väčšie zásoby C v pôde sú tvorené dlhšie rozkladajúcim sa odolným uhlíkom, aj preto nie je úplne jasné, či sa poznatky a zistenia z reakcií na premenu labilného uhlíka dajú aplikovať na rezistentný C pri odvodzovaní dlhodobých zmien v zásobách C (Crowther et al., 2016). Preto sú dôležité empirické pozorovania, zachytávajúce dlhšiu časovú dynamiku C.

### 4.3 Vplyv teploty v závislosti na hĺbke

Zo štúdie od Crowther et al., (2016) prostredníctvom 49 experimentov po celom svete odhadli, že oteplenie o 2 °C do roku 2050 by mohlo viesť ku čistej strate  $55 \pm 50$  Gt uhlíka zo svetovej vrstvy pôdy do 15 cm. Z 26 ročného skúmania od Melillo et al., (2017) dôsledkom otepľovania odhadli

straty asi 190 GtC v priebehu 21.storočia, vo vrchnej vrstve pôdy, pričom vykonávali len merania lesnej pôdy. Obe tieto štúdie však nevykonávali experimenty v hlbších horizontoch pôdy, čo značne **skresľuje** ich predpovede.

Aj napriek tomu že hlboké pôdne horizonty neobsahujú vysoké koncentrácie C, je práve pod vrchnými 30 cm pôdy uložených viac ako **polovica svetových zásob** pôdneho organického uhlíka (Jobbágy & Jackson, 2000). Tým sa stávajú ešte dôležitejšími medzičlánkami ovplyvňovania atmosférického C než vrchná pôda (Li et al., 2020). Nato ako reaguje vrchná vrstva pôda na zmenu klímy bolo vypracovaných viacero štúdií. Otázne však ostáva, aká bude dynamika C v hlbších horizontoch a ako na túto zmenu klímy zareaguje (Li et al., 2020). Preto nie je štúdium len vrchných vrstiev pôdy dostatočné k tomu aby boli pochopené reakcie na globálne zmeny (Hicks Pries et al., 2023)

**Hlboké pôdy** majú veľký mitigačný potenciál v závislosti na tom, či sa ich podarí spravovať tak, aby aktívne sekvestrovali pôdny organický uhlík, alebo či naopak následkom globálnej zmeny pri zvýšenom rozklade hlbokého pôdneho C bude prostredníctvom respiračného procesu uvoľnený v podobe CO<sub>2</sub> do atmosféry (Hicks Pries et al., 2017). Reakcie pôdneho organického C na globálne zmeny sa tak v súčasnosti stávajú jednými z najväčších zdrojov neistoty v predpovedajúcich modeloch zemského systému a preto sa musia stať prioritou ďalšieho výskumu aj reakcie hlbších pôd na predpovedané zmeny (Hicks Pries et al., 2017; Rumpel & Kögel-Knabner, 2011). Napriek tomu, že cyklus uhlíka prebieha v povrchovej pôde podstatne rýchlejšie ako je tomu pri cykle uhlíka v hlbokých pôdach, zohráva pôdny organický C v hlbokkej pôde významnú rolu v globálnom cykle uhlíka (Hicks Pries et al., 2023).

Hĺbkový profil je gradientom viacerých **biotických** a **abiotických** faktorov s rôznymi mechanizmami riadiacimi vstupy, straty a stabilizáciu pôdneho organického C na povrchu pôdy v porovnaní s hĺbkou (Rumpel & Kögel-Knabner, 2011). Stálosť uhlíka v pôde sa zvyšuje s hĺbkou, kde dochádza k obmedzovaniu prístupu mikroorganizmov k uhlíku (Fontaine et al., 2007; Hicks Pries et al., 2017). Taktiež k obmedzovaniu kyslíka hlavne vo vlhkých pôdach, zároveň k zvýšenému potenciálu pre organominerálne interakcie v hĺbke, či k ochrane pôdnymi agregátmi (Rumpel & Kögel-Knabner, 2011; Schmidt et al., 2011).

Výsledky experimentov vykazujú nejednoznačné výsledky, pričom teplotná citlivosť pôdy vo väčších hĺbkach sa uvádza ako **vyššia** (Fierer et al., 2003), čo potvrdzujú aj novšie výskumy (Li et al., 2020; Luo et al., 2020), nižšia (Gillabel et al., 2010) alebo rovnaká (Gabriel & Kellman, 2014) ako pri povrchových pôdach.

Je teda častým omylom, že hlboké pôdy zaostávajú za povrchovými pôdami pri reakciách na rozsiahle otepľovanie (Hicks Pries et al., 2023). Prognózy vydané CIMP5 ukazujú, že hlboké pôdy

a aj pôdy v blízkosti povrchu sa budú otepľovať **rovnakým tempom**, pričom by sa mali do roku 2100 hlboké pôdy oteplieť o asi 4,5 °C, čo ovplyvní ukladanie uhlíka v pôde. Vplyvom otepľovania sa zvýši aktivita pôdnej bioty a teda dochádza k **zvýšenej aktivite mikroorganizmov** (Conant et al., 2011), zároveň sa zvýši aktivita a kinetika extracelulárnych enzýmov (German et al., 2012) a zníži sa CUE (angl. carbon use efficiency) (Li et al., 2019) čo by znamenalo, že sa pôda zmení na zdroj C do atmosféry (Hicks Pries et al., 2023).

V nedávnej štúdií od Wang et al. (2022) sa zameriavali síce na hlbší pôdny profil, ale len s metódou ohrievania vzduchu, čo mohlo výrazne ovplyvniť zaznamenané väčšie straty hlavne z vrchných vrstiev pôdneho profilu. Tieto tvrdenia podporuje experiment pri ktorom bol ohrievaný pôdny profil lesov mierneho pásma do hĺbky ohrievacími tyčami do hĺbky 1 m. Všetky hĺbky reagovali na oteplenie obdobnou teplotnou citlivosťou a zároveň vykazovali **podobne veľké** zvýšenie pôdnej respirácie (Hicks Pries et al., 2017). Podobne veľké straty boli zaznamenané aj v tropických oblastiach, pričom straty v pôdnej respirácii boli v porovnaní s experimentom od Hicks Pries et al. (2017) dokonca o niečo **vyššie** (Nottingham et al., 2020a). Tieto zistenia podporujú myšlienku o rovnako vysokej teplotnej citlivosti v **povrchových a hlbokých pôdach** a taktiež vyvracajú očakávania, že teplotná citlivosť pôd bude vyššia len v chladnejších ekosystémoch vyšších zemepisných šírok.

#### 4.4 Vplyv teploty v závislosti na stabilite organickej hmoty

Mnohé štúdie zhrnuli, že reakcie organického uhlíka v pôde na celkové globálne zmeny sú často malé, žiadne, alebo veľmi premenlivé a závislé od parametrov prostredia (Yue et al., 2017; Zhang et al., 2015). Rôzne zložky v celkovom objeme SOC môžu vznikáť a pretrvávajú vďaka rôznym mechanizmom (Lu et al., 2011), meranie celkových zásob SOC nemusí byť dostatočne citlivé na tieto zmeny (Lavallee et al., 2020).

Dlhé roky sa výskum zameriaval na porovnávanie rôznych reakcií labilných a rekalitrantných substrátov na zvyšovanie teploty. Ukázalo sa, že tieto rozdiely sú dôležité a rozhodujúce len pre dostupnú SOC (Lavallee et al., 2020). Experimenty vykazovali **rôzne** reakcie na otepľovanie od poklesu organického C v pôde, cez stabilné a nemenné hodnoty, až po ich nárast (Chen et al., 2023). Reakcie organického C v pôde na zvyšovanie teploty sa líšia medzi frakciami, keďže rozdielne zložky pôdy majú rozličné zloženie, ale aj mechanizmy stabilizácie, ktoré vedú k rozdielnemu času obratu a ich dynamike (Lavallee et al., 2020), podrobnejšie viz **kapitola 3.1.1.** – Pôdna organická hmota.

Frakcie **POM** bude preto viac hlavne pri vyššom vstupe z opadu rastlín a menšej miere mikrobiálneho rozkladu oproti MAOM, ktorý bude vyšší pri lepšej mikrobiálnej transformácií

(Rocci et al., 2021). Preto sa predpokladá že časticový organický uhlík (POM), ktorý nie je chránený minerálmi, reaguje viac na zmeny prostredia oproti organickému uhlíku ktorý je spojený s minerálmi (MAOM) (Lavallee et al., 2020).

V práci od Lugato et al., (2021) použili klimatický gradient na predpovedanie citlivosti POM a MAOM na zmenu klímy. Celkovo bol zaznamenaný všeobecný pokles časticovej organickej hmoty (POM) spolu s minerálnou organickou hmotou (MAOM), avšak frakcia **MAOM** reagovala na zmeny menej citlivo (Lugato et al., 2021). Pri zvyšovaní teploty dochádza k urýchľovaniu mikrobiálneho rozkladu pôdnej organickej hmoty (POH). Taktiež sa ukázalo, že otepľovanie znižuje vstupy rastlín aj stabilitu MAOM hlavne v orných pôdach, čo môže byť spôsobené tým, že orné pôdy majú dôsledkom obrábania a narušania nízku agregáttnu stabilitu (Lugato et al., 2021).

Zo štúdií, ktoré oddelili zložky pôdy na POM a MAOM je zrejmé, že POM bol **citlivejší** ako MAOM čo naznačuje, že rýchlosť rozkladu pri POM bol viac ovplyvnený teplotou ako destabilizácia MAOM (Lavallee et al., 2020; Lehmann & Kleber, 2015). Účinky otepľovania na dané zložky POH závisia od daného systému, jeho komplexnosti a charakteru. Meta-analýza od Rocci et al., (2021) sa vo svojich zhrnutiach zhoduje s predchádzajúcou štúdiou, že práve MAOM bol oveľa **menej citlivý** na zmeny ako frakcia POM. V tejto práci zistili, že pri otepľovaní nebol vplyv na frakciu MAOM jednoznačný, naopak frakcia POM prejavila pod vplyvom zvyšujúcej teploty negatívny trend a teda obsah POM klesal s rastúcou teplotou. Zároveň poukázali nato, že výsledky reakcií pôdnych frakcií sa odvíjali od viacerých faktorov, vrátane toho či sa otepľoval vzduch, alebo pôda a od stupňa otepľovania. Výsledky skresľujú aj rozdielne dĺžky experimentov s otepľovaním, kedy pri krátkodobejších experimentoch trvajúcich menej ako 10 rokov, nemusia byť spôsobené zistiteľné zmeny v MAOM u ktorého je oveľa dlhší cyklus obratu (Rocci et al., 2021).

Na rozdiel od POM došlo pri **dlhodobom** otepľovaní k stratám v **ťažkej frakcii** (MAOM), aj napriek tomu že sa predpokladala jeho stabilita v dôsledku fyzikálnej, alebo chemickej ochrany. MAOM frakcia nebola dostatočne stabilná aby dokázala odolať vplyvu 20 ročného otepľovania a jej zásoby sa výrazne znížili (Chen et al., 2023). Na rozdiel od POM došlo pri dlhodobom otepľovaní k stratám v ťažkej frakcii (MAOM) aj napriek tomu, že sa predpokladala jej stabilita v dôsledku fyzikálnej alebo chemickej ochrany. V experimentoch od Chen et al.,(2023) rovnováha medzi nižším vstupom rastlín a nižším výstupom mikrobiálneho rozkladu, spolu s potlačenou enzýmatickou aktivitou mohli zapríčiniť že sa POM **nezmenil**.

Avšak je značná obava, že ani toto rozdelenie frakcii na základe toho či je daný materiál chránený minerálnou asociáciou alebo je naopak voľný a vystavený tak mikrobiálnemu rozkladu, nie je dostatočná na vysvetlenie pozorovaných reakcií SOC na otepľovanie (Chen et al., 2023). Pri

dlhodobom otepľovaní v smrekových lesoch boli obe frakcie ovplyvnené veľmi podobne (Schnecker et al., 2016).

Zdá sa, že ani rozdelenie do frakcií častokrát neprináša jednoznačné výsledky reakcií pôdy na zvyšovanie teploty. Tieto rozporuplné výsledky môžu byť spôsobené hlavne **odlišnými metódami experimentovania** viz viac kapitola 5 – Metódy výskumu vplyvu otepľovania na uhlík v pôde, alebo nedostatočne dlhým **trvaním** experimentu. Značná medzera sa ukazuje v štúdiách zameraných len na určitý **typ ekosystému** pričom hlavný záujem sa sústreďuje najmä na lesné, či trávnaté ekosystémy. Nesprávne poľnohospodárske prístupy, ktoré narušajú stabilitu pôdnych agregátov frakcie MAOM môžu však značne prispieť k ďalším možným stratám C do atmosféry.

## 4.5 Celkový vplyv zmien teploty na uhlík v pôde

Účinky experimentálneho otepľovania na zásoby C v pôde sa stali predmetom skúmania mnohých štúdií a meta-analýz (Tabuľka 1), boli to skúmania prostredníctvom klimatických gradientov, alebo manipulačných experimentov a vykazovali prevažne **úbytok C** pri scenároch zvyšujúcej teploty (Chen et al., 2023; Hicks Pries et al., 2017; Lugato et al., 2021; Melillo et al., 2017; Nottingham et al., 2020b; Rocci et al., 2021; Soong et al., 2020). Zároveň však vplyv zvyšujúcej teploty na C uložený v pôde závisí od **počiatočných zásob C** (Tabuľka 1.) a od toho, aký veľký je rozsah a trvanie otepľovania (Crowther et al., 2016). V oblastiach s malými zásobami C môže byť zvýšený rozklad vyvážený rastom rastlín, no v oblastiach s väčšími zásobami, prevyšujú straty nad akumuláciou C, čo vedie k výrazným **stratám** do atmosféry (Crowther et al., 2016).

Predpovede ukazujú, že v nasledujúcom storočí sa budú hlboké pôdne horizonty otepľovať približne rovnakým tempom ako povrchová pôda, čo potvrdzujú aj výsledky zobrazené v tabuľke 1. Tieto tvrdenia podporujú aj výsledky z práce od Hicks Pries et al., (2017) ktoré využívali merania v lesnej pôde mierneho pásma do hĺbky 100 cm a podporili myšlienky, že reakcie hlbokých pôdnych horizontov nezaostávajú za povrchovou pôdou. Zároveň práca od Nottingham et al. (2020a) vykonávaná v tropických oblastiach len potvrdzuje možné straty z **hlbších pôdnych horizontov**, čo poukazuje na medzeru v nedostatku skúmania naprieč viacerými ekosystémami a podhodnocovaní možných zmien, ktoré v modelových predpovediach nie sú zahrnuté.

Metódy v ktorých oddeľovali pôdne frakcie vykazovali zhodné reakcie na otepľovanie v závislosti na dĺžke pokusu a metódy ktorá bola využívaná, pričom z výsledkov vyplýva, že možné straty vo frakcii MAOM mohli byť spozorované ak by niektoré z vykonávaných experimentov trvali dlhší čas.

Rozdielne reakcie vykazovala pôda pri experimentoch na otepľovanie pôdy a pri otepľovaní vzduchu. Ohrievanie pôdy v ekosystéme vplyva na rozličné mikrobiálne procesy a na aktivitu

rhizosféry, čo často vedie k vyčerpaniu zásob C (Crowther et al., 2016). Naopak pri otepľovaní vzduchu môže dochádzať ku fixácii C prostredníctvom rastlín, čím by sa zvýšil prísun C, čo by mohlo do značnej miery kompenzovať straty spôsobené otepľovaním (Liu et al., 2020).

Tieto predpovede potvrdzuje aj Rocci et al., (2021) vo svojej štúdií, keďže sa reakcie pôdných frakcií na otepľovanie odvíjali od toho či sa otepľoval vzduch alebo pôda a taktiež od stupňa oteplenia. Zároveň výsledky naznačujú, že otepľovanie pôdy vykazovalo vo všeobecnosti väčší vplyv na reakciu frakcií pôdneho organického C, ako pri otepľovaní vzduchu. Konkrétne vyššie teploty pôdy mali významnejší vplyv na dynamiku organického C pričom došlo k poklesu koncentrácií niektorých frakcií. Avšak v prípade POM sa ukázalo, že v niektorých prípadoch práve otepľovanie vzduchu má pozitívny vplyv na jeho odpovede. To naznačuje, že metódy využívajúce otepľovanie vzduchu môžu byť v niektorých výskumoch dôležitejšie, pre presné pochopenie odpovedí frakcie POM (Rocci et al., 2021).

Neistota sa ukazuje v nedostatku experimentov skúmajúcich hlboké pôdne horizonty spolu s nedostatkom meraní rozdielnych frakcií, ktoré by zároveň dokázali vykonávať výskumy dostatočne šetrne pre pôdnu biotu.



**Tabuľka 1:** Celkový dopad zvyšovania teploty na organický C v pôde.

Štúdie	Vplyv na C v pôde	Typ štúdie	Metódy štúdie	Dĺžky experimentu	Hĺbka pôdy
(Lugato et al., 2021)	↑ °C : POM/MAOM ↓ ↑ °C : SOC ↓	empirická	klimatický gradient	1 rok	(0 – 20 cm)
(Rocci et al., 2021)	↑ °C : SOC – ↑ °C : POM ↓ ↑ °C : MAOM –	meta-analýza	skelníky terénne štúdie laboratórne inkubácie	<10 rokov	(< 10 cm) (10-30 cm) (> 30 cm )
(Soong et al., 2021)	↑ °C : SOC ↓	empirická	vyhrievacie káble	4,5 roka	(do 100 cm)
(Crowther et al., 2016)	↑ °C : ↓ini. SOC: SOC ↑ ↑ °C : ↑ini. SOC: SOC ↓	meta-analýza	terénne manipulácie (ohrievanie pomocou IR lámp) laboratórne experimenty	mesiace až roky	(do 10 cm)
(Chen et al., 2023)	↑ °C : SOC ↓ ↑ °C : POM — ↑ °C : MAOM ↓	empirická	otvorené komory	20 rokov	(0 – 50 cm)
(Melillo et al., 2017)	↑ °C : SOC ↓	empirická	otvorené komory	26 rokov	(0 – 30 cm)
(Nottingham et al., 2020a)	↑ °C : SOC ↓	empirická	vyhrievacie káble	2 roky	(do 120 cm)
(Hicks Pries et al., 2017)	↑ °C : SOC ↓	empirická	vyhrievacie tyče	27 mesiacov	(do 100 cm)

## 5 Metódy výskumu vplyvu otepľovania na uhlík v pôde

V posledných desaťročiach sa výskum zameriaval na skúmanie globálnych zmien prostredníctvom experimentov s otepľovaním. Aj vďaka tomu sme dokázali prehĺbiť poznatky o tom, ako môže budúce zvyšovanie teploty ovplyvniť rôzne ekosystémové procesy (Melillo, Frey, Deangelis, et al., 2017; Soong et al., 2020). Na rozšírenie poznatkov o reakciách ekosystémov na otepľovanie sa využívajú **manipulačné metódy**, ktoré delíme na pasívne a aktívne (Duan et al., 2022). Taktiež sa výskum realizuje prostredníctvom **pozorovacích metód**, ktoré využívajú prirodzené gradienty (Lugato et al., 2021; Poeplau et al., 2020).

### 5.1.1 Pasívne metódy ohrievania pôdy

Pri **pasívnych metódach** sa používajú rôzne druhy ohrád a plotov, ktoré zamedzujú tepelným stratám a zároveň experiment prebieha bez prítomnosti vonkajších zdrojov tepla (Marion et al., 1997). Čoraz častejšie sa používajú komory s otvoreným vrcholom, tzv. **open-top chambers** (Obr. 5a) (Mikkelsen et al., 2008), alebo rôzne **nočné otepľovania** prostredníctvom závesov (Li et al., 2021). Terénne štúdie v odľahlých oblastiach môžu prebiehať prostredníctvom pasívnych metód, avšak metódy zahrňujúce komory môžu negatívne ovplyvňovať prúdenie vzduchu, vytvárať nerovnomerné gradienty teploty, alebo spôsobovať malé zmeny v správaní zvierat. Pasívne otepľovanie však nie je úplne správne pomenovanie, pretože pri týchto systémoch nedochádza k zahrievaniu pôdy, dochádza len k spomaleniu relatívnych strát pri klesajúcej teplote vzduchu a zároveň pôdu chráni pred narušením (Marion et al., 1997).

### 5.1.2 Aktívne metódy ohrievania pôdy

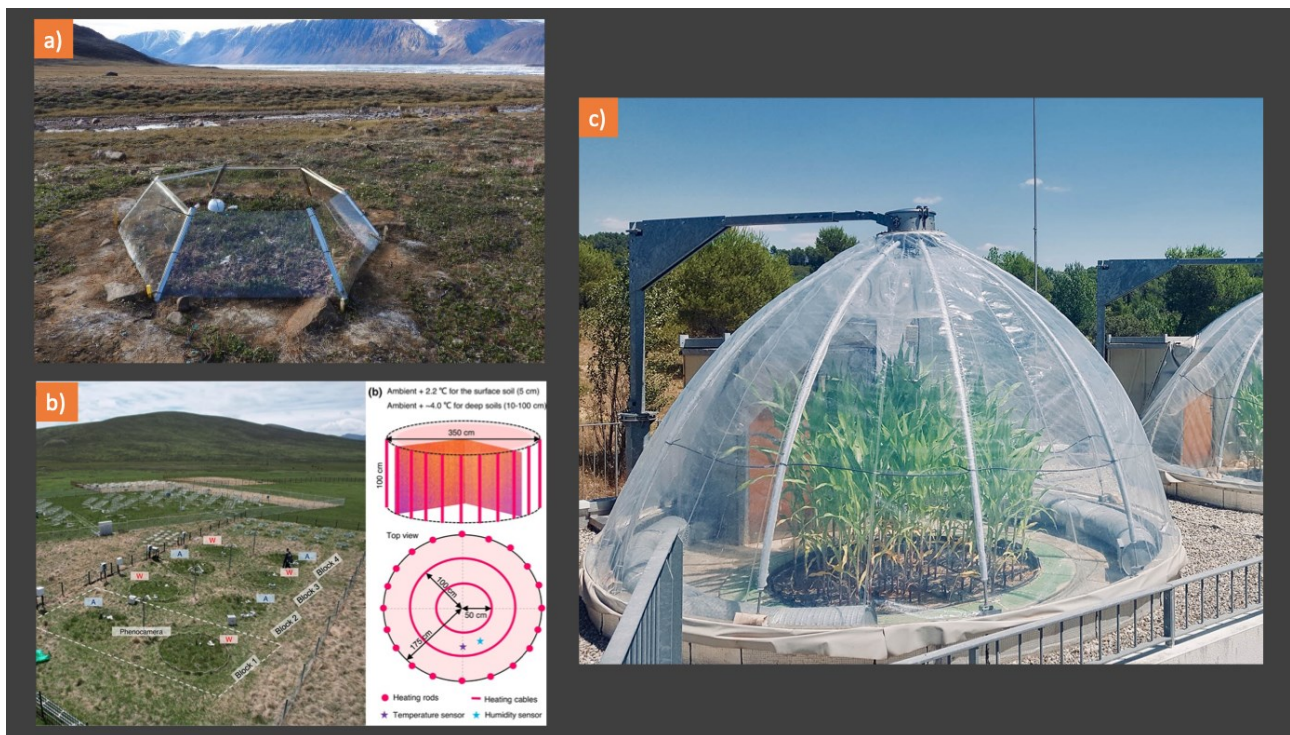
**Aktívne** systémy na rozdiel od tých pasívnych aplikujú **vonkajší zdroj tepla** do systému nad pôdnou vegetáciou, na povrchu alebo vo vnútri (Aronson & McNulty, 2009). Patria sem experimenty vykonávané v teréne, rôzne ekotronové zariadenia, či výskumy realizované prostredníctvom inkubačných techník. Tieto metódy dokážu dostatočne rýchlo regulovať teplotný rozdiel medzi otepľovanými a referenčnými plochami. Menej často sú použité experimenty, ktoré by zahŕňali merania celého pôdneho profilu a popritom by merali zásobníky a toky C (Hicks Pries et al., 2023). Pri aktívnych metódach je dôležitým moderátorom, či dochádza k otepľovaniu pôdy (angl. soil warming) alebo vzduchu (angl. air warming). Existuje široká škála techník na otepľovanie pôdy, ku ktorým patria zahrievacie **káble** alebo **tyče** (Obr. 5b), alebo naopak na otepľovanie vzduchu, pri ktorom sa používajú rôzne dúchadlá a **fény** alebo **infračervené lampy** (Duan et al., 2022).

Viacere z týchto metód sa využívali v rôznych experimentoch a ekosystémoch. Ohrevné káble je možné zakopávať v malých hĺbkach, novšie experimenty však k celoplošným ohrevom začali používať aj dlhé tyče, ktorými je možné dostať do hĺbky až 120 cm (Hicks Pries et al., 2017; Nottingham et al., 2020). Káble a tyče sa však ukázali ako problémové, keďže dochádza k nerovnomernému ohrievaniu medzi radmi káblov. To môže následne ovplyvňovať prúdenie vody, alebo môže pri zakopávaní dôjsť k **porušeniu** koreňov rastlín, čo môže mať za následok narušenie ekosystému (Aronson & McNulty, 2009). Pri experimentoch v otvorených ekosystémoch sa stáva vyhrievanie infračerveným svetlom čoraz vyhl'adávanejším aj vďaka menšiemu narušeniu ekosystémov, ale aj kvôli schopnosti zosilňovať už prirodzené otepľovanie, nevýhodou pri ohrievaní len vzduchu ostáva obmedzenosť dosahu v hlbších pôdnych horizontoch (Aronson & McNulty, 2009).

#### 5.1.2.1 Ekotrony

V posledných rokoch sa čoraz viac diskutuje o možnom medzistupni medzi terénnymi a inkubačnými experimentami. Ekotrony (Obr. 5c) sú zariadenia v tvare komôr, alebo skleníkov využívané na **presnú simuláciu** rôznych faktorov klimatických zmien, zároveň umožňujú opakovanie pokusov za kontrolovaných podmienok (Granjou & Walker, 2016). Uzavreté systémy v porovnaní s prírodnými ekosystémami majú vo všeobecnosti zníženú biologickú a priestorovú komplexnosť, už len tým že sú obklopené stenami.

Výhodou ekotronov je vyrovnávanie sa s týmito problémami prostredníctvom série prvkov, ktorými sa odlišujú od bežných rastových komôr, čím sa dokážu priblížiť **terénnym podmienkam**. Pri zjednodušených systémoch, ktoré sú menšie a neblížia sa k vonkajším podmienkam dochádza častokrát ku skresleniam (Haddad et al., 2017). Jednou z výhod ekotronov je možnosť prenosu veľkých vzoriek, ktoré sú uzavreté vo vlastnej atmosfére a taktiež možnosť stimulácie väčšieho množstva parametrov prostredia (Roy et al., 2021). Ich schopnosť kombinovať väčšie množstvo klimatických aspektov zvyšuje realistikosť riadenia prostredia a ďalej umožňuje stimulovať klimatické extrémny s vyššou **precíznosťou** a **presnosťou** (Roy et al., 2021). Zatiaľ je počet ekotronových experimentov značne obmedzený. Ich vybudovanie je totiž veľmi náročné a nákladné, zároveň však pri porovnávaní experimentov ponúkajú vysokú účinnosť a vysoký stupeň kontroly (Marx, 2023).



**Obrázok 5:** Príklady manipulačných metód výskumu otepľovania na C v pôde. Obrázky prevzaté od [www.colorado.edu](http://www.colorado.edu) b) (Yin et al., 2023) c) [www.ecotron.cnrs](http://www.ecotron.cnrs).

#### 5.1.2.2 Inkubačné zahrievanie pôdy

Aj keď sa výskumy týkajúce sa otepľovania často realizujú v terénnych podmienkach pomocou otvorených komôr, alebo vyhrievacích káblov, ktoré sú výhodné pre zachytenie prirodzených vlastností pôdy, ich využitie je obmedzené vysokými nákladmi na údržbu a inštaláciu (Li et al., 2022). Viac používanou a dostupnejšou metódou sú inkubačné experimenty pri ktorých je meraná pôda vystavovaná rôznym teplotám, ktoré sa dajú lepšie kontrolovať a regulovať a je možné oddeľovať účinky otepľovania od iných mätúcich faktorov v terénnych podmienkach (Li et al., 2022). Citlivosť hlbších pôd na otepľovanie sa testuje primárne prostredníctvom inkubácií v laboratóriách.

Málo štúdií však oddeľuje frakcie POM a MAOM vo svojich experimentoch, zároveň tie ktoré tak urobili pri inkubačných metódach izolovaných frakcií poukázali na vyššiu citlivosť u MAOM oproti POM (Lavallee et al., 2020). Inkubačné metódy sú výhodné, ak sa používajú pri experimentoch v ktorých je potrebné skúmať teplotnú citlivosť **rôznych frakcií**.

#### 5.1.3 Metódy s využitím prirodzených gradientov

Hlavnou neistotou pri predpovediach reakcií SOC na zvyšovanie teploty je neúplné pochopenie teplotnej citlivosti rôznych zásobníkov (Poeplau et al., 2020). Experimenty sú často obmedzené len na jeden typ ekosystému s výraznými rozdielmi v metodike, čím sa myslí typ a stupeň oteplenia (Poeplau et al., 2020). Stratami C dochádza k príspevkom atmosférického CO<sub>2</sub>, ale taktiež môže

dôjsť k zmenám v kvalite pôdy, čo by mohlo ovplyvniť NPP. Týmto súvisiacim mechanizmom sa doteraz venovala len malá pozornosť, aj kvôli tomu že väčšina experimentov prebieha pri miernom oteplení a relatívne krátky čas (Conant et al., 2011).

Preto je potrebné venovať väčšiu pozornosť komplexnému výskumu, ktorý by zahŕňal viacero typov ekosystémov a rôzne stupne teplotných zmien spolu s dlhším trvaním. V tomto kontexte môžu metódy využívajúce prirodzené napr. klimatické, či geotermálne gradienty poskytnúť cenné informácie o dlhodobých reakciách SOC na zmeny teploty v rôznych typoch ekosystémov.

#### 5.1.3.1 Klimatické gradienty

Klimatické gradienty sú určité systematické zmeny v klimatických podmienkach prebiehajúce v rámci určitého územia. V kontexte zvyšujúcej teploty možných dopadov na uložený C v pôde sa tieto gradienty často využívajú ako ďalšia metóda a najčastejšie ide o pozorovanie existujúcich prirodzených gradientov. Štúdia od Lugato et al. (2021) využíva prírodné gradienty naprieč Európou pričom boli zozbierané vzorky pôdy z rozdielnych lokalít, s rozdielnou priemernou ročnou teplotou a úhrnom zrážok. Tieto vzorky boli analyzované na určenie, ako sa rozložený uhlík mení v dvoch hlavných frakciách POM a MAOM v závislosti od rôznych klimatických podmienok. Následne dokázali vytvoriť detailné mapy vývoja pri zvyšujúcej teplote pre obe frakcie POH. Podobný typ štúdie realizovali Georgiou et al. (2024), kde šlo naopak o analýzu v globálnom meradle naprieč rôznymi druhmi ekosystémov.

#### 5.1.3.2 Geotermálne gradienty

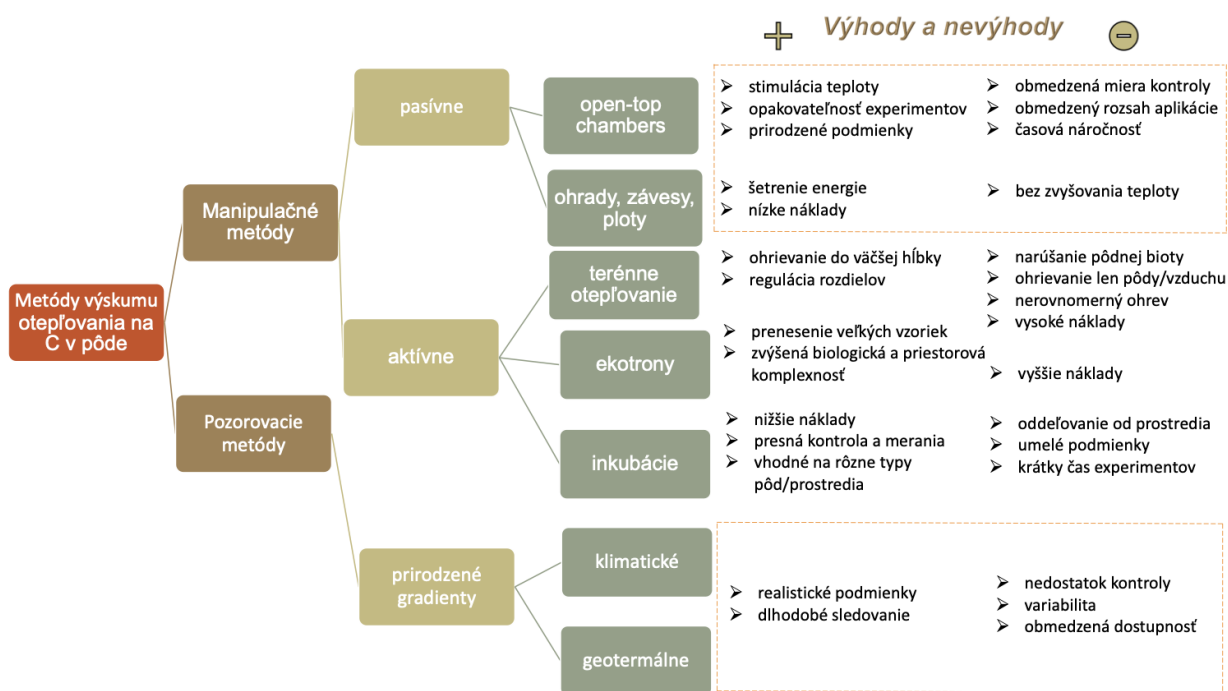
Geotermálne gradienty sú zmeny teploty pôdy určené rôznou vzdialenosťou od geotermálneho prameňa. Výhodou geotermálnych gradientov je možnosť skúmania reakcií pôdy na rýchle oteplenie, ktoré sa často deje skokovo. Zároveň sa však antropogénne otepľovanie zrýchľuje a postupuje a preto je pravdepodobné, že nastanú biologické zmeny na ktoré mnohé druhy nebudú schopné zareagovať, alebo prispôsobiť sa (O’Gorman et al., 2014). V experimente od Poeplau et al., (2020) pracovali s využitím **geotermálnych tokov**, ktoré boli posunuté kvôli zemetraseniu na južnom Islande. Prostredníctvom silných gradientov otepľovania až do 80 °C sa ohrievali dovtedy neohrievané plochy lesných a trávnatých pôd. Výhodou tohto experimentu bola možnosť porovnania reakcie organického uhlíka medzi dvoma ekosystémami, kde došlo k výraznému nárastu teploty.

Dlhodobé štúdie so silnými gradientami otepľovania pôdy, ktoré zároveň porovnávajú viacero ekosystémov sú zlepšením pre pochopenie súvisiacich zmien funkcií pôdy a kolobehu C, aj keď presahujú reálne možné zmeny teploty pri prebiehajúcej globálnej zmene (Kreyling et al., 2014).

### 5.1.4 Metódy – zhrnutie, porovnania a odporúčanie pre ďalší výskum

Manipulačné metódy používané pri výskumoch vplyvu otepľovania na pôdu (obr. 6) sa kategorizujú na pasívne a aktívne, pričom aktívne zahŕňajú zavedenie vonkajších vstupov energie, napr. vonkajší ohrev prostredníctvom tepelných zdrojov alebo aplikáciu kombinácie aspektov, ako sucho, zrážky, alebo zvýšený prísun CO<sub>2</sub>. Pri týchto experimentoch je výhodou veľká miera **presnej kontroly** spolu s rýchlejšim **dosiahnutím výsledkov**. Nevýhodou je finančná náročnosť, narušanie pôdnej bioty a nerovnomerný ohrev pôdy. Pasívne metódy sa naopak spoliehajú na procesy bez akéhokoľvek vstupu energie, pričom sa zachováva prirodzenosť prostredia. Nevýhodou je dlhšia doba vykonávaných experimentov, ktoré sú menej finančne náročné a menej invazívne do prírodných procesov.

Zároveň oddeľovanie zložiek od prirodzeného prostredia môže **skresľovať** presné výsledky. Vhodnou metódou pre ďalšie používanie sa zdajú byť ekotrony, pri ktorých sú odobraté vzorky inkubované ale zároveň sú oddelené oveľa väčšie vzorky a preto môže byť viac zachovaný prirodzený chod ekosystémov.



**Obrázok 6:** Prehľad metód výskumu vplyvu otepľovania na C v pôde, ich výhody a nevýhody.

Nesúlad vo výsledkoch z rôznych štúdií a experimentov a v tom ako reaguje pôda na zvyšovanie teploty môžu spôsobovať **rozdielne metódy merania** ktoré mohli byť využité. V štúdiách je kľúčový teplotný rozsah, dĺžka prebiehajúceho experimentu a hĺbka v ktorej sa pozorovania merajú. Zakomponovať do výskumov pri rozdielnych metódach otepľovania aj stabilitu POH a jej uloženie

v rôznych hĺbkach pôdných horizontov, môže vnieť nové zistenia v chápaní reakcií pôd na otepľovanie.

## 6 Kombinácia teploty s ďalšími prejavmi klimatickej zmeny

**Kombinácie** medzi viacerými faktormi klimatickej zmeny nie sú v súčasnosti dostatočne zahrnuté do prepojených modelov medzi uhlíkom a klímou. V štúdiách sú experimenty často merané len na základe výsledkov z reakcií, ktoré využívali jednofaktorové experimenty (Dieleman et al., 2012a). Je preto potrebné vykonávať priame merania, ktoré skúmajú zmeny zásob C a zároveň zahŕňajú rôzne kombinácie klimatických prejavov spolu s rastúcou teplotou (Tabuľka 2).

Súvislosti medzi rastúcou teplotou, zvyšovaním CO<sub>2</sub> a zmenami v zrážkových režimoch s extrémnejšími vlnami horúčav, alebo sucha podnietili snahy o uskutočnenie kombinujúcich experimentov v terénnych podmienkach (Dietzen et al., 2019; Meeran et al., 2021; Thaysen et al., 2017). **Viacfaktorové** manipulačné experimenty sú oproti tým jednofaktorovým drahšie a taktiež pre svoj výskum potrebujú aspoň dvojnásobnú plochu kvôli ďalšiemu zapojenému faktoru. Aj kvôli tomu sa ekosystémové modely spoliehajú na kombinácie výsledkov z jednofaktorových experimentov (Dieleman et al., 2012b).

### 6.1.1 Sucho a zvýšenie teploty

Za posledných 40 rokov sa výrazne zväčšila celosvetová plocha postihnutá suchom. Sucho prispieva ku znižovaniu produkcie biomasy, keďže dochádza ku zníženiu NPP dôsledkom nedostatku vody a k následnému poklesu vstupov C z opadu a koreňov do pôdy (Deng et al., 2021). Taktiež môže zníženou dostupnosťou vody pre mikroorganizmy dochádzať k obmedzovaniu rozkladu a tým sa **zvýši** zásoba C v opade (Deng et al., 2018). Podľa Deng et al., (2021) sa meta-analýzy zhodujú, že dochádza k zmenám v mikrobiálnom spoločenstve vplyvom sucha, čo vedie aj k zmenám zásob C a emisiám C z pôdy. Táto štúdia uvádza, že substrát vo forme rozpusteného organického C sa akumuluje prevažne v obdobiach sucha. Ďalej sú účinky sucha regulované typmi ekosystémov, intenzitou a trvaním, čo by malo viesť ku stratám hlavne v suchých a vlhkých oblastiach (Deng et al., 2021).

Medzi ďalšie dôležité faktory, ovplyvňujúce dynamiku SOC patrí obsah vody v pôde, keďže voda a jej zásoby v pôde je kľúčová k rastu vegetácie a taktiež kvôli zásobovaniu uhlíkovým substrátom dôležitým pre mikrobiálnu aktivitu v rozličných klimatických podmienkach (Schindlbacher et al., 2012).

**Otepľovanie** spolu so zmenami v **zrážkových režimoch** mení vstupy C z vegetácie a zároveň aj straty z dekompozície pôdnej organickej hmoty, čím sú ovplyvnené zásoby C v pôde (Conant et al., 2011; Davidson & Janssens, 2006).

V teplých klimatických podmienkach vysoký obsah vody stimuluje príjem C, teda jeho produktivitu alebo naopak pôsobí na jeho uvoľňovanie, teda na **pôdnu respiráciu**. Naopak pri nadmernom množstve vody už v relatívne vlhkých podmienkach sú tieto schopnosti potlačené (Davidson & Janssens, 2006). Práve preto zohráva aj obsah vody v pôde jednu z kľúčových úloh pri kontrolách reakcií v cykle C na zmeny klímy. Rôzne štúdie ukazujú, že vysoký obsah vody v suchých a polosuchých stepiach, spôsobí urýchlenie pôdnej respirácie, čo prispieva ku nadmerným únikom C z pôdy (Zhao et al., 2021). Naopak v chladných tropických lesoch môže nadmerná dostupnosť vody spomaľovať celý kolobeh C, pričom v teplých tropických lesoch sa naopak produktivita ekosystému a dekompozícia zvyšuje (Taylor et al., 2017).

Kombinácia zníženého množstva zrážok a s tým spojeným čoraz častejšie sa vyskytujúcim **suchom**, spolu so stúpajúcou teplotou, vedie k úbytku príjmu uhlíka do pôdy, pretože je obmedzený rast rastlín. Tento fakt potvrdzuje aj nedávna meta-analýza od Wei et al., (2023), kde bolo zistené, že rast bol inhibovaný v dôsledku kombinácie sucha a otepľovania. Účinky otepľovania na C by sa zmenili z pozitívnych na negatívne, pri premene pôdy z mokrej na suchú, čím by sa preukázala kľúčová úloha obsahu vody v pôde na prírastok alebo úbytok C vplyvom otepľovania (Reich et al., 2018).

Výsledky v štúdiu od Quana et al.,(2019) naznačujú, že zvýšenou teplotou bol C potlačený v suchých podmienkach a naopak vo vlhkých podmienkach by to stimulovalo jeho príjem. Zistenia poukazujú nato, že obsah vody v pôde je úzko prepojený s cyklom uhlíka a že budúcim otepľovaním by mohol byť tento vzťah komplexnejší (Zhao et al., 2021). Ďalej (Zhao et al., 2021) zdôrazňuje že teplejšie podmienky budú prispievať rozdielnym spätným väzbám a budú závisieť od vlhkostných podmienok daných ekosystémov. Toto tvrdenie potvrdzujú aj nedávne výsledky z 25 ročného experimentu od Wei et al., (2023), kde došlo ku výraznému **zníženiu zásob** C v pôde, naopak pri kombinácii otepľovania a zvýšených zrážkach sa C v pôde akumuloval a zvyšoval.

Pri kombinácií týchto prejavov klimatickej zmeny bol pozorovaný **značný pokles SOC**, pričom kľúčovým aspektom bolo práve sucho a nie zvyšujúca teplota. Rozdielne boli taktiež reakcie C na trávnatých plochách a v lesoch a pri tejto kombinácii aspektov reagovali citlivejšie práve trávnaté ekosystémy (Wei et al., 2023).

Dá sa teda očakávať že regióny v suchších oblastiach budú v podmienkach otepľovania **znižovať** svoju schopnosť **absorpcie** C, čím posilnia pozitívnu spätnú väzbu. Dostatočná dostupnosť vody, môže teda pri teplejšej klíme podporiť rast rastlín a tak **zvyšovať sekvestráciu**, zároveň však sucho



vyvolané zvyšovaním teploty obmedzuje príjem C a respiráciu pôdy v podmienkach kde sa voda stáva limitujúcou (Wang et al., 2022). Inak povedané, sucho vedie k zníženiu prísunu C a zároveň je suchom spomalený rozklad. Pri týchto kontrastných výsledkoch sú dôležitými moderátormi typy ekosystémov a trvania experimentov. Všetky tieto zistenia významne zdôrazňujú význam lepšieho pochopenia vplyvu kombinovaných faktorov, ktoré sú spolu v interakcii. V súčasnom výskume sa ukazujú významné obmedzenia, vrátane nedostatku informácií z hlbších vrstiev pôdy, v nezahrnutí rôznych frakcií pôdy alebo taktiež v nedostatku údajov z rôznych geografických oblastí.

### 6.1.2 CO<sub>2</sub> a zvýšenie teploty

**Narastajúci** obsah CO<sub>2</sub> v atmosfére vo všeobecnosti zvyšuje schopnosť rastu pre rastliny, pričom sa za dominantne ovplyvňujúci faktor považujú živiny prítomné v pôde, ktoré vysvetľujú variabilitu v rámci pokusov (Terrer et al., 2021). Pozitívny vzťah by sa teda dal očakávať, ak by zvyšujúcim CO<sub>2</sub> narastala produkcia rastlín, ktorá by zároveň **zvýšila prísun C** do pôdy. Pôdne procesy ovplyvňuje nepriamo práve napr. interakciami medzi vyšším prívodom C z rastlín, zvýšenou mikrobiálnou aktivitou a biomasou, silnejšími obmedzeniami živín, alebo zmenami vo vodnom režime (Terrer et al., 2021).

V súvislosti s globálnou zmenou je zvyšovanie obsahu CO<sub>2</sub> v atmosfére ďalšou naliehavou výzvou, spôsobuje totiž vzájomne sa ovplyvňujúce komplexné vzťahy v pôde. Lavallee et al., (2020) vo svojej práci popisuje odlišné správanie rôznych frakcií pôdy na nepriame účinky zvýšeného CO<sub>2</sub> na zmeny v kvalite vstupov z opadu z rastlín a koreňovej exudácie a tieto procesy ovplyvňujú odlišné správanie POM a MAOM. Lavallee et al., (2020) uvádza ako príklad, že zvýšený obsah CO<sub>2</sub> vyvolal zvýšenú exudáciu koreňov, čo môže spôsobiť destabilizáciu MAOM, alebo naopak zapríčiniť zrýchlenie dekompozície POM prostredníctvom priming efektu.

Reakcie MAOM na globálne zmeny sú celkovo menšie, čo spôsobuje veľkosť jeho fondu v minerálnych pôdach, ale aj relatívne pomalý čas obratu, ktorý je dlhší ako priemerné dĺžky viacerých experimentov. Výsledky v štúdiu od (Rocci et al., 2021) však boli v rozpore s očakávanými výsledkami a reakcia MAOM na zvýšený obsah CO<sub>2</sub> bola pozitívna v prípade kratších experimentov a naopak negatívna u dlhších.

V štúdiu od Yue et al., (2017) v ktorej sa sústreďovali na rôzne kombinácie prejavov, vykazovalo otepľovanie spolu so zvýšeným prísunom CO<sub>2</sub> **aditívny účinok** a preto pozorovania zaznamenali celkový **nárast** zásob C v pôde. Tento výsledok zároveň potvrdzuje aj novšia meta-analýza od (Dietzen et al., 2019), pričom bol spozorovaný nárast hlavne podzemnej biomasy. Súbor analýz na kombináciu týchto dvoch faktorov teda naznačil výrazný nárast biomasy. Čoraz viac zistení poukazuje nato, že práve zvýšený prísun CO<sub>2</sub> môže prispievať k väčšiemu **toku** uhlíka do pôdy

dôsledkom zvýšenej fotosyntézy a rastu rastlín (Briones et al., 2021; Dietzen et al., 2019). V 8 ročnom experimente s viacfaktorovými experimentami bol kombináciou vyššej teploty spolu s rastúcou koncentráciou CO<sub>2</sub> pozorovaný nárast NPP spolu so zvýšenou respiráciou, ktorá bola ale v menšej miere a preto bol zaznamenaný **celkové zvýšenie C** v pôde (Reich et al., 2020).

Správnou voľbou sa zdajú byť troj, alebo štvorfaktorové experimenty, ktoré by brali do úvahy možné doprovodné zmeny, pretože spomínané sucho spolu so zvýšenou teplotou by spôsobil pokles C v pôde, ako som spomínala vyššie.

### 6.1.3 Požiare a zvyšovanie teploty

Reakcia ekosystémov na tieto zmeny vo frekvencii požiarov bude rozhodujúca pre budúcnosť terestrického zásobníku C, či už sa jedná o častejšie vypaľovanie, alebo naopak dôjde k ich potlačeniu. Emisie C do atmosféry z horiacej biomasy sú dobre pochopené, ale reakcie pôdnych zásobníkov uhlíka a živín sú stále veľmi neisté, pričom tiež ovplyvňujú čistú primárnu produkciu rastlín (Pellegrini et al., 2018).

**Zvýšená frekvencia** požiarov môže taktiež výrazne ovplyvniť dlhodobé ukladanie SOC najmä v trávnatých porastoch, kde sa zintenzívním horením obmedzí prísun živín, dôsledkom čoho bude obmedzený rast rastlín (Bai & Cotrufo, 2022). Znížením biomasy spaľovaním sa menia aj vegetačné modely a celkovo sa znižujú zásoby C uloženého v krajine a naopak zvyšujú rôzne emisie stopových plynov a aerosólov. Tvrdí sa, že fluktuácie v ročných emisiách požiarov globálne patria medzi hlavné faktory ovplyvňujúce tempo nárastu koncentrácií CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> v atmosfére (Bousquet et al., 2006).

Uhlík v pôde po požiaroch je jedným z najviac skúmaných faktorov vzhľadom na jeho významný vplyv na kvalitu pôdy. Zmeny ktoré prebiehajú, sú však **premenlivé** a závisia od dĺžky trvania požiaru, biomasy a jej vlhkosti a aj od intenzity a typu požiaru, pričom môže dôjsť ku strate organickej hmoty, zuhoľnateniu alebo aj ku zvýšeniu SOC (Agbeshie et al., 2022). Požiar a jeho vplyvy sú variabilné a zistenia naznačujú, že požiare s nízkou intenzitou vedú k žiadnej alebo miernej zmene v SOC, naopak pri požiaroch s vysokou intenzitou dochádza **k znižovaniu SOC** (Caon et al., 2014).

Kombinácii zvýšenej teploty spolu so zvýšenou intenzitou požiarov sa venuje len veľmi malá časť výskumov. Tie, ktoré sa zabývali touto kombináciou venovali svoju pozornosť hlavne permafrostu, keďže sa zdajú byť tieto oblasti najviac ohrozené. Experiment od Muñoz-Rojas et al. (2016) poukazuje na vyššiu teplotnú citlivosť pôdnej respirácie po požiaroch, čo potvrdzuje aj štúdia od Aaltonen et al. (2019), pričom poukázali na zvýšenú teplotnú citlivosť aj niekoľko rokov po požiaroch. Tohtoročná štúdia od Xu et al., (2024) zaznamenala, že oblasti postihnuté požiarom sa stali zdrojom

CO<sub>2</sub> do atmosféry, zároveň však v kombinácii s letným otepľovaním sa tieto oblasti stali **prepadom** pre C, keďže došlo k rýchlej obnove vyrastajúcej vegetácie.

Nedostatok experimentov zaoberajúcich sa touto kombináciou aspektov, môže zároveň nadhodnocovať, alebo naopak podhodnocovať možný dopad a tak je nevyhnuté zaradiť aj tieto aspekty do viacfaktorových experimentov. Ďalší výskum by mal svoju pozornosť venovať aj nezamrznutým, nezamokreným pôdam a taktiež oblastiam v ktorých sa očakáva zintenzívnený výskyt požiarov.

**Tabuľka 2:** Vplyv zvyšovania teploty v kombinácií s ďalšími aspektami klimatickej zmeny na organický C v pôde.

Štúdie	Zvýšená teplota v kombinácii s ďalšími aspektami	Vplyv na C v pôde	Typ štúdie	Metódy štúdie	Dĺžky experimentu	Hĺbka pôdy
(Wang et al., 2021)	sucho	↑°C ↑sucho : SOC ↓	meta-analýza	terénne experimenty	<12 mesiacov 12-24 mesiacov >24 mesiacov	do 30 cm
(Wei et al., 2023)	sucho, zrážky	↑°C ↑sucho : SOC ↓ ↑°C ↑zrážky: SOC ↑	meta-analýza	terénne experimenty	25 rokov	do 20 cm
(Dietzen et al., 2019)	zvýšená koncentrácia CO <sub>2</sub>	↑°C ↑CO <sub>2</sub> : SOC ↑	empirická	pasívne- závesy	8 rokov	do 30 cm
(Reich et al., 2020)	zvýšená koncentrácia CO <sub>2</sub> , sucho	↑°C ↑CO <sub>2</sub> : SOC ↑ ↑°C ↑sucho : SOC ↓	empirická	kombinácia terénnych experimentov	8 rokov	do 60 cm
(Meeran et al., 2021)	zvýšená koncentrácia CO <sub>2</sub> ,sucho	↑°C ↑sucho + CO <sub>2</sub> : SOC ↓	empirická	ekotrony	rok	do 60 cm
(Xu et al., 2024)	požiar	↑°C ↑požiar : SOC —	empirická	open-top chambers + inkubácie	4,5 rokov	do 10 cm

## 7 Záver

### 7.1 Vplyv otepľovania na C v pôde

Zvyšujúca teplota ovplyvňuje **vstupy** aj **straty** uhlíka z pôdy. Rastúca teplota priamo ovplyvňuje rastlinnú produkciu a kvalitu organických látok vstupujúcich do pôdy. Zmeny v klíme a zvýšená koncentrácia CO<sub>2</sub> v atmosfére môžu viesť k zvýšenej primárnej produkcii rastlín a tým k **nárastu** organického uhlíka v pôde. Závery ktoré tak učinili, však nezohľadňovali možnosť prebiehajúceho pozitívneho priming efektu, pri ktorom dochádza ešte k výraznejšej **dekompozícii** ako labilného, tak aj stabilného uhlíka uloženého v pôde a celkovo teda ku zvýšeniu strát, ktoré by mohli vyvážiť alebo prevážiť zvýšené vstupy.

Straty sú priamo ovplyvnené zrýchlenou mikrobiálnou aktivitou, čím sa následne pri **zvýšenej dekompozícii** uvoľňuje väčšie množstvo CO<sub>2</sub> do atmosféry. Straty závisia od stability pôdnych frakcií v ktorých je C uložený. Štúdie zohľadňujúce pôdne frakcie, ako je minerálne-asociovaná organická hmota (MAOM) a časticová organická hmota (POM) pomohli priblížiť možné straty naprieč frakciami a poukázali na celkovo **citlivejšiu** frakciu **POM** na klimatické zmeny. Otepľovaním je zaznamenaný väčší pokles vo frakcii POM ako MAOM pričom sa zdá, že dĺžka experimentu spolu s vykonávanou metódou sú dôležitými moderátormi. Straty v **MAOM** sú pozorované v experimentoch trvajúcich dlhšie, pričom tieto poznatky zdôrazňujú potrebu dlhodobých štúdií na porozumenie reakcií pôdnych frakcií na otepľovanie a ich potenciálne dopady na zásoby uhlíka v pôde.

Výskumy prevažne dokumentujú **úbytok** C v pôde pri scenároch zvyšujúcej sa teploty. Avšak vplyv teploty na uhlík v pôde závisí od počiatočných zásob uhlíka a trvania otepľovania. V oblastiach s menšími zásobami je zvýšený rozklad vyvážený rastom rastlín, no v oblastiach s väčšími zásobami **prevyšujú straty** nad akumuláciou, čo vedie k celkovým stratám C v pôde. **Hlboká pôda** reagovala na otepľovanie **rovnako citlivo** ako povrchová pôda, pričom boli porovnávané výskumy mierneho aj tropického pásma, čo naznačuje potenciálne závažné straty uhlíka aj z hlbších pôdnych horizontov naprieč rôznymi biómami.

#### 7.1.1 Metódy

Ako som spomínala, závery výskumov o vplyve otepľovania na zásoby uhlíka v pôde závisia často od **využívaných metód** a od toho či sa jedná o manipulačné alebo prirodzené metódy skúmania. Aktívne metódy zahŕňajú vonkajšie vstupy energie, čo umožňuje presnú kontrolu, ale sú finančne náročné a môžu narušiť pôdnu biotu. Naopak pasívne metódy zachovávajú prirodzené procesy prostredia, sú menej nákladné, ale vyžadujú dlhšiu dobu vykonávania. Metódy využívajúce **ekotony** predstavujú efektívny krok vpred, pretože umožňujú odobratie veľkých vzoriek pôdy,

ktoré následne vystavujú skúmaniu v inkubačných podmienkach. Zároveň sú dobre kontrolované aj pri viacfaktorových výskumoch, kedy sa v experimentoch zohľadňujú aj ďalšie prejavy klimatickej zmeny, čím sa výsledky môžu približovať reálnym dopadom a zmenám. Použitie prirodzených gradientov umožňuje realistické podmienky experimentov, porovnávanie rôznych ekosystémov a klimatických podmienok a taktiež dlhodobé sledovanie a to bez potreby veľkej manipulácie s prostredím.

## 7.2 Kombinácia teploty spolu s ďalšími prejavmi klimatickej zmeny

Zistenia z nedávnych štúdií naznačujú, že kombinácie medzi **viacerými faktormi** klimatickej zmeny nie sú v súčasnosti dostatočne zahrnuté do modelov, čo vedie k obmedzeniam v predpovediach. Priame merania, ktoré zahrňujú rôzne kombinácie klimatických prejavov sú nevyhnutné na lepšie pochopenie týchto interakcií. **Sucho**, zvyšovanie koncentrácie **CO<sub>2</sub>** a zintenzívnené **požiare** spolu s **nárastom teploty** sú dôležitými faktormi ovplyvňujúcimi dynamiku pôdneho organického uhlíka. Sucho spôsobuje znižovanie produkcie biomasy a spomaľuje rast rastlín, čo pri kombinácii so zvýšenou teplotou umocňuje **úbytok C** v pôde. Naopak pri kombinácii rastúcej teploty spolu s **CO<sub>2</sub>** pozorujeme celkový nárast C v pôde a jeho akumuláciu. Štúdie ktoré by venovali svoju pozornosť kombinácií zintenzívnených požiarov spolu s rastúcou teplotou celkovo chýbajú a ak nejaké sú, chýba im komplexnosť porovnania medzi ekosystémami. V trvalo zamrznutých pôdach experimenty teploty spolu s požiarimi vykazovali značné straty C do atmosféry, zároveň však bola pozorovaná rýchlejšia **obnova vegetácie**, čím bola podporená sekvestrácia.

### 7.2.1 Odporúčanie pre ďalší výskum

V rámci výskumu je nevyhnutné zahrnúť dlhodobé sledovania, ktoré sú kľúčové pre hlbšie porozumenie reakcií pôdnych frakcií na otepľovanie a ich potenciálne dopady na zásoby uhlíka v pôde. Paralelne s tým je dôležité skúmať rozdielne frakcie a ich reakcie na zvyšovanie teploty najmä v hlbších vrstvách pôdy. Pri výskume je rovnako dôležité zvážiť použité metódy, ktoré by mali byť dostatočne šetrné, zabezpečujúce dostatočnú kontrolu prostredia a umožňujúce štúdiu viacerých druhov ekosystémov súčasne.

Je nevyhnutné zahrnúť vplyvy rôznych aspektov klimatickej zmeny a ich kombináciu do budúcich modelov, aby sme presnejšie predikovali budúci vývoj pôdneho organického uhlíka a jeho vplyv na klimatický systém. Tento komplexný vzťah medzi klimatickými zmenami a pôdnym uhlíkom si vyžaduje ďalšie dôkladné výskumy a modelovanie, aby sme lepšie porozumeli tomu, ako budú tieto interakcie ovplyvňovať budúci stav pôdnych ekosystémov a globálneho klímy. Zdá sa, že najviac

toho vieme o kombinácií zvyšujúcej teploty spolu so suchom, naopak najmenej sú podrobené skúmaniu kombinácie zvyšovania teploty s požiarmi. Tieto zistenia poukazujú na dôležitosť komplexného výskumu v rôznych ekosystémoch, zohľadnenie rôznych frakcií pôdy a podčiarkujú potrebu dlhodobých štúdií, aby sme porozumeli plnému rozsahu vplyvu otepľovania na zásoby uhlíka v pôde.

## 8 Použitá literatura

- Aaltonen, H., Palviainen, M., Zhou, X., Köster, E., Berninger, F., Pumpanen, J., & Köster, K. (2019). Temperature sensitivity of soil organic matter decomposition after forest fire in Canadian permafrost region. *Journal of Environmental Management*, 241, 637–644. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.130>
- Agbeshie, A. A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., & Awuah, R. (2022). A review of the effects of forest fire on soil properties. In *Journal of Forestry Research* (Vol. 33, Issue 5, pp. 1419–1441). Northeast Forestry University. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4>
- Aronson, E. L., & McNulty, S. G. (2009). Appropriate experimental ecosystem warming methods by ecosystem, objective, and practicality. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(11), 1791–1799. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.007>
- Bai, Y., & Cotrufo, M. F. (2022). *Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions*. <https://doi.org/10.1126/science.abo2380>
- Ballantyne, A. P., Alden, C. B., Miller, J. B., Trans, P. P., & White, J. W. C. (2012). A Newtonian approach to extraordinarily strong negative refraction. *Nature*, 488(7409), 70–73. <https://doi.org/10.1038/nature11299>
- Bardgett, R. D., Bowman, W. D., Kaufmann, R., & Schmidt, S. K. (2005). A temporal approach to linking aboveground and belowground ecology. In *Trends in Ecology and Evolution* (Vol. 20, Issue 11, pp. 634–641). <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.08.005>
- Basile-Doelsch, I., Balesdent, J., & Pellerin, S. (2020). Reviews and syntheses: The mechanisms underlying carbon storage in soil. *Biogeosciences*, 17(21), 5223–5242. <https://doi.org/10.5194/bg-17-5223-2020>
- Beer, C., Reichstein, M., Tomelleri, E., Ciais, P., Jung, M., Carvalhais, N., Rödenbeck, C., Arain, M. A., Baldocchi, D., Bonan, G. B., Bondeau, A., Cescatti, A., Lasslop, G., Lindroth, A., Lomas, M., Luysaert, S., Margolis, H., Oleson, K. W., Rouspard, O., ... Papale, D. (2010). Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. *Science*, 329(5993), 834–838. <https://doi.org/10.1126/science.1184984>
- Bousquet, P., Ciais, P., Miller, J. B., Dlugokencky, E. J., Hauglustaine, D. A., Prigent, C., Van Der Werf, G. R., Peylin, P., Brunke, E. G., Carouge, C., Langenfelds, R. L., Lathière, J., Papa, F., Ramonet, M., Schmidt, M., Steele, L. P., Tyler, S. C., & White, J. (2006). Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability. *Nature*, 443(7110), 439–443. <https://doi.org/10.1038/nature05132>
- Braniš, M., & Hůnová, I. (2009). *Atmosféra a klima. Aktuální otázky znečištění ovzduší*. Praha: Karolinum.
- Briones, M. J. I., Garnett, M. H., & Ineson, P. (2021). No evidence for increased loss of old carbon in a temperate organic soil after 13 years of simulated climatic warming despite increased CO<sub>2</sub> emissions. *Global Change Biology*, 27(9), 1836–1847. <https://doi.org/10.1111/gcb.15540>
- Caon, L., Vallejo, V. R., Coen, R. J., & Geissen, V. (2014). Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 139, pp. 47–58). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.09.001>
- Čapek, P., & Šantrůčková, H. (2016). Proč se vědci obávají odtávání permafrostu. *ŽIVA*, 2, 56–60.



- Carvalhais, N., Forkel, M., Khomik, M., Bellarby, J., Jung, M., Migliavacca, M., Mu, M., Saatchi, S., Santoro, M., Thurner, M., Weber, U., Ahrens, B., Beer, C., Cescatti, A., Randerson, J. T., & Reichstein, M. (2014). Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems. *Nature*, *514*(7521), 213–217. <https://doi.org/10.1038/nature13731>
- Chen, J., Luo, Y., García-Palacios, P., Cao, J., Dacal, M., Zhou, X., Li, J., Xia, J., Niu, S., Yang, H., Shelton, S., Guo, W., & van Groenigen, K. J. (2018). Differential responses of carbon-degrading enzyme activities to warming: Implications for soil respiration. *Global Change Biology*, *24*(10), 4816–4826. <https://doi.org/10.1111/gcb.14394>
- Chen, Y., Han, M., Yuan, X., Zhou, H., Zhao, X., Schimel, J. P., & Zhu, B. (2023). Long-term warming reduces surface soil organic carbon by reducing mineral-associated carbon rather than “free” particulate carbon. *Soil Biology and Biochemistry*, *177*. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108905>
- Conant, R. T., Ryan, M. G., Ågren, G. I., Birge, H. E., Davidson, E. A., Eliasson, P. E., Evans, S. E., Frey, S. D., Giardina, C. P., Hopkins, F. M., Hyvönen, R., Kirschbaum, M. U. F., Lavalley, J. M., Leifeld, J., Parton, W. J., Megan Steinweg, J., Wallenstein, M. D., Martin Wetterstedt, J. Å., & Bradford, M. A. (2011). Temperature and soil organic matter decomposition rates - synthesis of current knowledge and a way forward. In *Global Change Biology* (Vol. 17, Issue 11, pp. 3392–3404). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02496.x>
- Cotrufo, M. F., & Lavalley, J. M. (2022). Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. In *Advances in Agronomy* (Vol. 172, pp. 1–66). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.11.002>
- Crowther, T. W., Todd-Brown, K. E. O., Rowe, C. W., Wieder, W. R., Carey, J. C., MacHmuller, M. B., Snoek, B. L., Fang, S., Zhou, G., Allison, S. D., Blair, J. M., Bridgham, S. D., Burton, A. J., Carrillo, Y., Reich, P. B., Clark, J. S., Classen, A. T., Dijkstra, F. A., Elberling, B., ... Bradford, M. A. (2016). Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature*, *540*(7631), 104–108. <https://doi.org/10.1038/nature20150>
- Dash, P. K., Bhattacharyya, P., Roy, K. S., Neogi, S., & Nayak, A. K. (2019). Environmental constraints’ sensitivity of soil organic carbon decomposition to temperature, management practices and climate change. In *Ecological Indicators* (Vol. 107). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105644>
- Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. In *Nature* (Vol. 440, Issue 7081, pp. 165–173). <https://doi.org/10.1038/nature04514>
- De Deyn, G. B., Cornelissen, J. H. C., & Bardgett, R. D. (2008). Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. In *Ecology Letters* (Vol. 11, Issue 5, pp. 516–531). <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01164.x>
- Deng, L., Peng, C., Kim, D. G., Li, J., Liu, Y., Hai, X., Liu, Q., Huang, C., Shangguan, Z., & Kuzyakov, Y. (2021). Drought effects on soil carbon and nitrogen dynamics in global natural ecosystems. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 214). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103501>

- Deng, L., Peng, C., Zhu, G., Chen, L., Liu, Y., & Shangguan, Z. (2018). Positive responses of belowground C dynamics to nitrogen enrichment in China. *Science of the Total Environment*, 616–617, 1035–1044. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.215>
- Dieleman, W. I. J., Vicca, S., Dijkstra, F. A., Hagedorn, F., Hovenden, M. J., Larsen, K. S., Morgan, J. A., Volder, A., Beier, C., Dukes, J. S., King, J., Leuzinger, S., Linder, S., Luo, Y., Oren, R., De Angelis, P., Tingey, D., Hoosbeek, M. R., & Janssens, I. A. (2012a). Simple additive effects are rare: A quantitative review of plant biomass and soil process responses to combined manipulations of CO<sub>2</sub> and temperature. In *Global Change Biology* (Vol. 18, Issue 9, pp. 2681–2693). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02745.x>
- Dieleman, W. I. J., Vicca, S., Dijkstra, F. A., Hagedorn, F., Hovenden, M. J., Larsen, K. S., Morgan, J. A., Volder, A., Beier, C., Dukes, J. S., King, J., Leuzinger, S., Linder, S., Luo, Y., Oren, R., De Angelis, P., Tingey, D., Hoosbeek, M. R., & Janssens, I. A. (2012b). Simple additive effects are rare: A quantitative review of plant biomass and soil process responses to combined manipulations of CO<sub>2</sub> and temperature. In *Global Change Biology* (Vol. 18, Issue 9, pp. 2681–2693). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02745.x>
- Dietzen, C. A., Larsen, K. S., Ambus, P. L., Michelsen, A., Arndal, M. F., Beier, C., Reinsch, S., & Schmidt, I. K. (2019). Accumulation of soil carbon under elevated CO<sub>2</sub> unaffected by warming and drought. *Global Change Biology*, 25(9), 2970–2977. <https://doi.org/10.1111/gcb.14699>
- Duan, Y., Liu, D., Huang, K., Shou, W., Zhu, F., Liu, Y., Yu, H., Gundersen, P., Kang, R., Wang, A., Han, S., Wang, Z., Zhu, J., Zhu, W., & Fang, Y. (2022). Design and performance of an ecosystem-scale forest soil warming experiment with infrared heater arrays. *Methods in Ecology and Evolution*, 13(9), 2065–2077. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13932>
- Dutta, H., & Dutta, A. (2016). The microbial aspect of climate change. In *Energy, Ecology and Environment* (Vol. 1, Issue 4, pp. 209–232). Joint Center on Global Change and Earth System Science of the University of Maryland and Beijing Normal University. <https://doi.org/10.1007/s40974-016-0034-7>
- Fierer, N., Schimel, J. P., & Holden, P. A. (2003). Variations in microbial community composition through two soil depth profiles. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00251-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00251-1)
- Fontaine, S., Barot, S., Barré, P., Bdioui, N., Mary, B., & Rumpel, C. (2007). Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 450(7167), 277–280. <https://doi.org/10.1038/nature06275>
- Friedlingstein, P., O’sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., ... Zheng, B. (2022). Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, 14(11), 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
- Gabriel, C. E., & Kellman, L. (2014). Investigating the role of moisture as an environmental constraint in the decomposition of shallow and deep mineral soil organic matter of a temperate coniferous soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 68, 373–384. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.10.009>
- Georgiou, K., Koven, C. D., Wieder, W. R., Hartman, M. D., Riley, W. J., Pett-Ridge, J., Bouskill, N. J., Abramoff, R. Z., Slessarev, E. W., Ahlström, A., Parton, W. J., Pellegrini, A. F. A., Pierson, D., Sulman, B. N., Zhu, Q., & Jackson, R. B. (2024). Emergent temperature sensitivity of soil organic carbon driven by

mineral associations. *Nature Geoscience*, 17(3), 205–212. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01384-7>

- German, D. P., Marcelo, K. R. B., Stone, M. M., & Allison, S. D. (2012). The Michaelis-Menten kinetics of soil extracellular enzymes in response to temperature: A cross-latitudinal study. *Global Change Biology*, 18(4), 1468–1479. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02615.x>
- Gillabel, J., Cebrian-Lopez, B., Six, J., & Merckx, R. (2010). Experimental evidence for the attenuating effect of SOM protection on temperature sensitivity of SOM decomposition. *Global Change Biology*, 16(10), 2789–2798. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02132.x>
- Granjou, C., & Walker, J. (2016). Promises that matter: Reconfiguring ecology in the ecotrons. *Science and Technology Studies*, 29(3), 49–67. <https://doi.org/10.23987/sts.58844>
- Grose, M. R., Risbey, J. S., & Whetton, P. H. (2017). Tracking regional temperature projections from the early 1990s in light of variations in regional warming, including ‘warming holes’. *Climatic Change*, 140(2), 307–322. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1840-9>
- Guenet, B., Camino-Serrano, M., Ciais, P., Tifafi, M., Maignan, F., Soong, J. L., & Janssens, I. A. (2018a). Impact of priming on global soil carbon stocks. *Global Change Biology*, 24(5), 1873–1883. <https://doi.org/10.1111/gcb.14069>
- Guenet, B., Camino-Serrano, M., Ciais, P., Tifafi, M., Maignan, F., Soong, J. L., & Janssens, I. A. (2018b). Impact of priming on global soil carbon stocks. *Global Change Biology*, 24(5), 1873–1883. <https://doi.org/10.1111/gcb.14069>
- Guenet, B., Leloup, J., Raynaud, X., Bardoux, G., & Abbadie, L. (2010). Negative priming effect on mineralization in a soil free of vegetation for 80 years. *European Journal of Soil Science*, 61(3), 384–391. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01234.x>
- Haddad, N., Holt, R., Jr Fletcher, R., Loreau, M., & Clobert, J. (2017). *Connecting models, data, and concepts to understand fragmentation’s ecosystem-wide effects*. <https://doi.org/10.1111/ecog.02974i>
- Hartley, I. P., Hill, T. C., Chadburn, S. E., & Hugelius, G. (2021). Temperature effects on carbon storage are controlled by soil stabilisation capacities. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27101-1>
- Hicks Pries, C. E., Castanha, C., Porras, R. C., & Torn, M. S. (2017). *The whole-soil carbon flux in response to warming*. <https://doi.org/10.17040/ISCN/1346192>
- Hicks Pries, C. E., Ryals, R., Zhu, B., Min, K., Cooper, A., Goldsmith, S., Pett-Ridge, J., Torn, M., & Berhe, A. A. (2023). The Deep Soil Organic Carbon Response to Global Change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 2023, 54, 375–401. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102320>
- Hoffland, E., Kuyper, T. W., Comans, R. N. J., & Creamer, R. E. (2020). Eco-functionality of organic matter in soils. In *Plant and Soil* (Vol. 455, Issues 1–2). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04651-9>
- IPCC. (2023). Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis* (pp. 673–816). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.007>

- Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, *10*(2), 423–436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)
- Kleber, M., Eusterhues, K., Keiluweit, M., Mikutta, C., Mikutta, R., & Nico, P. S. (2015). Mineral-Organic Associations: Formation, Properties, and Relevance in Soil Environments. *Advances in Agronomy*, *130*, 1–140. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.005>
- Kögel-Knabner, I., Guggenberger, G., Kleber, M., Kandeler, E., Kalbitz, K., Scheu, S., Eusterhues, K., & Leinweber, P. (2008). Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. In *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* (Vol. 171, Issue 1, pp. 61–82). <https://doi.org/10.1002/jpln.200700048>
- Kögel-Knabner, I., Wiesmeier, M., & Mayer, S. (2022). *Mechanisms of soil organic carbon sequestration and implications for management* (pp. 11–46). <https://doi.org/10.19103/as.2022.0106.02>
- Kreyling, J., Jentsch, A., & Beier, C. (2014). Beyond realism in climate change experiments: Gradient approaches identify thresholds and tipping points. *Ecology Letters*, *17*(1). <https://doi.org/10.1111/ele.12193>
- Kuzyakov, Y., Friedel, J. K., & Stahr, K. (2000). *Review of mechanisms and quantification of priming effects*. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00084-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00084-5)
- Lal, R. (2004). *Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security*. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Lavallee, J. M., Soong, J. L., & Cotrufo, M. F. (2020). Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*, *26*(1), 261–273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. In *Nature* (Vol. 528, Issue 7580, pp. 60–68). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Leifeld, J., & Menichetti, L. (2018). The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies /704/47/4113 /704/106/47 article. *Nature Communications*, *9*(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6>
- Li, J., Areeveso, P., Wang, X., Jian, S., & Gamage, L. (2022). Simulating Temperature in a Soil Incubation Experiment. *Journal of Visualized Experiments*, *2022*(188). <https://doi.org/10.3791/64081>
- Li, J., Pei, J., Pendall, E., Reich, P. B., Noh, N. J., Li, B., Fang, C., & Nie, M. (2020). Rising Temperature May Trigger Deep Soil Carbon Loss Across Forest Ecosystems. *Advanced Science*, *7*(19). <https://doi.org/10.1002/advs.202001242>
- Li, J., Wang, G., Mayes, M. A., Allison, S. D., Frey, S. D., Shi, Z., Hu, X. M., Luo, Y., & Melillo, J. M. (2019). Reduced carbon use efficiency and increased microbial turnover with soil warming. *Global Change Biology*, *25*(3), 900–910. <https://doi.org/10.1111/gcb.14517>
- Li, Y., Zhou, H., Chen, W., Wu, Y., Qiao, L. L., Yan, Z. R., Liu, G. Bin, & Xue, S. (2021). Long-term warming does not affect soil ecoenzyme activity and original microbial nutrient limitation on the Qinghai—Tibet Plateau. *Soil Ecology Letters*. <https://doi.org/10.1007/s42832-021-0116-0>

- Liang, C., Schimel, J. P., & Jastrow, J. D. (2017). The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. In *Nature Microbiology* (Vol. 2, Issue 8). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2017.105>
- Liáng, L. L., Kirschbaum, M. U. F., Arcus, V. L., & Schipper, L. A. (2023). The carbon-quality temperature hypothesis: Fact or artefact? *Global Change Biology*, *29*(4), 935–942. <https://doi.org/10.1111/gcb.16539>
- Liu, F., Qin, S., Fang, K., Chen, L., Peng, Y., Smith, P., & Yang, Y. (2022). Divergent changes in particulate and mineral-associated organic carbon upon permafrost thaw. *Nature Communications*, *13*(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32681-7>
- Liu, S., Zheng, Y., Ma, R., Yu, K., Han, Z., Xiao, S., Li, Z., Wu, S., Li, S., Wang, J., Luo, Y., & Zou, J. (2020). Increased soil release of greenhouse gases shrinks terrestrial carbon uptake enhancement under warming. *Global Change Biology*, *26*(8), 4601–4613. <https://doi.org/10.1111/gcb.15156>
- Lu, M., Zhou, X., Luo, Y., Yang, Y., Fang, C., Chen, J., & Li, B. (2011). Minor stimulation of soil carbon storage by nitrogen addition: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *140*(1–2), 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.12.010>
- Lugato, E., Lavallee, J. M., Haddix, M. L., Panagos, P., & Cotrufo, M. F. (2021). Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter. *Nature Geoscience*, *14*(5), 295–300. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00744-x>
- Luo, Y., Ahlström, A., Allison, S. D., Batjes, N. H., Brovkin, V., Carvalhais, N., Chappell, A., Ciais, P., Davidson, E. A., Finzi, A., Georgiou, K., Guenet, B., Hararuk, O., Harden, J. W., He, Y., Hopkins, F., Jiang, L., Koven, C., Jackson, R. B., ... Zhou, T. (2016). Toward more realistic projections of soil carbon dynamics by Earth system models. *Global Biogeochemical Cycles*, *30*(1), 40–56. <https://doi.org/10.1002/2015GB005239>
- Luo, Z., Luo, Y., Wang, G., Xia, J., & Peng, C. (2020). Warming-induced global soil carbon loss attenuated by downward carbon movement. *Global Change Biology*, *26*(12), 7242–7254. <https://doi.org/10.1111/gcb.15370>
- Marek, M. V. (2022). *Klimatická změna - příčiny, dopady a adaptace*. Praha: Academia.
- Marion, G. M., Henry, G. H. R., Freckman, D. W., Johnstone, J., Jones, G., Jones, M. H., Lévesque, E., Molau, U., Mølgaard, P., Parsons, A. N., Svoboda, J., & Virginia, R. A. (1997). Open-top designs for manipulating field temperature in high-latitude ecosystems. *Global Change Biology*, *3*(SUPPL. 1), 20–32. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1997.gcb136.x>
- Marx, V. (2023). Soil researchers dig deeper into dirt's complexity. In *Nature Methods* (Vol. 20, Issue 8, pp. 1131–1134). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41592-023-01962-4>
- Meeran, K., Ingrisch, J., Reinthaler, D., Canarini, A., Müller, L., Pötsch, E. M., Richter, A., Wanek, W., & Bahn, M. (2021). Warming and elevated CO<sub>2</sub> intensify drought and recovery responses of grassland carbon allocation to soil respiration. *Global Change Biology*, *27*(14), 3230–3243. <https://doi.org/10.1111/gcb.15628>

- Melillo, J. M., Frey, S. D., Deangelis, K. M., Werner, W. J., Bernard, M. J., Bowles, F. P., Pold, G., Knorr, M. A., & Grandy, A. S. (2017). *Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world*. <https://doi.org/10.1126/science.aan2874>
- Melillo, J. M., Frey, S. D., DeAngelis, K. M., Werner, W. J., Bernard, M. J., Bowles, F. P., Pold, G., Knorr, M. A., & Grandy, A. S. (2017). Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world. *Science*, 358(6359), 101–105. <https://doi.org/10.1126/science.aan2874>
- Mikkelsen, T. N., Beier, C., Jonasson, S., Holmstrup, M., Schmidt, I. K., Ambus, P., Pilegaard, K., Michelsen, A., Albert, K., Andresen, L. C., Arndal, M. F., Bruun, N., Christensen, S., Danbæk, S., Gundersen, P., Jørgensen, P., Linden, L. G., Kongstad, J., Maraldo, K., ... Sverdrup, H. (2008). Experimental design of multifactor climate change experiments with elevated CO<sub>2</sub>, warming and drought: The CLIMAITE project. *Functional Ecology*, 22(1), 185–195. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2007.01362.x>
- Moldan, B. (2015). *Podmaněná planeta*. Praha: Karolinum.
- Muñoz-Rojas, M., Lewandrowski, W., Erickson, T. E., Dixon, K. W., & Merritt, D. J. (2016). Soil respiration dynamics in fire affected semi-arid ecosystems: Effects of vegetation type and environmental factors. *Science of the Total Environment*, 572, 1385–1394. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.086>
- Nottingham, A. T., Meir, P., Velasquez, E., & Turner, B. L. (2020a). Soil carbon loss by experimental warming in a tropical forest. *Nature*, 584(7820), 234–237. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2566-4>
- Nottingham, A. T., Meir, P., Velasquez, E., & Turner, B. L. (2020b). Soil carbon loss by experimental warming in a tropical forest. *Nature*, 584(7820), 234–237. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2566-4>
- O’Gorman, E. J., Benstead, J. P., Cross, W. F., Friberg, N., Hood, J. M., Johnson, P. W., Sigurdsson, B. D., & Woodward, G. (2014). Climate change and geothermal ecosystems: Natural laboratories, sentinel systems, and future refugia. *Global Change Biology*, 20(11), 3291–3299. <https://doi.org/10.1111/gcb.12602>
- Pausch, J., & Kuzyakov, Y. (2018). Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. In *Global Change Biology* (Vol. 24, Issue 1, pp. 1–12). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/gcb.13850>
- Pellegrini, A. F. A., Ahlström, A., Hobbie, S. E., Reich, P. B., Nieradzik, L. P., Staver, A. C., Scharenbroch, B. C., Jumpponen, A., Anderegg, W. R. L., Randerson, J. T., & Jackson, R. B. (2018). Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. *Nature*, 553(7687), 194–198. <https://doi.org/10.1038/nature24668>
- Poeplau, C., Sigurdsson, P., & Sigurdsson, B. D. (2020). Depletion of soil carbon and aggregation after strong warming of a subarctic Andosol under forest and grassland cover. *SOIL*, 6(1), 115–129. <https://doi.org/10.5194/soil-6-115-2020>
- Quan, Q., Tian, D., Luo, Y., Zhang, F., Crowther, T. W., Zhu, K., Chen, H. Y. H., Zhou, Q., & Niu, S. (2019). *CLIMATE WATER SCALING OF ECOSYSTEM CARBON CYCLE FEEDBACK TO CLIMATE WARMING*. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav1131>
- Rakshit, A., Abhilash, P. C., Singh, H. B., & Ghosh, S. (2017). Adaptive soil management: From theory to practices. In *Adaptive Soil Management: From Theory to Practices*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-3638-5>

- Reich, P. B., Hobbie, S. E., Lee, T. D., Rich, R., Pastore, M. A., & Worm, K. (2020). Synergistic effects of four climate change drivers on terrestrial carbon cycling. *Nature Geoscience*, *13*(12), 787–793. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-00657-1>
- Reich, P. B., Sendall, K. M., Stefanski, A., Rich, R. L., Hobbie, S. E., & Montgomery, R. A. (2018). Effects of climate warming on photosynthesis in boreal tree species depend on soil moisture. *Nature*, *562*(7726), 263–267. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0582-4>
- Rocci, K. S., Lavallee, J. M., Stewart, C. E., & Cotrufo, M. F. (2021). Soil organic carbon response to global environmental change depends on its distribution between mineral-associated and particulate organic matter: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, *793*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148569>
- Roe, S., Streck, C., Beach, R., Busch, J., Chapman, M., Daioglou, V., Deppermann, A., Doelman, J., Emmet-Booth, J., Engelmann, J., Fricko, O., Frischmann, C., Funk, J., Grassi, G., Griscom, B., Havlik, P., Hanssen, S., Humpenöder, F., Landholm, D., ... Lawrence, D. (2021). Land-based measures to mitigate climate change: Potential and feasibility by country. *Global Change Biology*, *27*(23), 6025–6058. <https://doi.org/10.1111/gcb.15873>
- Roy, J., Rineau, F., De Boeck, H. J., Nijs, I., Pütz, T., Abiven, S., Arnone, J. A., Barton, C. V. M., Beenaerts, N., Brüggemann, N., Dainese, M., Domisch, T., Eisenhauer, N., Garré, S., Gebler, A., Ghirardo, A., Jasoni, R. L., Kowalchuk, G., Landais, D., ... Milcu, A. (2021). Ecotrons: Powerful and versatile ecosystem analysers for ecology, agronomy and environmental science. In *Global Change Biology* (Vol. 27, Issue 7, pp. 1387–1407). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/gcb.15471>
- Rumpel, C., & Kögel-Knabner, I. (2011). Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, *338*(1), 143–158. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0391-5>
- Schindlbacher, A., Wunderlich, S., Borken, W., Kitzler, B., Zechmeister-Boltenstern, S., & Jandl, R. (2012). Soil respiration under climate change: Prolonged summer drought offsets soil warming effects. *Global Change Biology*, *18*(7), 2270–2279. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02696.x>
- Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D. A. C., Nannipieri, P., Rasse, D. P., Weiner, S., & Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. In *Nature* (Vol. 478, Issue 7367, pp. 49–56). <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Schnecker, J., Borken, W., Schindlbacher, A., & Wanek, W. (2016). Little effects on soil organic matter chemistry of density fractions after seven years of forest soil warming. *Soil Biology and Biochemistry*, *103*, 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.09.003>
- Serreze, M. C., Walsh, J. E., Chapin Iii, F. S., Osterkamp, T., Dyurgerov, M., Romanovsky, V., Oechel, W. C., Morison, J., Zhang, T., & Barry, R. G. (2000). *Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment*. <https://doi.org/10.1023/A:1005504031923>
- Sierra, C. A., Trumbore, S. E., Davidson, E. A., Vicca, S., & Janssens, I. (2015). Sensitivity of decomposition rates of soil organic matter with respect to simultaneous changes in temperature and moisture. In *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* (Vol. 7, Issue 1, pp. 335–356). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/2014MS000358>

- Sim, T. G., Swindles, G. T., Morris, P. J., Baird, A. J., Cooper, C. L., Gallego-Sala, A. V., Charman, D. J., Roland, T. P., Borken, W., Mullan, D. J., Aquino-López, M. A., & Gałka, M. (2021). Divergent responses of permafrost peatlands to recent climate change. *Environmental Research Letters*, *16*(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe00b>
- Šimek, M. (2019). *Živá půda*. Praha: Academia.
- Smith, P., Fang, C., Dawson, J. J. C., & Moncrieff, J. B. (2008). Impact of Global Warming on Soil Organic Carbon. In *Advances in Agronomy* (Vol. 97, pp. 1–43). [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(07\)00001-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(07)00001-6)
- Soong, J. L., Castanha, C., Hicks Pries, C. E., Ofiti, N., Porras, R. C., Riley, W. J., Schmidt, M. W. I., & Torn, M. S. (2021). Five years of whole-soil warming led to loss of subsoil carbon stocks and increased CO<sub>2</sub> efflux. In *Sci. Adv* (Vol. 7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1343>
- Soong, J. L., Phillips, C. L., Ledna, C., Koven, C. D., & Torn, M. S. (2020). CMIP5 Models Predict Rapid and Deep Soil Warming Over the 21st Century. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *125*(2). <https://doi.org/10.1029/2019JG005266>
- Taylor, P. G., Cleveland, C. C., Wieder, W. R., Sullivan, B. W., Doughty, C. E., Dobrowski, S. Z., & Townsend, A. R. (2017). Temperature and rainfall interact to control carbon cycling in tropical forests. In *Ecology Letters* (Vol. 20, Issue 6, pp. 779–788). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/ele.12765>
- Terrer, C., Phillips, R. P., Hungate, B. A., Rosende, J., Pett-Ridge, J., Craig, M. E., van Groenigen, K. J., Keenan, T. F., Sulman, B. N., Stocker, B. D., Reich, P. B., Pellegrini, A. F. A., Pendall, E., Zhang, H., Evans, R. D., Carrillo, Y., Fisher, J. B., Van Sundert, K., Vicca, S., & Jackson, R. B. (2021). A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO<sub>2</sub>. *Nature*, *591*(7851), 599–603. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03306-8>
- Thaysen, E. M., Reinsch, S., Larsen, K. S., & Ambus, P. (2017). Decrease in heathland soil labile organic carbon under future atmospheric and climatic conditions. *Biogeochemistry*, *133*(1), 17–36. <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0303-3>
- von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E., & Marschner, B. (2007). SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*, *39*(9), 2183–2207. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.03.007>
- Wang, B., Chen, Y., Li, Y., Zhang, H., Yue, K., Wang, X., Ma, Y., Chen, J., Sun, M., Chen, Z., & Wu, Q. (2021). Differential effects of altered precipitation regimes on soil carbon cycles in arid versus humid terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, *27*(24), 6348–6362. <https://doi.org/10.1111/gcb.15875>
- Wang, M., Guo, X., Zhang, S., Xiao, L., Mishra, U., Yang, Y., Zhu, B., Wang, G., Mao, X., Qian, T., Jiang, T., Shi, Z., & Luo, Z. (2022). Global soil profiles indicate depth-dependent soil carbon losses under a warmer climate. *Nature Communications*, *13*(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33278-w>
- Wei, X., Van Meerbeek, K., Yue, K., Ni, X., Desie, E., Heděnc, P., Yang, J., & Wu, F. (2023). Responses of soil C pools to combined warming and altered precipitation regimes: A meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, *32*(9), 1660–1675. <https://doi.org/10.1111/geb.13719>
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H. J., & Kögel-Knabner, I. (2019). Soil



organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. In *Geoderma* (Vol. 333, pp. 149–162). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>

Xu, W., Elberling, B., & Ambus, P. L. (2024). Long-term summer warming reduces post-fire carbon dioxide losses in an arctic heath tundra. *Agricultural and Forest Meteorology*, *344*.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109823>

Yin, R., Qin, W., Wang, X., Xie, D., Wang, H., Zhao, H., Zhang, Z., He, J. S., Schädler, M., Kardol, P., Eisenhauer, N., & Zhu, B. (2023). Experimental warming causes mismatches in alpine plant-microbe-fauna phenology. *Nature Communications*, *14*(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37938-3>

Yue, K., Fornara, D. A., Yang, W., Peng, Y., Peng, C., Liu, Z., & Wu, F. (2017). Influence of multiple global change drivers on terrestrial carbon storage: additive effects are common. *Ecology Letters*, *20*(5), 663–672. <https://doi.org/10.1111/ele.12767>

Zhang, X. Z., Shen, Z. X., & Fu, G. (2015). A meta-analysis of the effects of experimental warming on soil carbon and nitrogen dynamics on the Tibetan Plateau. *Applied Soil Ecology*, *87*, 32–38.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.11.012>

Zhao, F., Wu, Y., Hui, J., Sivakumar, B., Meng, X., & Liu, S. (2021). Projected soil organic carbon loss in response to climate warming and soil water content in a loess watershed. *Carbon Balance and Management*, *16*(1). <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00187-2>

Zhou, T., Shi, P., Hui, D., & Luo, Y. (2009). Global pattern of temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration (Q<sub>10</sub>) and its implications for carbon-climate feedback. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *114*(2). <https://doi.org/10.1029/2008JG000850>