

# Význam statkových hnojiv pro udržitelné obhospodařování zemědělské půdy v podmínkách změny klimatu (kvalita a zdraví půdy)

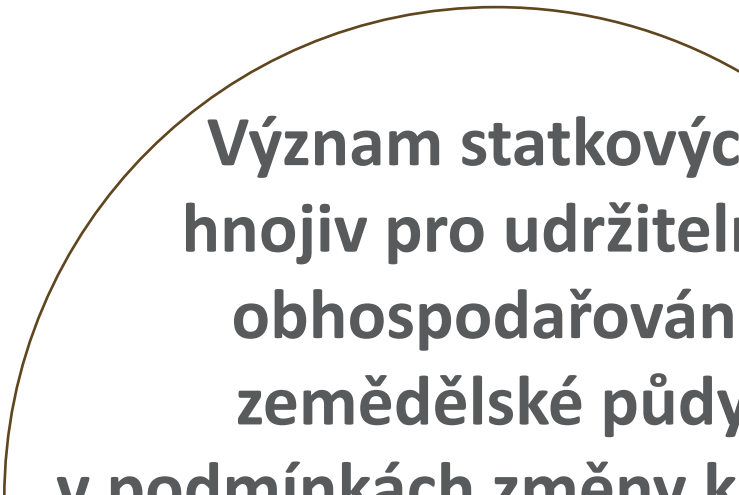
---

Ladislav Menšík  
Eva Kunzová  
a kol.

2023







# **Význam statkových hnojiv pro udržitelné obhospodařování zemědělské půdy v podmínkách změny klimatu (kvalita a zdraví půdy)**

---

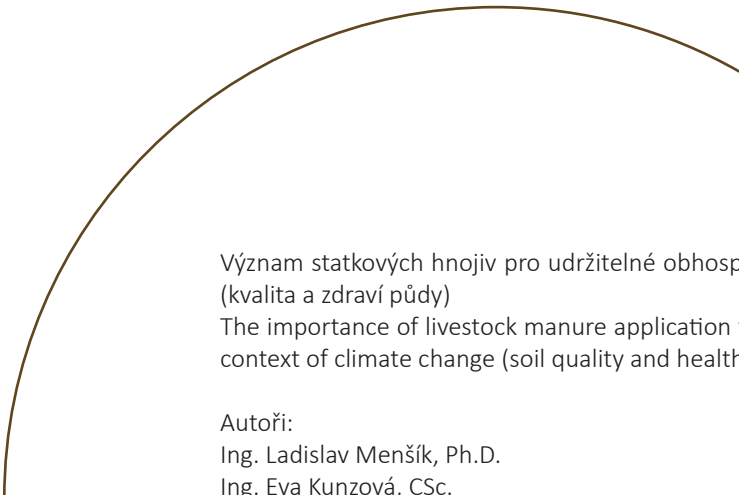
Ladislav Menšík  
Eva Kunzová  
a kol.

Motto

„Způsob, jakým půdu využíváme, musí umožňovat život v blízké budoucnosti.“

(Hans Ruh, Fritz Brugger, Charles Schenk: Etik und Boden /Etika a Půda/)

**2023**



Význam statkových hnojiv pro udržitelné obhospodařování zemědělské půdy v podmínkách změny klimatu (kvalita a zdraví půdy)

The importance of livestock manure application for the sustainable management of agricultural land in the context of climate change (soil quality and health)

Autoři:

Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.

Ing. Eva Kunzová, CSc.

Ing. Lukáš Hlisenkovský, Ph.D.

Ing. Pavel Nerušil, Ph.D.

doc. RNDr. Lubica Pospíšilová, CSc.

Ing. Jana Plisková

Ing. Václav Voltr, CSc.

Ing. Tomáš Šimon, CSc.

RNDr. Mikuláš Madaras, Ph.D.

Recenzenti:

Ing. Václav Kadlec, Ph.D.

Dr. Ing. Milan Sářka

prof. Ing. Jiří Kulhavý, CSc.

Vydal: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.

Autor fotografií na obálce: Ladislav Menšík

Grafika: Česká technologická platforma pro zemědělství

Tisk: SYNERGIE: 4U s.r.o., Praha

Podpora řešení projektu:

Vydání publikace bylo umožněno díky podpoře dlouhodobé koncepce rozvoje výzkumné organizace (DKRVO) RO-0423, RO-0418 a dále projektům NAZV: QK21010124 „Půdní organická hmota – hodnocení vybraných indikátorů kvality“, QK21020155 „Nástroj pro hospodaření se živinami a organickými látkami“ a QK23020056 „Vytvoření a ověření modelových systémů dlouhodobé sekvestrace uhlíku v ČR“. Tisk monografie byl umožněn za podpory Ministerstva zemědělství ČR při České technologické platformě pro zemědělství.

Distribuce: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.

Toto dílo včetně všech svých částí je zákonem chráněno. Každé jeho užití mimo úzké hranice zákona je nepřípustné. To se týká zejména reprodukování či rozšiřování jakýmkoliv způsobem (včetně mechanického, fotografického či elektronického), ale také ukládání v elektronické formě pro účely rešeršní či jiné. K jakémukoli využití díla je proto nutný písemný souhlas hlavního autora zastupujícího autorský kolektiv.

Vydání: první

Rok vydání: 2023

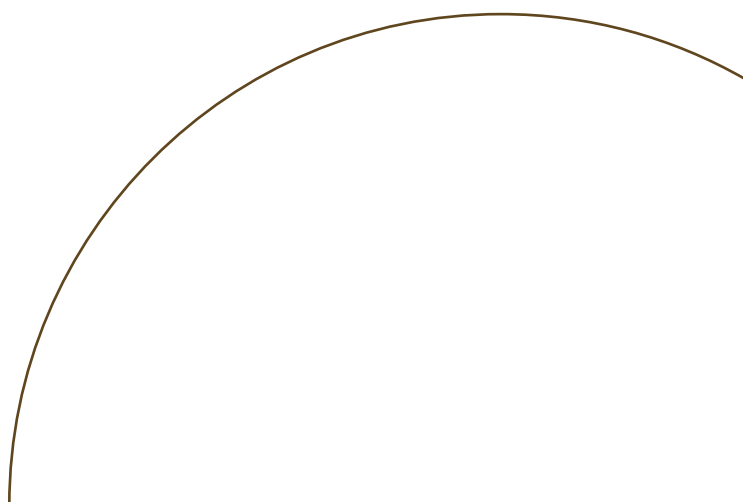
Náklad: 250 výtisků

© Ladislav Menšík, Eva Kunzová, Lukáš Hlisenkovský, Pavel Nerušil, Lubica Pospíšilová, Jana Plisková, Václav Voltr, Tomáš Šimon, Mikuláš Madaras

© Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.

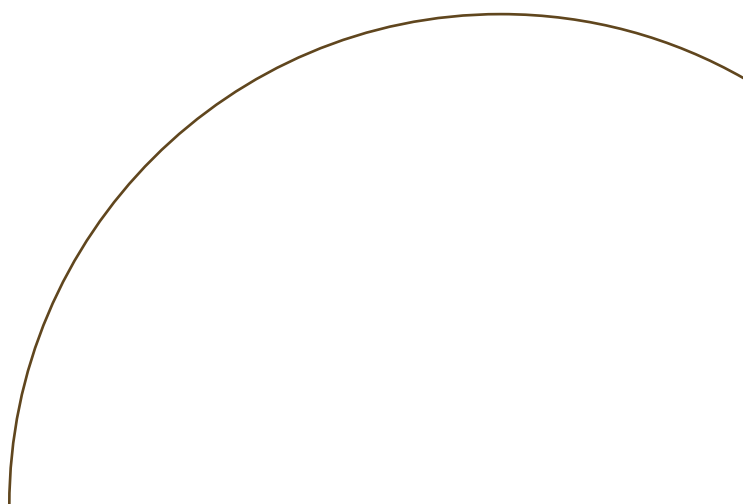
ISBN 978-80-7427-428-2 (Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.)





## OBSAH

|                                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Úvod                                                                                                                                                                                                  | 6  |
| 2 Přehled řešené problematiky                                                                                                                                                                           | 8  |
| 3 Představení řešení projektu a cíl monografie                                                                                                                                                          | 16 |
| 4 Dílčí studie                                                                                                                                                                                          | 17 |
| 4.1. Vliv dlouhodobé aplikace minerálních (NPK) a statkových (hnůj, kejda) hnojiv na základní chemické vlastnosti půdy /<br>půdní organická hmota, živiny, půdní reakce/                                | 17 |
| 4.2. Stav půdní organické hmoty a živin v dlouhodobém polním experimentu s aplikací organických a minerálních hnojiv<br>v různých půdně-klimatických podmínkách ČR s ohledem na očekávané změny klimatu | 22 |
| 4.3. Vliv hnojení TTP statkovými a minerálními hnojivy na půdu                                                                                                                                          | 30 |
| 4.4. Monitoring stavu půdní organické hmoty v zemědělských podnicích v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské<br>vrchoviny                                                                               | 35 |
| 4.5. Tvorba organické hmoty v půdě v závislosti na vlastnostech půdy a aplikaci různých hnojiv v 10letém provozním<br>pokusu                                                                            | 40 |
| 4.6. Modelování změn obsahu půdní organické hmoty v orných půdách ČR                                                                                                                                    | 47 |
| 5 Diskuse                                                                                                                                                                                               | 54 |
| 6 Doporučení pro praxi                                                                                                                                                                                  | 57 |
| Souhrn                                                                                                                                                                                                  | 59 |
| Summary                                                                                                                                                                                                 | 60 |
| Použitá literatura                                                                                                                                                                                      | 62 |
| Seznam obrázků, tabulek a zkratk                                                                                                                                                                        | 74 |
| Poděkování                                                                                                                                                                                              | 77 |
| Přílohy                                                                                                                                                                                                 | 78 |



## 1 ÚVOD

Nedostatek potravin je významným celosvětovým problémem (Fears et al. 2019, Hadley et al. 2023), protože zemědělskému systému (zemědělství) stále chybí pokročilá a účinná zemědělská, ale i inženýrské technologie (Balasundram et al. 2023). Podle výroční zprávy organizace OSN pro výživu a zemědělství (FAO)<sup>1</sup> mělo v roce 2020 30,4 % světové populace určitý stupeň potravinové nejistoty /nedostatku potravin/. Dále se očekává, že v příštích 40-ti letech dojde k výraznému nárůstu počtu obyvatel přibližně o 35 % (UN 2022). Proto bude nutné podstatně zvýšit zemědělskou produkci (Tilman et al. 2002, Godfray et al. 2010, Urruty et al. 2016), aby byly zajištěny potřeby pro rostoucí populaci (Penuelas et al. 2023). Zatím není jasné, zda-li bude budoucí celosvětová produkce potravin dostatečná k uspokojení této poptávky z pohledu současné globální klimatické změny /GZK; angl. „climate change“/ (NOAA 2019, WMO 2021). V důsledku probíhající GZK, změněných srážkových poměrů, výskytu period sucha a zvýšení četnosti extrémních jevů má již v současnosti tento stav velmi negativní dopady na potravinovou bezpečnost tím, že snižuje výnosy zemědělských plodin, zpomaluje rychlost růstu a produktivitu hospodářských zvířat a dále významně ovlivňuje půdní vlastnosti včetně koloběhu látek a vody apod. (Agovino et al. 2019, Malhi et al. 2021). Očekává se ale, že většina nárůstu (zemědělské produkce) bude muset pocházet z produkce většího množství potravin (krmiv) na stávající zemědělské půdě (tj. z intenzifikace), i když bude pravděpodobně zapotřebí určitá nová zemědělská půda (FAO 2017). Vyšší rostlinnou produkci je možné v současné době zajistit jen díky intenzivnímu obhospodařování půdy (Oldfield et al. 2019) pomocí postupů, jako je např. zavlažování, ale i hnojení minerálními hnojivy bez přídavku statkových (organických) hnojiv (Menšík et al. 2018, 2019a). Intenzifikace zemědělství a její rozšiřování bez kvalitního hnojení statkovými

hnojivy /angl. „livestock manure“/ (hnůj<sup>2</sup>, kejda<sup>3</sup>) však povede k nežádoucím dopadům na zásoby uhlíku (C), dusíku (N), železa, rizikových prvků v půdě, ale i na další fyzikálně-chemické vlastnosti půdního prostředí /půdní reakce, kationtová výměnná kapacita apod./ (Rayne and Aula 2020). Dále bude mít vliv na vegetaci i na biologickou rozmanitost v nejproduktivnějších zemědělských oblastech světa (Chang et al. 2021).

V současném precizním zemědělství (PZ), ale i konvenčním zemědělství je úrodnost půdy důležitým faktorem ovlivňujícím růst rostlin (Munawar et al. 2020, Javadi et al. 2021). Úrodnost půdy je určena obsahem půdní organické hmoty (angl. „Soil Organic Matter“, dále jen SOM<sup>4</sup>) v půdě (Lal 2020a) a přítomností živin, a to jak makroživin, tak i mikroživin (Munawar et al. 2021). Úbytky obsahu organické hmoty v půdě jsou považovány za jeden z nejvýznamnějších faktorů procesu degradace půd v obecném pojetí. Jsou způsobovány především větrnou a vodní erozí, nedostatečným přísunem kvalitních statkových a organických hnojiv do půd a nesprávným hospodařením na půdě (Pariante and Lavee 1996, Bispo et al. 2017, Rutkowska and Pikula 2018, Lal 2020b).

Zejména SOM, resp. půdní organický uhlík (angl. „soil organic carbon“, dále jen SOC) jsou klíčovými parametry při hodnocení kvality, resp. úrodnosti půdy (Doran 2002, Lal 2016, 2021, Voltr et al. 2021) v suchozemských ekosystémech a agroekosystémech. SOM je klíčovou složkou půdy a má zásadní význam pro půdní úrodnost, ochranu životního prostředí i udržitelný rozvoj zemědělství (Shi et al. 2015, Chen et al. 2020, Hu et al. 2023). Množství a kvalita SOM (obsah SOC, obsah stabilních humusových látek /HL/, huminových kyselin /HK/ a fulvokyselin /FK/) jsou dva základní pilíře půdní úrodnosti (Kopecký et al. 2022).

<sup>1</sup> UN Food and Agriculture Organization International Fund for Agricultural Development UNICEF UN World Food Programme WHO The state of food security and nutrition in the world 2021. <https://www.fao.org/3/cb4474en/online/cb4474en.html>

<sup>2</sup> Chlévský hnůj je zušlechtěná směs podestýlky s tuhými a tekutými výkaly hospodářských zvířat. Chlévská mrvka je substrát nezušlechtěný, tj. získaný po vyvezení stáji, teprve fermentací (zráním) z ní vzniká chlévský hnůj (Duchoň 1948).

<sup>3</sup> Kejda je částečně prokvašená směs pevných a tekutých výkalů hospodářských zvířat zředěná vodou. Podle původu se může jednat o kejdu skotu, prasat a drůbeže. Kejda vzniká v bezsteli-vových provozech (Duchoň 1948).

<sup>4</sup> Půdní organická hmota (SOM) představuje souhrn všech neživých organických součástí půdy v různém stupni rozkladu a v různém stupni smísení s minerálním podílem (Stevenson 1994).

Kvalitu a množství SOM ovlivňuje mnoho faktorů, jako je například střídání plodin, agrotechnický přístup (systém orby nebo bez orby), hnojení, zavlažování atd. (Balík et al. 2023).

V posledních 25-ti letech jsme v České republice svědky zhoršení kvality přírodních zdrojů, na kterých je zemědělská činnost závislá, kdy dochází k negativnímu ovlivnění půdy (degradaci). Tyto změny v kvalitě půdního prostředí a úrodnosti půd v ČR se projevují: (a) ve struktuře pěstovaných plodin a osevních postupech (snížení podílu víceletých píceň /vojtěška, jetel/ [index 1990/2022: 41,6 %], obiloviny [index 1990/2022: 83,9 %] ve prospěch tržních plodin /olejiny/ [index 1990/2022: 336,2 %]); (b) drastická redukce živočišné výroby (skot [index 1990/2022: 40,5 %], prasata [index 1990/2022: 29,9 %], ovce [index 1990/2022: 10,5 %], drůbež [index 1990/2022: 71,9 %]) s výraznými rozdíly mezi regiony /krají/ (rozlehlé oblasti bez živočišné výroby) - průměrné zatížení 0,37 DJ.ha<sup>-1</sup> zemědělské půdy; (c) velmi nízký vstup do půdy statkových hnojiv (hnůj, kejda, apod.), velmi nízký vstup živin ze statkových hnojiv do půdy (průměrný přívod živin /N; P; K/ ve statkových hnojivech živočišného původu [index 1990/2022: 67,5; 60,5; 57,4 %]; (d)

nízké vstupy minerálních živin P a K [index 1990/2022: 23,2; 20,0 %]; (e) vstupy dusíku z minerálních živin [index 1990/2020: 85,9 %] (CZSO 2023).

Všechny tyto vlivy představují rizika pro půdní úrodnost a kvalitu půdy z hlediska agronomického a jsou umocněny GZK. Konkrétní dopady těchto negativních jevů se projevují postupným snižováním celkového organického uhlíku v půdě, respektive snížením obsahu a kvality humusových látek (HK, FK), což vede ke zhoršování fyzikálních, chemických i biologických vlastností a tím dochází ke snížení produkční schopnosti půdy.

Současným, resp. budoucím cílem však musí být udržitelná intenzifikace zemědělské výroby (Tilman et al. 2011, Garnett et al. 2013, Rockström et al. 2017, Approaches 2019, Xie et al. 2019) /stabilizace nynějších výnosů při současném snížení dopadu zemědělství na životní prostředí/ se zaměřením na udržení současné kvality a zdraví půdy /angl. „Soil Health“/ (Oliver and Gregory 2015, Terry and Ryan 2015, Rojas et al. 2016, Rehman and Maqbool 2017, Chiranjeeb et al. 2020, Rayne and Aula 2020, Cárceles Rodríguez et al. 2022).

## 2 PŘEHLED ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Globální potravinová bezpečnost je v 21. století stále ohrožena souběhem rostoucí poptávky po potravinách v důsledku rostoucí populace a neschopnosti současného systému produkce potravin uspokojit rostoucí poptávku v důsledku GZK, zhoršující se úrodnosti půdy, stagnace výnosů světových obilovin, kontaminací půdy a problémů s dostupností vody v půdě atd. (Lal 2017, 2020c, Dillard 2019, Rahut et al. 2022). Stojíme proto před velkou výzvou, jak nakrmit masivně narůstající podvyživenou populaci s omezenou dostupností potravinových zdrojů a dále jak udržet současnou kvalitu a zdraví půdy, negativně ovlivněnou aplikací chemických přípravků, minerálních hnojiv a souvisejícím rizikem kontaminace půdy, dále erozí půdy a poklesem její úrodnosti a klesajícími zásobami organického uhlíku, sníženou biologickou rozmanitostí apod. (Walter Stinner et al. 2018) v rychle se měnících podmínkách prostředí, způsobenou GZK (Meena and Lal 2018) viz obr. 2.1.

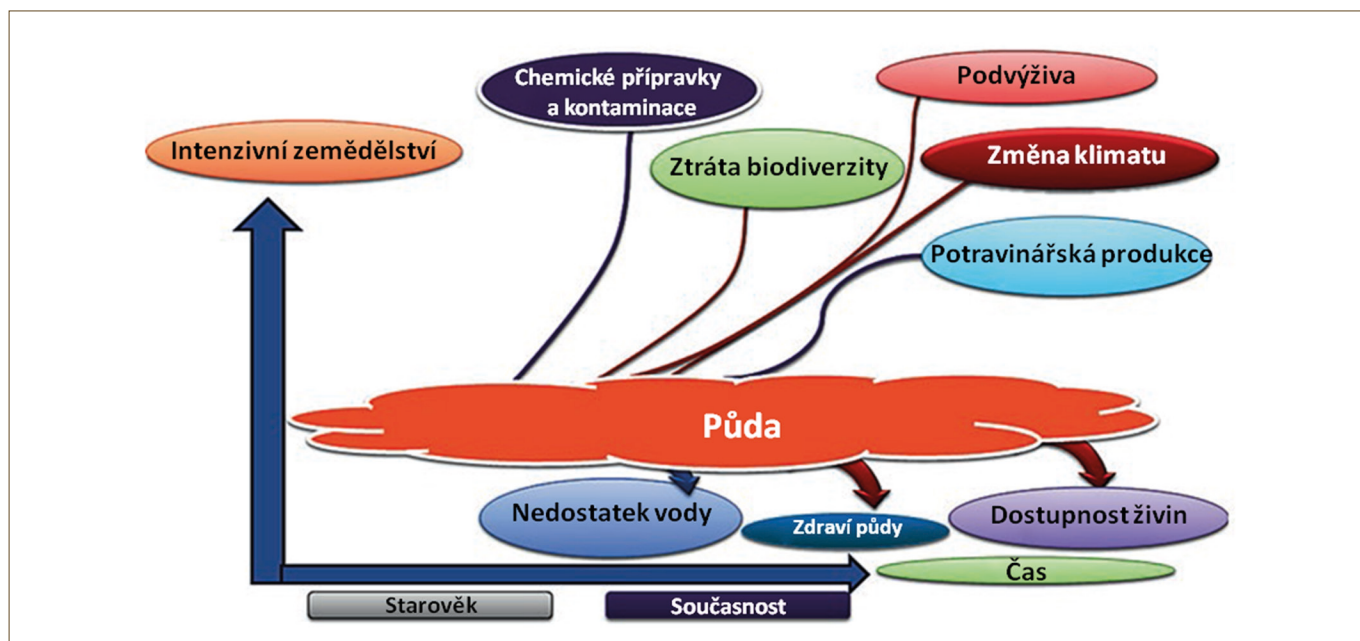
### Půda

Půda je základním, omezeným a neobnovitelným zdrojem výroby potravin, krmiv, ale také energie, a je přírodním zdrojem

nezbytným pro život člověka (Bogunovic et al. 2023). Zdravá půda je základním kamenem pro dosažení potravinové bezpečnosti a podporuje environmentální udržitelnost současného zemědělství (Mahmood et al. 2023). V posledním desetiletí se celosvětově prosadil koncept kvality a zdraví půdy (angl. „Soil Health“), který popisuje biologické, chemické a fyzikální funkce půdy, včetně jejich úlohy v udržitelné produkci plodin (Lehmann et al. 2020, Wood and Blankinship 2022). Produkční schopnost půdy je tedy přímo závislá na stavu fyzikálních, chemických a biologických vlastností, které jsou prostorově a časově proměnné (Karlen et al. 1997, Amin et al. 2020). Proto je naše chápání jejich vlastností, funkcí a variability v prostoru a času pro udržitelné hospodaření s půdou zásadní (Grego and Lagomarsino 2008a, Lal 2008; Rockström et al. 2017, Approaches 2019).

### Půda – půdní organická hmota (SOM)

Půdní organická hmota (SOM) hraje jednu z nejdůležitějších rolí v suchozemských ekosystémech a především v agro-ekosystémech. Obsah SOM, resp. SOC v půdě závisí na antropogenních



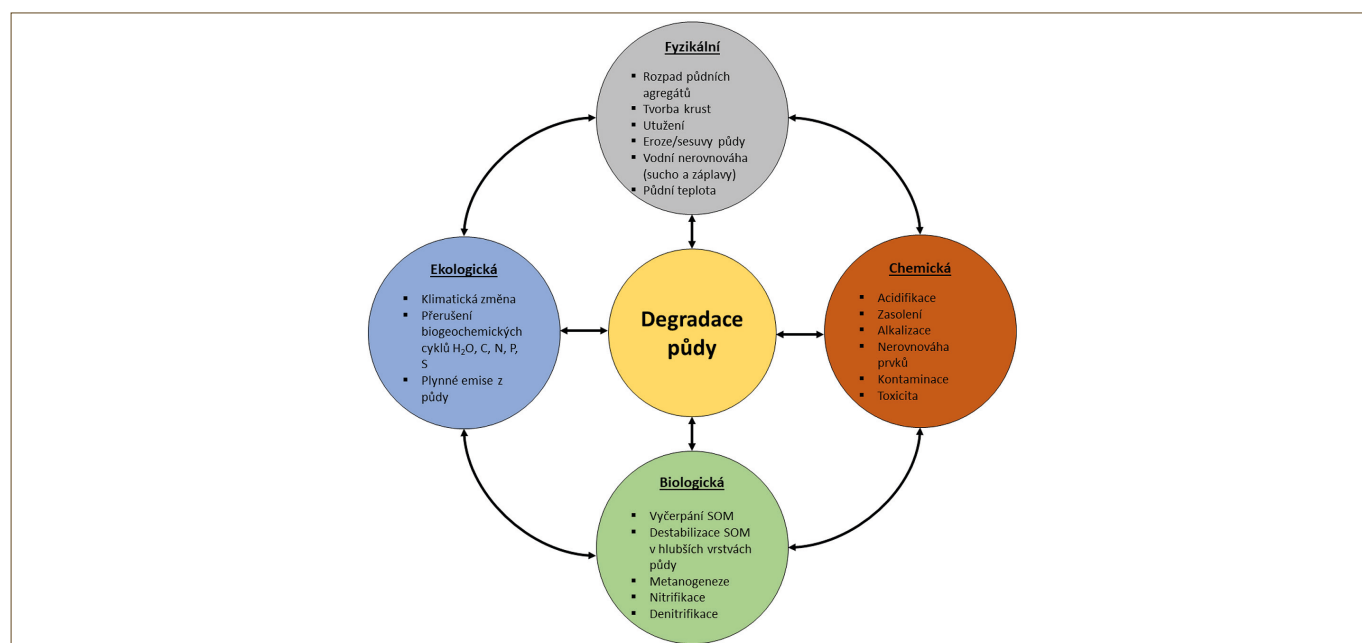
Obr. 2.1: Globální změny v současném zemědělství (upraveno dle Meena, Lal 2018).



(krajinný pokryv a využití půdy) a environmentálních faktorech, včetně vodního režimu, topografie a klimatu apod. (Guo et al. 2015). Podnebí s vyšší teplotou a nižšími srážkami, tj. semiaridní podmínky, snižují akumulaci SOM (Melillo et al. 2002). Dokonce i na lokální úrovni, kdy půdotvorný materiál a klima mohou být poměrně homogenní, může být obsah SOM ovlivněn topografií a využitím/managementem půdy (Goydaragh et al. 2021). SOM je důležitá při udržování a zlepšování fyzikálních (udržování vhodné půdní struktury, tepelný režim, dynamika půdní vody), biochemických (koloběh živin, vázání a rozklad rizikových látek a prvků /pesticidů, perzistentních organických látek apod./) (Sotáková 1982, Stevenson 1994, Sparks 2003, Brady and Weil 2008, Lal 2008a, Yang et al. 2019) a biologických vlastností půdy (Gong et al. 2009, Du et al. 2014, Harden et al. 2018). Vysoký obsah SOM v půdě může zvýšit přísun a příjem půdních živin (Rochette et al. 1999) a rovněž zvýšit pufrovací kapacitu půdy (Grego and Lagomarsino 2008, Yang et al. 2012, Rao et al. 2017, Shi et al. 2019). Zároveň zvyšování obsahu SOM umožňuje vyšší sekvestraci uhlíku v půdě (Lal 2004, 2021, Lorenz and Lal 2018, Meena and Lal 2018). Půdní organický uhlík (SOC) a jeho frakce (labilní i stabilní) proto hrají podstatnou roli z pohledu chemických, fyzikálních a biologických procesů v půdě (Goydaragh et al. 2021). SOC je také indikátorem úrodnosti, produktivity a dostupnosti živin v půdě (Lozano-García et al. 2011, Pouladi et al. 2019). Na globální úrovni je SOC důležitým faktorem z pohledu modelování emisí skleníkových plynů podle různých scénářů změny klimatu (Tajik et al. 2020). Pro odhad uhlíkové bilance a dynamiky uhlíku v čase jsou tedy nutné aktualizované a přesné informace o SOC v půdě (Zeng et al. 2016, Wiesmeier et al. 2019, Wang et al. 2021, 2022b, 2022a, Dharumarajan et al. 2021). Podrobné znalosti dynamiky koncentrací SOM, resp. SOC v přírodním prostředí mohou pomoci porozumět tokům a výměně uhlíku mezi atmosférou a půdním prostředím, dále sekvestrací uhlíku i přístupností živin v půdě pro rostliny (Amin et al. 2020). Na druhou stranu má SOC tendenci klesat v zemědělských půdách zejména v souvislosti s měnícím se klimatem, strukturou půdy, hydrologií půdy (odvodňování), využíváním půdy (zpracování půdy), hnojením, ale i vegetací, resp. osevním

postupy (Lal 2008a, 2008b, Deng et al. 2016, Maltas et al. 2018) viz obr. 2.2.

Půda, resp. půdní prostředí je největší zásobárnou organického uhlíku v suchozemských ekosystémech. Odhaduje se, že je zde uloženo značné množství uhlíku (C, 1300 ~ 2000 Pg), což je přibližně dvojnásobek současného atmosférického uhlíku (750 Pg) a 2~3násobek zásoby uhlíku suchozemské vegetace /500 Pg ~ 600 Pg/ (Yousaf et al. 2017). Některé modely, jako např. Earth System Models (ESM), zahrnuté ve studii CMIP5, odhadují globální zásoby uhlíku na 510 až 3040 Pg (Todd-Brown et al. 2013), s odhadovanými změnami, podle různých scénářů vývoje klimatu, od ztráty 72 Pg C po zisk 253 Pg C v průběhu 21. století (Todd-Brown et al. 2014). V suchozemských ekosystémech zabírá rozloha zemědělské půdy ( $4,86 \times 10^7 \text{ km}^2$ ) podle údajů World Bank (Guo et al. 2021) z roku 2016 přibližně 38,18 % světové rozlohy ( $12,74 \times 10^7 \text{ km}^2$ ). Významným úložištěm uhlíku v rámci zemědělské půdy jsou také travní porosty, které pokrývají ~68 % celkové světové zemědělské plochy (Leifeld et al. 2015) a ukládají odhadované množství 245 Pg SOC (Bolin et al. 2000). Hrají tak důležitou roli v terestriálním cyklu uhlíku (Jobbagy and Jackson 2000, Schipper et al. 2007, Li et al. 2018a). V Evropě pokrývají cca 21 % celkové rozlohy pastviny, resp. trvalé travní porosty /TTP/ (Eurostat 2018). Travní porosty sekvestrují více C na jednotku plochy, než je globální průměr, a často ukládají C do velké hloubky v půdním profilu (Jobbagy and Jackson 2000, Poeplau et al. 2011). Pod travními porosty jsou vysoké zásoby SOC i N v důsledku vstupu uhlíku i dusíku do půdy z nadzemních a podzemních rostlinných zbytků (Paustian et al. 1997), absenci zpracování půdy (Soussana et al. 2006) a různorodé půdní bioty (van Eekeren et al. 2009). Trávy jsou schopné vyvinout velké a husté kořenové systémy se vstupy C z odumřelých kořenů mezi  $0,5$  a  $5,2 \text{ t.C.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$  (Ball et al. 2005, Rees et al. 2005, Meersmans et al. 2013). Z tohoto důvodu travní porosty akumulují značné množství organických látek, resp. uhlíku (C) v průběhu času, což přispívá ke snižování atmosférického  $\text{CO}_2$  (Lal 2004, Conant et al. 2017).



Obr. 2.2: Různé typy degradace půdy s nepříznivými dopady na obsah organické hmoty v půdě /SOM/ (upraveno dle Lal 2020).

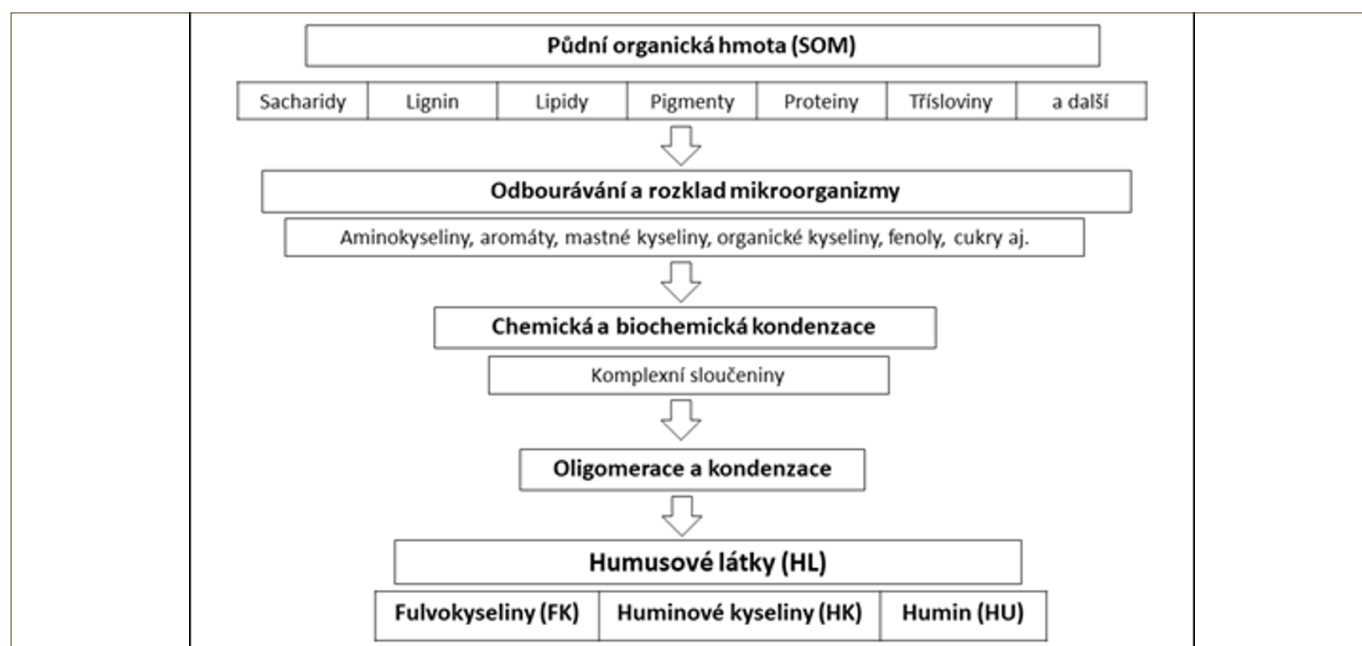
Zásoba uhlíku v zemědělské půdě se odhaduje přibližně na 8–10 % globálních zásob uhlíku v půdě (zemském povrchu), proto je studium (výzkum) obsahu uhlíku, resp. SOM v půdě, důležité pro pochopení změn zásob a dynamiky uhlíku v zemědělských půdách (Garten 2002, Zomer et al. 2017). Kromě toho může zemědělská výroba, použití hnojiv a další lidská činnost narušit přirozený cyklus uhlíku a následně ovlivnit rovnováhu zásob SOC v zemědělských půdách (Johnson et al. 2007, Snyder et al. 2009). Jak bylo zmíněno, SOC ovlivňuje půdní fyzikální, biologické a chemické procesy a slouží jako hlavní zdroj živin v půdě pro růst a vývoj rostlin (Zobeck et al. 1989, Das and Mukherjee 2000, Timsina 2018, Menšík et al. 2019a, Voltr et al. 2021) a lidská aktivita, především zemědělská, může významně zasáhnout do cyklu uhlíku v půdě. Tyto zásahy mohou být jak negativní, tak i pozitivní. Existuje celá škála faktorů, které obsah uhlíku v půdě ovlivňují. Jsou to především zvolený způsob obhospodařování půdy a oševní postupy (Havlin et al. 1990, West and Post 2002, Haddaway et al. 2017, Balík et al. 2023), společně se způsobem hnojení (Studdert and Echeverría 2000, Alvarez 2005, Li et al. 2018b). Akumulace SOC v půdě je v současné době považována za potenciální možnost vedoucí ke snížení emisí  $\text{CO}_2$  a k dosažení mezinárodních cílů zmírňování změn klimatu (Poeplau 2021). Kromě toho je obsah organické hmoty (SOM) v půdě klíčovým ukazatelem kvality půdy díky pozitivním účinkům organické hmoty na fyzikálně-chemické vlastnosti půdy (Lorenz and Lal 2018). Ztráta SOM je v současné době jednoznačně považována za negativní změnu stability půdního prostředí způsobující degradaci půdy (Global Soil Partnership 2017).

#### Konstituenty půdní organické hmoty – chemická frakcionace

V minulosti i současnosti je stále věnováno značné úsilí vývoji laboratorních analytických postupů, které by umožnily SOM podrobně popsat a charakterizovat. Waksman (1938) ve svém přehledu literatury o původu, vlastnostech a významu humusových látek uvedl definici humusu (latinský výraz pro půdu) a humusových látek. Autoři Lehmann and Kleber (2015) a dále

i Kleber and Lehmann (2019) se vrátili k pojetí Waksmana (Waksman 1938) a dospěli k závěru, že vzhledem k tomu, že alkalická extrakce nemůže rozlišit chemický vývoj humusových látek, nemůže být základem pro rozlišení huminových a nehuminových látek. Jejich doporučení se nesetkalo s kladným ohlasem v celosvětovém měřítku, neboť vědci od roku 2015 do současné doby nepřestali ve svých výzkumných pracích používat termín „humus“ nebo „humifikace“ (Tiwarei et al. 2023). Autoři Baveye and Wander (2019) ve svém vědeckém článku předložili několik historických zdůvodnění a potvrdili, že Waksmanův pohled lze i po více než 80 letech považovat za stále nový. Studie humusových látek začaly již před více než 240 lety, kdy (Achard 1786) extrahoval huminovou kyselinu z rašelin a zavedl první metody izolace a klasifikační schémata. Pro temně zbarvený organický materiál v půdě zavedl termín „Huminstoffe“ - huminové látky, jehož původ nacházíme v latinském slově „humus“, což znamená půda nebo země (Vlachová 2007). Podrobný přehled výzkumu humusu, resp. humusových látek od 19. do 21. století je uveden v disertační práci (Menšík 2010).

V SOM jsou obsaženy všechny organické sloučeniny, které jsou přirozenou součástí rostlinných a živočišných organismů. Tyto látky podléhají celé řadě přeměn, při nichž mohou vznikat ze složitých makromolekulárních látek a polymerů chemicky jednodušší organické i anorganické látky, nebo naopak mohou v procesu humifikace vznikat těžko rozložitelné látky o vysoké molekulové hmotnosti. Rychlost a druh těchto přeměn nezávisí jen na složení SOM, ale i na fyzikálně-chemických a biologických vlastnostech prostředí. Látky tvořící SOM lze klasifikovat podle několika hledisek. Vzhledem k velké složitosti a k dynamice změn, kterými půdní organická hmota neustále prochází, nemůže však být žádné z těchto rozdělení zcela přesné (Stevenson 1994, Sparks 2003) viz obr. 2.3. Nejrozšířenějším procesem přeměn organických zbytků je humifikace a mineralizace. Důležitý je poměr mezi mineralizací a humifikací. Tento poměr je závislý na zdroji organického materiálu, jeho chemickém slože-



Obr. 2.3: Schéma tvorby humusových látek v půdě (upraveno dle Kononova 1963, Sotáková 1982, Stevenson 1994, Ouni et al. 2014, Guo et al. 2019, Tiwarei et al. 2023).

ni i geografických podmínkách prostředí. Proces, jehož výsledkem jsou humusové látky, se tradičně nazývá humifikace a je souborem mnoha biochemických reakcí. Procesy přeměn mají etapovitý (kaskádový) charakter. Přeměna organických zbytků je v začátku velmi rychlá, ale postupně při odbourávání lehko rozložitelných sloučenin vznikají stabilní humusové látky (HL) a rychlost přeměny postupně klesá (Sotáková 1982).

Humus je možno po stránce látkové podle chemických a analytických znaků rozdělit na nehuminné látky (organické látky rostlinného a živočišného původu) a huminné látky (vytvořené z nehuminných látek a pro půdu specifické). Látkové složení humusu, a to především složení huminných látek, je nositelem všech vlivů a funkcí ve smyslu fyzikálním, chemickým i fyziologickým ve vztahu k půdě, jejíž vlastnosti ovlivňuje a mění i ve vztahu k živým organismům, na které působí. Nehuminné látky je možno oddělit z půdního vzorku kyselou hydrolyzou. Jestliže se z tohoto podílu oddělí fulvokyseliny, které přecházejí do hydrolyzátu, pak rozdíl vyjadřuje dosud nehumifikované organické látky (Menšík 2010).

**Z chemického hlediska** lze látky tvořící SOM rozdělit na dvě skupiny (Stevenson 1994, Sparks 2003):

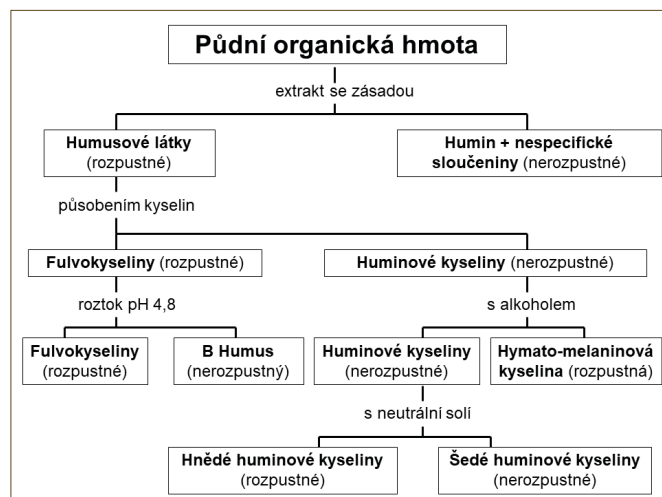
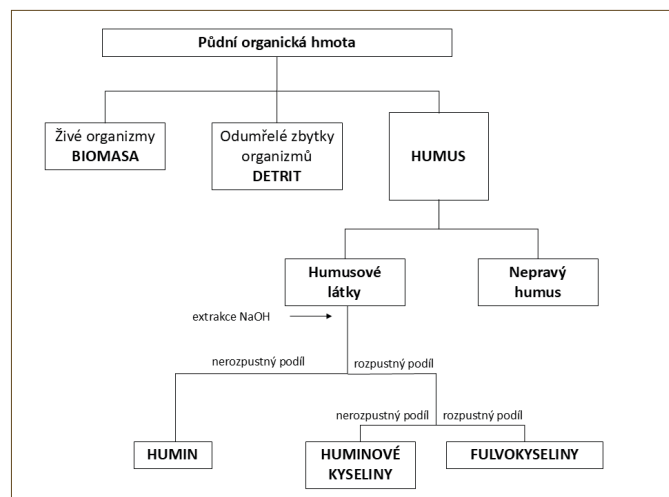
- **látky humusové (*humic substances*)**, tvoří 60–80 % SOM; jsou pro půdu specifické, těžko rozložitelné, tmavě zbarvené látky, s relativně vysokou molekulovou hmotností (Aiken et al. 1985). Tyto látky vznikají v půdě sekundární syntézou. Humusové látky je možno rozdělit na tři frakce na základě rozdílné rozpustnosti v kyselinách a loužích, a to na **fulvokyseliny, huminné kyseliny a humin** (Piccolo 1996). Tyto frakce se od sebe liší barvou, molekulovou hmotností, obsahem uhlíku a kyslíku i dalšími charakteristikami.
- **nespecifické sloučeniny (*nonhumic substances*)**, tvoří 20–30 % SOM; jsou látky náležející do konkrétních skupin organických sloučenin popsaných organickou chemií (cukry, organické kyseliny, aminokyseliny, vyšší mastné kyseliny, alkoholy, aldehydy, dusíkaté sloučeniny, celulóza, chitin, lignin, bílkoviny, polysacharidy a další sloučeniny).

Klasickým kritériem pro dělení humusových látek je jejich rozpustnost v NaOH a minerálních kyselinách (tj. humin=nerozpustný v NaOH, huminné kyseliny a fulvokyseliny=rozpustné

v NaOH). Následně se humové kyseliny oddělí srážením v kyselině (tj. fulvokyseliny=rozpustné v kyselině, huminné kyseliny=nerozpustné v kyselině) – viz obr. 2.4.

**Fulvokyseliny (FK)** se tvoří převážně v prvních stádiích humifikace primární organické hmoty. Jsou výrazně mobilní, nepříliš významné při tvorbě půdní struktury a vytváření komplexů s huminovými kyselinami, řadí se k nízkomolekulárním frakcím (Reddy et al. 2012, Schellekens et al. 2017). Deriváty fulvokyselin s kationty se nazývají fulváty. Vytvářejí jednoduché i složitější sloučeniny s kationty vápníku (nerozpustné), hořčíku, železa, hliníku a mědi. S hydroxidem železitým a hliníťm vytvářejí fulvokyseliny rozpustné komplexní sloučeniny. Tato jejich vlastnost je důležitá pro pohyb minerálních látek v půdě, významně působí v podzolizačních procesech. Zvýšený obsah fulvokyselin v půdě (typické pro kyselejší půdy) zpřístupňuje uvedené prvky do forem přijatelných pro rostliny.

**Huminné kyseliny (HK)** jsou nejekvalitnější složkou humusových látek, jsou tmavé barvy a hromadí se v místě vzniku (Jansen et al. 1996, De Melo et al. 2016). S vápníkem a hořčíkem tvoří ve vodě nerozpustné humáty vápenaté nebo hořečnaté, které ovlivňují příznivě technologické vlastnosti půd všech druhů, např. zvyšují soudržnost lehkých půd a zlepšují drobivost a zpracovatelnost těžkých půd. Váží na sebe také řadu těžkých kovů (Cd, Pb, Zn, Hg, aj.) do těžce rozpustných sloučenin, a tak omezují jejich pohyb v půdě a příjem rostlinou. Huminné kyseliny jsou vrcholným stadiem proměny organické hmoty v půdě, jsou koloidně neaktivnější složkou půdy. V molekule huminných kyselin se nalézají zbytky různých látek, ze kterých vznikaly, jako jsou aminokyseliny, fenoly apod. Velmi významné jsou chinoidní skupiny, které zprostředkují přenos kyslíku. Ve vodě jsou huminné kyseliny nerozpustné, ale některé jejich soli, jako je humát sodný a draselný, se vyznačují vysokou rozpustností. Významnou schopností huminných látek je vytváření tzv. organo-minerálních komplexů, které vznikají, jestliže se molekuly huminných kyselin spojí různými vazbami s jílovými minerály v půdě. Dochází přitom k tvorbě vazeb mezi částicemi jílových minerálů s nerozpustnými humáty vápníku i jinými ionty a tím se vytvářejí částice s velkým povrchem a značnou schopností poutat různé ionty – organo-minerální sorpční komplex.



Obr. 2.4: Rozdělení organických látek v půdě a klasifikace humusových látek (Brady, Weil 2008, vlevo) a frakcionace půdní organické hmoty /SOM/ (Stevenson 1994, Sparks 2003, vpravo).



**Huminy (HU)** představují silně karbonizovanou organickou hmotu, pevně vázanou na minerální podíl půdy, a proto se nedají získat ani mnohonásobnou extrakcí alkáliemi z dekalcinované (zbavené vápníku) půdy (Skybová 2006, Skokanová and Dercová 2008). Huminy jsou často charakterizovány jako nerozpustné formy huminových kyselin. Jsou podobné huminovým kyselinám, ale jsou méně aromatické a obsahují více polysacharidů. Jsou to převážně sorpčně nenasycené huminové kyseliny, pevně vázané s jílovými minerály. Přesto zůstávají sorpčně aktivní a v komplexech s humáty tvoří nesmírně významnou složku orných půd.

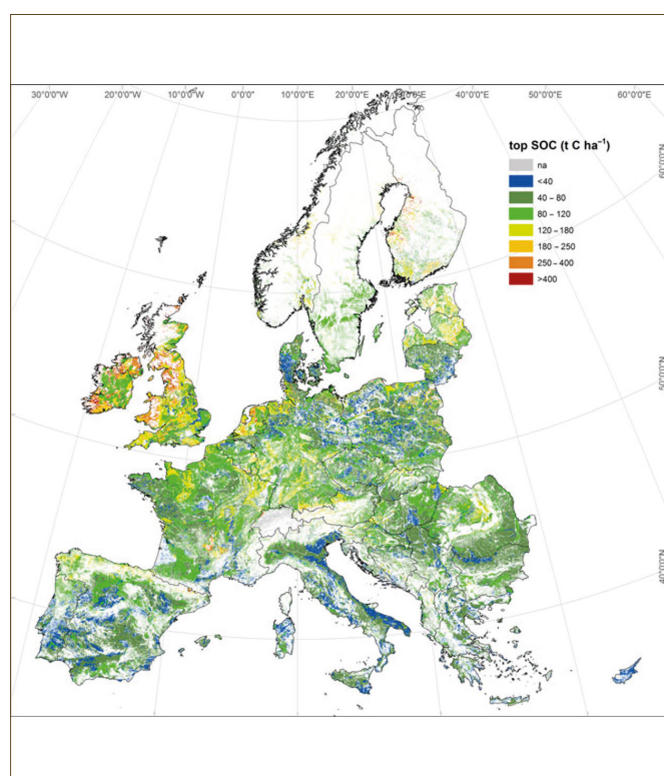
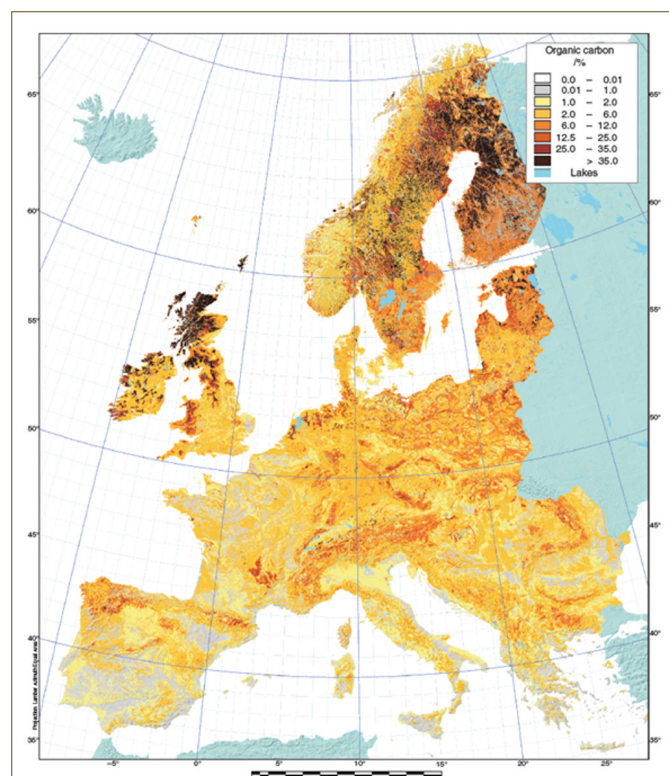
Dlouho se předpokládalo, že humusové látky jsou makromolekulární polymery uspořádané globulárně při nízkých hustotách, nízkém pH a silných iontových vazbách anebo flexibilní lineární koloidy za neutrálního pH, při nízkých koncentracích a slabých iontových vazbách (Piccolo et al. 2002). V současné době se humusové látky považují za supramolekuly spojené slabými disperzními Van der Waalsovy silami, které mohou být narušeny různými organickými kyselinami (Sutton and Sposito 2005, Pospíšilová and Tesařová 2009, Simpson et al. 2011).

**Význam humusových látek** je mnohostranný a spočívá v kladném ovlivňování všech půdních vlastností působících rozhodujícím způsobem na obsah živin v půdě i na půdní úrodnost (Skybová 2006). Jejich přítomnost vede k vysokému poutání živin v půdě (6–7x vyšší než u jílových minerálů), je důležitým faktorem drobtovité struktury půdy, jejímž důsledkem je příznivý vodní, vzdušný a tepelný režim půdy, kladně ovlivňuje pufrací schopnost půd, příznivě působí na biologické, biochemické vlastnosti půd (zvyšují biologickou aktivitu půdy, jsou zdrojem

energie a potravy pro půdní heterotrofy, zvyšují sorpční kapacitu půdy, mají vliv na výživu rostlin, syčení svrchní části litosféry  $\text{CO}_2$ , ovlivňují půdní aciditu, ovlivňují koloběh prvků v pedosféře, ovlivňují charakter pedogenetických procesů apod.) a fyzikální vlastnosti půd /tvorba příznivé půdní struktury, zadržování srážkové vody, ovlivňují množství povrchového odtoku srážkové vody, ovlivňují teplotní i tepelný režim půdy, neutralizují atmosférické polutanty na bázi slabých anorganických kyselin/ (Malý and Siebielec 2015). Dále částečně váží některé těžké kovy v půdě, zabraňují vysrážení fosforečných sloučenin z půdního roztoku a dále rozpustné humusové látky vykazují přímý stimulační vliv na rostliny (Tiwari et al. 2023).

### Zásoby a ztráty organické hmoty (OM) v půdách Evropy a ČR

Úbytek obsahu organické hmoty v půdě je považován za jeden z nejvýznamnějších faktorů procesu degradace půd v obecném pojetí. Je způsoben především větrnou a vodní erozí, nedostatečným přísunem organických hnojiv a nesprávným hospodařením na půdě. Kvantifikace tohoto jevu je problematická, i když běžným pozorováním jsou známky dobře patrné /světlé – erodované plochy na orné půdě bez vegetace na návětrných plochách svahů, odnosy materiálu kvalitního humusového horizontu do vodotečí nebo jeho akumulace v podsvahových deluviích/ (Sánka et al. 2015). Nedávný vývoj v mezinárodní zemědělské politice, která cílí na zmírnění změny klimatu (ukládání C v půdě) prostřednictvím správného managementu obhospodařování zemědělské půdy (např. Koronivia Joint Work on Agriculture, <http://www.fao.org/koronivia/about/en/>; Steffens et al. 2021), směřuje tak k přímým platbám. Evropská unie (EU) v rámci společné zemědělské politiky (SZP) v současné době klade větší důraz na SOC, a to jak na ukazatele kvality půdy, tak na pro-



Obr. 2.5: Mapa rozložení obsahu skutečného organického uhlíku (SOC, %) v povrchových vrstvách zemědělské půdy (0–30 cm) v evropských zemích, Grid 1 x 1 km, European Soil Database (Jones et al. 2005, vlevo) a mapa předpokládaných zásob organického uhlíku (SOC, %) v povrchových vrstvách zemědělské půdy (0–30 cm) v evropských zemích, Grid 1 x 1 km, European Soil Database (Lugato et al. 2014, vpravo).

středek pro kompenzaci emisí CO<sub>2</sub> prostřednictvím sekvence uhlíku (C) do půdy (Lugato et al. 2014). Kvantifikace SOC v EU je důležitým faktorem při adaptačních opatřeních v souvislosti s GZK v návaznosti na změny v zemědělské politice EU (De Rosa et al. 2024) se zaměřením na zvýšení odolnosti zemědělských systémů v EU vůči GZK. Pokles SOC je uznáván jako jeden z osmi faktorů ohrožení půdy uvedených v Tematické strategii EU pro ochranu půdy (EC 2006<sup>5</sup>, 2012<sup>6</sup>). Cílem nové strategie EU pro půdu (angl. EU Soil Strategy 2030<sup>7</sup>) do roku 2030 je zvýšit obsah organického uhlíku v zemědělské půdě, aby se zlepšilo zdraví půdy a podpořila biologická rozmanitost a aby se kompenzovaly emise skleníkových plynů zachycováním uhlíku v půdě.

Na základě rozsáhlé Evropské databáze o půdě vymodeloval Jones et al. (2005) a dále Lugato et al. (2014) mapu obsahu a zásob organického uhlíku (SOC) v povrchových vrstvách půdy (0–30 cm) pro EU. Z mapy je patrné, že na území ČR se obsah (koncentrace) uhlíku pohybuje na zemědělských půdách včetně travních porostů v rozsahu 1–6 %, v lesních půdách 6–12 % (viz obr. 2.5). Dále byly odhadnuty změny zásob SOC ( $\Delta$  SOC) pro EU + Spojené království mezi lety 2009 a 2018 pomocí moderních statistických metod (kvantilový zobecněný aditivní model /qGAM/) na datech získaných v rámci šetření Land Use/Land Cover Area Survey (LUCAS<sup>8</sup>) provedeného v letech 2009, 2015 a 2018 (De Rosa et al. 2024). Výsledky prokázaly, že v EU a ve Spojeném království činila odhadovaná aktuální (2018) zásoba SOC ve svrchní vrstvě půdy (0–20 cm) na zemědělské půdě pod 1000 m n. m. 9,3 Gt, přičemž  $\Delta$  SOC v období 2009–2018 činil -0,75 % (70 Mt C), to je 0,75 % z celkových odhadovaných zásob SOC v hloubce 0–20 cm v roce 2009 ve výši 9,3 Gt C. Zásoby SOC ve střední Evropě byly v období 2009–2018 obecně stabilní a celkové změny SOC ( $\Delta$  SOC v období 2009–2018) se pohybovaly mezi -3,0 a 1,5 t C ha<sup>-1</sup> (De Rosa et al. 2024) viz obr. 2.6.

Na základě archivních podkladů, zejména z nedávno zdigitalizovaných dat Komplexního průzkumu půd (KPP) a dále širokého spektra aktuálních půdních dat a dalších podpůrných prostředků (včetně satelitních dat dálkového průzkumu Země z evropského programu Copernicus nebo například nejnovějšího digitálního modelu terénu ČR) byly vytvořeny za pomoci pokročilých statistických metod digitálního mapování půd s využitím nástrojů strojového učení moderní mapy půdních vlastností zemědělských půd ČR (Žížala et al. 2020, 2022). Jednou z map je mapa obsahu SOC v povrchových vrstvách půdy (0–30 cm) pro zemědělské půdy v ČR. Z mapy je patrné, že na území ČR se obsah (koncentrace) uhlíku pohybuje v rozsahu 0,1 až 3,0 % (viz obr. 2.7).

Dle Situačních a výhledových zpráv Půda Ministerstva zemědělství z let 2012, 2015, 2018 i 2021 v ČR hrozí intenzivní

dehumifikace půd (ztráta organické hmoty) spíše místně při souběhu více degradačních vlivů, neuvážených zásahů do rovnovážného vodního režimu půdy, při intenzivní erozi a dále i při nedostatečném doplňování kvalitní organické hmoty do půdy (MZe 2018, 2021).

### Hnojení a SOM

Hnojení je proces aplikace živin do půdy s cílem poskytnout dostatek živin a jiných podpůrných látek pěstovaným plodinám a tím podpořit jejich růst a vývoj. Současně se s aplikovanými hnojivy upravují i půdní vlastnosti, jako je hodnota pH a výše zmíněný obsah SOM a SOC (v závislosti na formě hnojiva pozitivně, či negativně). Nejstaršími formami hnojení byla aplikace zvířecích exkrementů, popela a kompostu (Vance 1996, Diaz et al. 2007). V průběhu času se k těmto statkovým a organickým hnojivům přidala hnojiva minerální, jako např. čilský ledek, a později další formy hnojiv, vytvořených pomocí technologických procesů (Birkeland 1906, Russel and Williams 1977). Minerální hnojiva představovala významný průlom v oblasti zemědělství a společně s rozvojem genetiky a šlechtění stojí za tzv. zelenou revolucí (Kronstad 1997), fenomenálnímu úspěchu v oblasti světové produkce obilovin. Nicméně veškerá pro mají i svá proti. Aplikace čistě minerálních forem hnojiv, především dusíku, může představovat enormní riziko pro půdu, půdní chemické a biologické vlastnosti a spodní a povrchové vody (Brar et al. 2015, Czarnecki and Düring 2015, Eo and Park 2016, Maltas et al. 2018, Mi et al. 2018, Shiwakoti et al. 2019), především, pokud není doprovázena aplikací kvalitních statkových hnojiv (Menšík et al. 2018, 2019b, 2019a, Hakl et al. 2021, Hlisnikovský et al. 2021). Za minulého režimu před rokem 1990 byla rostlinná a živočišná výroba v rovnováze. Znamená to, že dostupnost statkových hnojiv, která do půdy dodávají společně se živinami i organickou hmotu, byla velice dobrá. Tato rovnováha byla po změně z centrálního na tržní systém významně narušena. Proto nyní můžeme v České republice zaznamenat rozkol mezi živočišnou a rostlinnou výrobou. Zatímco stavy hospodářských zvířat v porovnání s dřívější dobou klesají, závislost na minerálním dusíku, aplikovaného v rostlinné výrobě stoupá. Nižší počet hospodářských zvířat vede k nižší dostupnosti statkových hnojiv, a tedy k nižší dostupnosti a aplikaci organické hmoty. Zároveň se z finančních důvodů omezila aplikace fosforečných a draselných hnojiv. Na základě výše uvedených důvodů je v současné době míra aplikace fosforečných a draselných hnojiv srovnatelná s obdobím 50. a 60. let 20. století. V současné době tak rostlinná produkce stojí především na minerálním dusíku, který bez dodatku statkových hnojiv (hnůj, kejda) významně napomáhá ke snížení hodnoty půdního pH, a tím významně ovlivňuje přístupnost živin v půdě pro rostliny (Vašák et al. 2015, Kopecký et al. 2021), a dále dochází i poklesu SOC a změně v chemickém složení SOM (významně se mění poměr huminových kyselin ku fulvokyselinám /poměr HK/FK/, kde v půdě začínají převládat fulvokyseliny).

<sup>5</sup> EC (2006) /COM (2006) 231 final/ Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee of the Regions. Thematic Strategy for Soil Protection, Brussels.

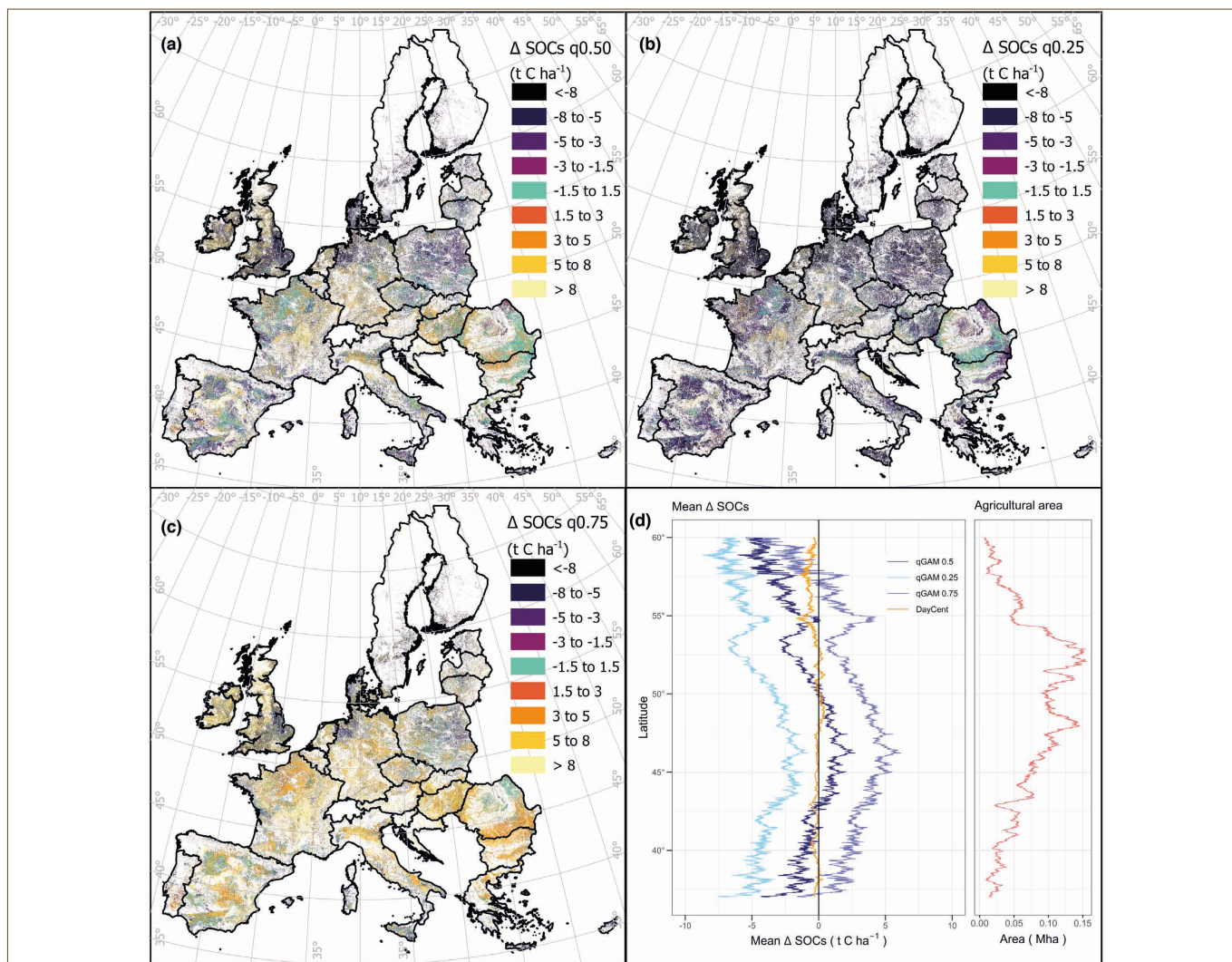
<sup>6</sup> EC (2008) Review of Existing Information on the Interrelations between Soil and Climate Change (CLIMSOIL) – Final Report. Contract number 70307/2007/486157/SER/ B1:208. (ed.

Schils RE), European Commission, Brussels.

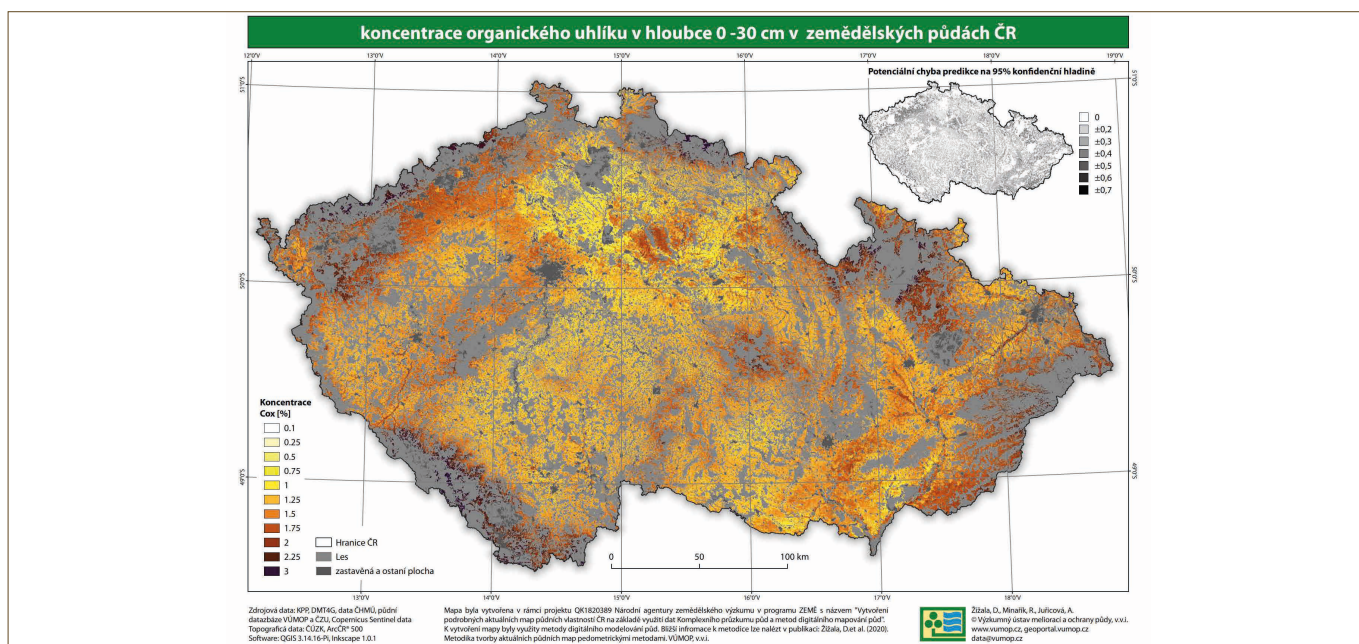
<sup>7</sup> EU Soil Strategy 2030: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0699>

<sup>8</sup> EU - LUCAS: Land Use and Coverage Area frame Survey, <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/lucas>





Obr. 2.6: Celková změna SOC ( $\Delta$  SOC v období 2009–2018) v hloubce 0–20 cm v EU a Spojeném království stanovená pomocí qGAM v období 2009–2018 pro (a) q0,5, (b) q0,25 a (c) q0,75. (d) Průměrná změna obsahu SOC ( $\Delta$  SOC) podle šířky u modelu qGAM a DayCent. Linie v mapě vymezují studované oblasti a nemusí nutně znázorňovat státní hranice. qGAM - kvantilový zobecněný aditivní model; SOC - půdní organický uhlík, q - kvantil (De Rosa et al. 2024).

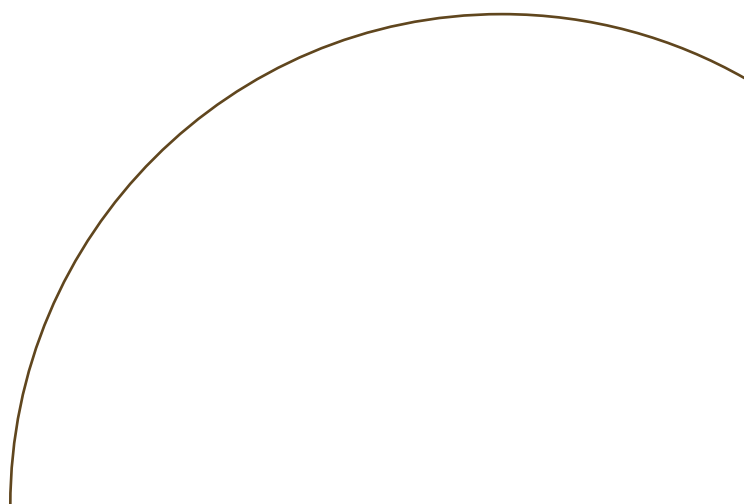


Obr. 2.7: Mapa koncentrace SOC v povrchových vrstvách zemědělské půdy (0–30 cm) v ČR (Žižala et al. 2020).

Hlavním cílem současného zemědělství musí být zachování (ochrana) půdní úrodnosti při předpokládané změně klimatu a to pravidelným navracením odebraných živin a dostatečným přísunem organických látek (OL) a živin do půdy (Čermák 2007, Klír 2008, Hlušek and Richtr 2010, Rayne and Aula 2020, Voltr et al. 2021). V podmínkách ČR se roční spotřeba nehumifikovaných organických látek pohybuje v rozmezí 4 až 4,5 t.ha<sup>-1</sup> (Křen 2012, Škarpa 2013). Tato hodnota je z 50 až 60 % uhrazena posklizňovými zbytky a zbývajících 40 až 50 % je třeba doplňovat organickými hnojivy. Přestože úhrada živin je především zajišťována minerálními hnojivy, nelze s ohledem na udržení půdní úrodnosti opomenout význam organických hnojiv, která i při poklesu stavu hospodářských zvířat hrají ve výživě rostlin významnou úlohu (Čermák 2007). Zvláště je nezbytné hledat vhodná řešení při snížené produkci chlévského hnoje, nebo nižšího využití kejdy ke hnojení s ohledem na moderní trend jejího zužitkování v bioplynových stanicích (Scarlat et al. 2018). V současné době se v ČR ročně aplikuje ve stájových hnojivech (po odpočtu ztrát při skladování) odhadem pouze 0,6 až 0,7 t organických látek na 1 ha orné půdy (Klír 2017). Pro pokrytí roční průměrné potřeby organických látek pro orné půdy nedosahuje podíl stájových hnojiv ani 50 % (Klír 2021). Proto je nutné využít i další zdroje (sláma obilnin, řepky, luskovin, zelené hnojení, řepný

chrást aj.) k vyrovnání její bilance. Na méně úrodných půdách je hnůj a správně aplikovaná kvalitní kejda se slámou nebo zeleným hnojením, případně v trojkombinaci (sláma, zelené hnojení, kejda), nezastupitelná (Škarpa 2013). Další možností je využití kompostů (De Corato 2020). Z pohledu kvality organické hmoty a jejího přínosu pro půdu a půdní úrodnost má však v systému hnojení nezastupitelné místo hnůj, nebo kvalitní kompost (Černý et al. 2010, Balík et al. 2023). Tato hnojiva dodávají pro půdní mikroorganismy zdroj lehce mineralizovatelné organické hmoty a z ní pak uvolněné živiny pro rostliny, ale především jsou zdrojem stabilnějších organických látek, které přispívají k procesu humifikace a tvorbě stabilního humusu v půdě (Vaněk et al. 2010).

Zvyšování obsahu SOM v zemědělských půdách je příslibem zlepšení úrodnosti půdy, protože SOM ovlivňuje mnoho vlastností půdy, včetně jejich schopnosti zadržovat vodu a živiny, poskytovat strukturu podporující účinné odvodnění a provzdušňování a minimalizovat ztráty ornice erozí (Reeves 1997, Robertson et al. 2014). Biogeochemie půdní organické hmoty (SOM) v komplexně pojatém výzkumu (studium dynamických procesů apod.) má zásadní význam pro správné fungování ekosystémů /přirozených, polo-přirozených, umělých/ (Lorenz and Lal 2018, Ondrasek et al. 2019).



### 3 PŘEDSTAVENÍ ŘEŠENÍ PROJEKTU A CÍL MONOGRAFIE

Projekt dlouhodobé koncepce rozvoje výzkumné organizace RO-0423 (dále jen DKRVO) Výzkumného ústavu rostlinné výroby, v.v.i. (dále jen VÚRV, v.v.i.) podpořený MZe ČR<sup>9</sup> je řešen na pracovišti VÚRV, v.v.i. Praha-Ruzyně a dále i na pracovišti Výzkumné stanice (VS) Jevíčko, od roku 2023. V rámci výzkumného záměru (VZ) Kvalita půdy a biodiverzita půdních mikroorganismů v kontextu měnícího se klimatu (VZ02) je věnována pozornost problematice hodnocení kvantitativních a kvalitativních parametrů půdy /kvalita a zdraví půdy- „Soil Health“/. Je hodnocen obsah a kvalita půdní organické hmoty, obsah živin, půdní reakce, dostupnost vody pro rostliny apod.) v různých systémech obhospodařování (tj. orná půda, travní porosty na orné půdě, trvalé travní porosty atd.). Důraz je přitom kladen na udržitelné obhospodařování zemědělské půdy v podmínkách změny klimatu (GZK). Hlavním úkolem je dlouhodobě stabilizovat výnosy intenzivního zemědělství při maximalizaci kvality produkce a minimalizaci dopadů na půdní, vodní a genetické zdroje s dlouhodobou perspektivou podpory biodiverzity a produkčních i mimoprodukčních funkcí půdy a dopadů na zemědělství ve smyslu Strategie resortu MZe ČR s výhledem do roku 2030<sup>10</sup> a Konceptu výzkumu, vývoje a inovací Ministerstva zemědělství na léta 2023–2032<sup>11</sup>.

Cílem zpracované monografie je vyhodnotit vliv hnojení statkovými hnojivy (hnůj, kejda) a ostatními hnojivy (minerální hno-

jení, organické apod.) na kvantitativní a kvalitativní parametry (obsah a zásoby SOM, resp. SOC, kvalita frakcí SOM /humusové látky/, živiny, půdní kyselost aj.) zemědělských půd (orná půda, travní porosty na orné půdě, trvalé travní porosty /TTP/). Monografie je členěna na dílčí studie (např. dlouhodobé polní experimenty, poloprovozní a provozní výzkumné plochy, modelování dlouhodobých časových řad apod.) prováděné v různých půdně-klimatických podmínkách ČR (Praha, Čáslav, Lukavec, Ivanovice na Hané, Jevíčko apod.) v období 2016–2023.

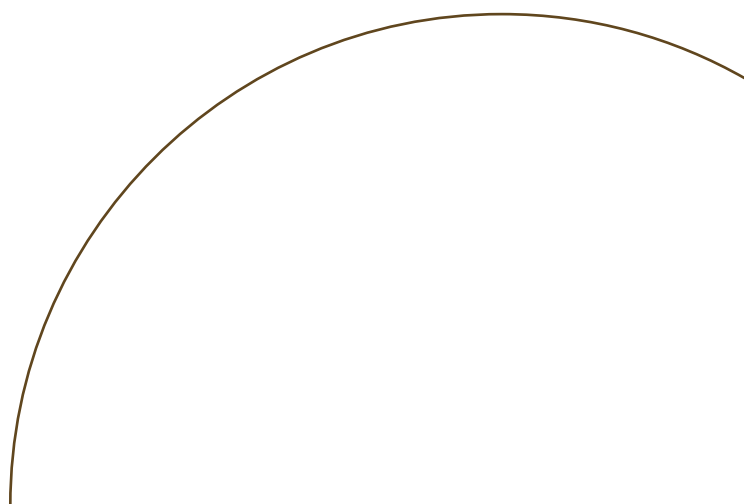
Záměrem řešitelského kolektivu je na základě multi-kriteriálního hodnocení přispět k poznání, do jaké míry se vlivem hnojení mění v dlouhodobém horizontu kvalita a zdraví půdy („Soil Health“). Důvodem je to, že zemědělství v ČR se v současné době potýká s významnými problémy, jako je nedostatek statkových hnojiv (rozsáhlé regiony bez živočišné výroby), změny ve struktuře pěstovaných plodin, významná variabilita počasí, vysoká závislost na minerálním dusíku, nízká míra aplikovaných P a K hnojiv, eroze půdy, ale i vysoká míra pronajímání půdy apod. Dalším záměrem monografie je formulovat výstupy jak do oblasti vědy, tak i do zemědělské praxe. Okruh relevantních uživatelů je tvořen na prvním místě především zemědělskými subjekty hospodařícími na orné půdě a na TTP s rozvinutou živočišnou výrobou v oblastech s podobnými přírodně-klimatickými poměry v podmínkách ČR.

<sup>9</sup> MZe ČR, Institucionální podpora VaV - <http://eagri.cz/public/web/mze/poradenstvi-a-vyzkum/vyzkum-a-vyvoj/institucionalni-podpora-v-a-v/>

<sup>10</sup> MZe ČR, [https://eagri.cz/public/portal/mze/ministerstvo-zemedelstvi/koncepcie-a-strategie/strategie-resortu-](https://eagri.cz/public/portal/mze/ministerstvo-zemedelstvi/koncepcie-a-strategie/strategie-resortu-ministerstva-1)

[ministerstva-1](https://eagri.cz/public/portal/mze/ministerstvo-zemedelstvi/koncepcie-a-strategie/strategie-resortu-ministerstva-1)

<sup>11</sup> MZe ČR, <https://eagri.cz/public/portal/-a30140---rLT1LSx/-research-development-and-innovation-strategy-of-the-ministry-of-agriculture-for-2023-2032>



## 4 DÍLČÍ STUDIE

Výsledky řešení jsou popsány formou příkladových studií v různých půdně-klimatických podmínkách ČR, kdy každá jednotlivá studie je podrobněji členěna do oddílů (podkapitol): (1) cíl studie, (2) popis výzkumného objektu včetně metod studia (dlouhodobé polní experimenty, poloprovozní a provozní výzkumné plochy, modelování dlouhodobých časových řad apod.), (3) výsledky (forma grafů, tabulky, zhodnocení apod.) a (4) dílčí závěr. V každé ze studií je kladen důraz na hodnocení výsledků pomocí moderních statistických metod, hlavně vícerozměrné statistické analýzy a regresní modelování dat (jednorozměrné a vícerozměrné lineární regresní modely apod.).

Statistické analýzy byly provedeny v programech Statistica 14 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, USA), QC Expert 3.1 (TriloByte Statistical Software, CZ); NCSS 2020 (NCSS, LLC, Utah, USA); OPstat (Pytela 2017), Origin 2023b (OriginLab Corporation, Northampton, USA) apod. Pro vícerozměrnou statistickou analýzu hodnocení naměřených dat byly použity metody: průzkumová popisná statistika (EDA), analýzy hlavních komponent /PCA/, faktorová analýza /FA/ a analýza shluků /CLU/ (Meloun et al. 2018). Dále byly použity techniky průzkumové analýzy jednorozměrných a vícerozměrných dat, lineární regrese – výstavba regresního modelu regresním tripletem (Meloun and Militký 2012). Statistická průkaznost byla posuzována na hladině významnosti  $p = 0,05$  a  $0,01$ .

Analýza hlavních komponent (PCA) je jedna z nejstarších a nejvíce používaných metod vícerozměrné analýzy. Cílem PCA je zjednodušení popisu lineárně závislých, tj. korelovaných znaků, a to rozkladem matice dat do matice strukturní (= využití hlavní komponenty) a do matice šumové (= nevyužití hlavní komponenty). V grafu komponentních vah (obr. 4.1.2 vlevo nahoře a uprostřed) porovnáváme vzdálenosti mezi proměnnými (pokud jsou znaky blízko sebe, znamená to, že spolu silně korelují, jsou-li daleko od sebe, pak nekorelují). Váhy informují o vztahu mezi původními znaky (parametry) a hlavními komponentami. Rozptylový diagram komponentních skóre (obr. 4.1.2 vpravo nahoře a uprostřed) zobrazuje komponentní skóre čili hodnoty prvních dvou, resp. tří hlavních komponent. Na obrázku lze identifikovat shluky vzájemně podobných objektů a dále objekty odlehle a silně odlišné od ostatních objektů (objekty blízko sebe si jsou podobné, daleko od sebe jsou si nepodobné). Objekty umístěné zřetelně v jednom shluku jsou si podobné a nepodobné objektům v ostatních shlucích. Jestliže jsou shluky blízko sebe, zna-

mená to značnou podobnost objektů (Meloun et al. 2018).

Faktorová analýza (FA) zjišťuje vnitřní souvislosti, vztahy (korelace) a odhaluje základní strukturu zdrojové matice dat. Identifikují se jednotlivé faktory a následně se každému faktoru přiděluje obsahový (fyzikální, chemický význam, pomocí kterého je každý původní znak (parametr) vysvětlen vybraným faktorem, aby získaná data vysvětlila a usnadnila jejich pochopení daleko menším počtem latentních proměnných, než je počet původních znaků (Meloun et al. 2018). Interpretace grafů je obdobná PCA analýze viz výše.

Analýza shluků (CLU) slouží pro vyšetření podobností vícerozměrných objektů (objekty u nichž je změřeno větší množství proměnných) a klasifikuje objekty do shluků. Volba znaků musí být provedena na základě teoretických, pojmových a praktických hledisek. Vlastní shluková analýza neobsahuje techniku k rozlišení významných a nevýznamných znaků, ale provede pouze odlišení shluků (Meloun and Militký 2011).

### 4.1. Vliv dlouhodobé aplikace minerálních (NPK) a statkových (hnůj, kejda) hnojiv na základní chemické vlastnosti půdy /půdní organická hmota, živiny, půdní reakce/

#### Cíl studie

Cílem studie je vyhodnotit pomocí vícerozměrných statistických metod (analýza hlavních komponent /PCA/, faktorová analýza /FA/, analýza shluků /CLU/) vliv minerálního (NPK) a organického hnojení (hnůj /FYM/ + NPK, kejda skotu /CS/ + NPK, kejda skotu /CS/ + sláma /St/ + NPK) na stav půdní organické hmoty (obsah organického uhlíku, frakcionaci humusových látek /obsah humusových látek - HL, huminových kyseliny - HK, fulvokyselin - FK/, stupeň humifikace, barevný kvocient - poměr  $Q_{4/6}$ ), půdní reakci a obsah přístupných živin (dusík, fosfor, draslík, hořčík) v půdě v dlouhodobých polních výživářských pokusech Výzkumného ústavu rostlinné výroby Praha-Ruzyně založených v roce 1954 na půdním typu hnědozem glejová v řepářské výrobní oblasti v nadmořské výšce 340–360 m n. m.

#### Popis výzkumného objektu včetně metod studia

Dlouhodobé polní výživářské pokusy (RFE, VÚRV, v.v.i.) se nachází v západní části Prahy (50°05'15"N, 14° 17'28"E), v nadmořské výš-



ce 338 m. Průměrná roční teplota lokality je 8,5 °C s průměrným úhrnem srážek 495,8 mm (průměrné hodnoty za období 1954–2015, meteorologická stanice Praha-Ruzyně) viz obr. 4.1.1. Půdním typem je hnědozem modální /HNm/ (Němeček et al. 2011), jílovitohlinitá, na spraši, částečně na křídové opuce, s vyšším obsahem hrubého prachu a nižším obsahem jílnatých částic a jílu. Ornice o mocnosti 26–33 cm přechází subhorizontem 34–54 cm do výrazného ořechovito-prismatického iluviálního horizontu zasahujícího do hloubky 77–80 cm, s přechodem do spraše v hloubce 85–120 cm. Úroveň podzemní vody je asi 20 m pod povrchem.

RFE se skládá z pěti honů, každý o rozměrech 144 × 96 m. Na každém honu je aplikováno 24 variant hnojení ve čtyřech opakováních, celkem se každý hon skládá z 96 parcelék. Všechny 24 variant hnojení je na honu rozmístěno v náhodném experimentálním uspořádání. Každá parcelka má rozměry 12 × 12 m a sklizňová plocha představuje plochu 5 × 5 m. Zdrojem dat k prezentovaným výsledkům jsou pokusy na honu č. IV z období let 2014 až 2016.

Hon IV má následující osevní postup: 45 % obilovin, 33 % okopanin, 22 % píce (vojtěška /*Medicago sativa*/, vojtěška /*Medicago sativa*/, pšenice ozimá /*Triticum aestivum*/, cukrová řepa /*Beta vulgaris*/, ječmen jarní /*Hordeum vulgare*/, brambory /*Solanum tuberosum*/, pšenice ozimá /*Triticum aestivum*/, cukrová řepa /*Beta vulgaris*/, ječmen jarní s podsevem /*Hordeum vulgare*/).

Hnojiva a jejich kombinace (varianty hnojení):

- kontrola bez hnojení (Control),
- minerální hnojení NPK (NPK),
- minerální hnojení NPK se chlěvkovým hnojem (FYM),
- minerální hnojení NPK s hovězí kejdou (CS),
- minerální hnojení NPK s hovězí kejdou a slámou (CS + St).

Statková hnojiva byla v rámci osevních postupů aplikována pouze pod okopaniny na podmíněný pozemek během podzi-

mu. Dávky statkových hnojiv jsou ekvivalentem množství organické hmoty v hnoji hospodářských zvířat (hovězí kejdy), což je 21 t.ha<sup>-1</sup> (60 t.ha<sup>-1</sup>) pod cukrovou řepu a 15 t.ha<sup>-1</sup> (43 t.ha<sup>-1</sup>) pod brambory. Z minerálních hnojiv byly v pokusu aplikovány ledek amonný s vápencem (27 % N), superfosfát (8,3 % P) a chlorid draselný (49,8 % K). Fosforečná a draselná hnojiva byla aplikována každý rok na podzim a zapravena do půdy podzimní orbou. Dusíkatá hnojiva byla aplikována každý rok na jaře před setím a rovněž v průběhu vegetace, v termínu dle růstové fáze porostu. Průměrné roční dávky živin aplikovaných při hnojení jednotlivými hnojivy jsou uvedeny v tabulce 4.1.1.

Tab. 4.1.1: Průměrné dávky živin aplikované do půdy minerálními a statkovými hnojivy (kg.ha<sup>-1</sup>).

| Prvek/<br>Varianta | Control | NPK | NPK+<br>FYM | NPK+CS | NPK+<br>CS+St |
|--------------------|---------|-----|-------------|--------|---------------|
| N                  | 0       | 91  | 116         | 119    | 125           |
| P                  | 0       | 31  | 39          | 37     | 38            |
| K                  | 0       | 146 | 163         | 163    | 176           |

Pozn.: NPK - minerální hnojení, FYM - hnůj, CS - kejda skotu, St - sláma

Půdní vzorky byly odbírány z horizontu Ap (0–30 cm) z každé varianty hnojení během období 2014–2016 (n = 3). Půdní reakce byla stanovena potenciometrickou metodou: 50 ml 0,2 mol KCl (InoLab pH 730, WTW, Německo). Obsah C<sub>org</sub> (SOC) byl stanoven kolorimetricky dle (Sims, Haby 1971), byla použita oxidimetrická titrace podle (Nelson, Sommers 1996). Celkový obsah dusíku byl stanoven v koncentrované kyselině sírové v ohřívacím bloku (Tecator, Švédsko), následovala Kjeldahlova metoda (Kjeldahl 1883, Kirk 1950). Frakcionace humusových látek byla provedena krátkou frakcionací dle metody Kononové-Belchikové (Kononova 1963). Postup: obsah HK a FK (= součet



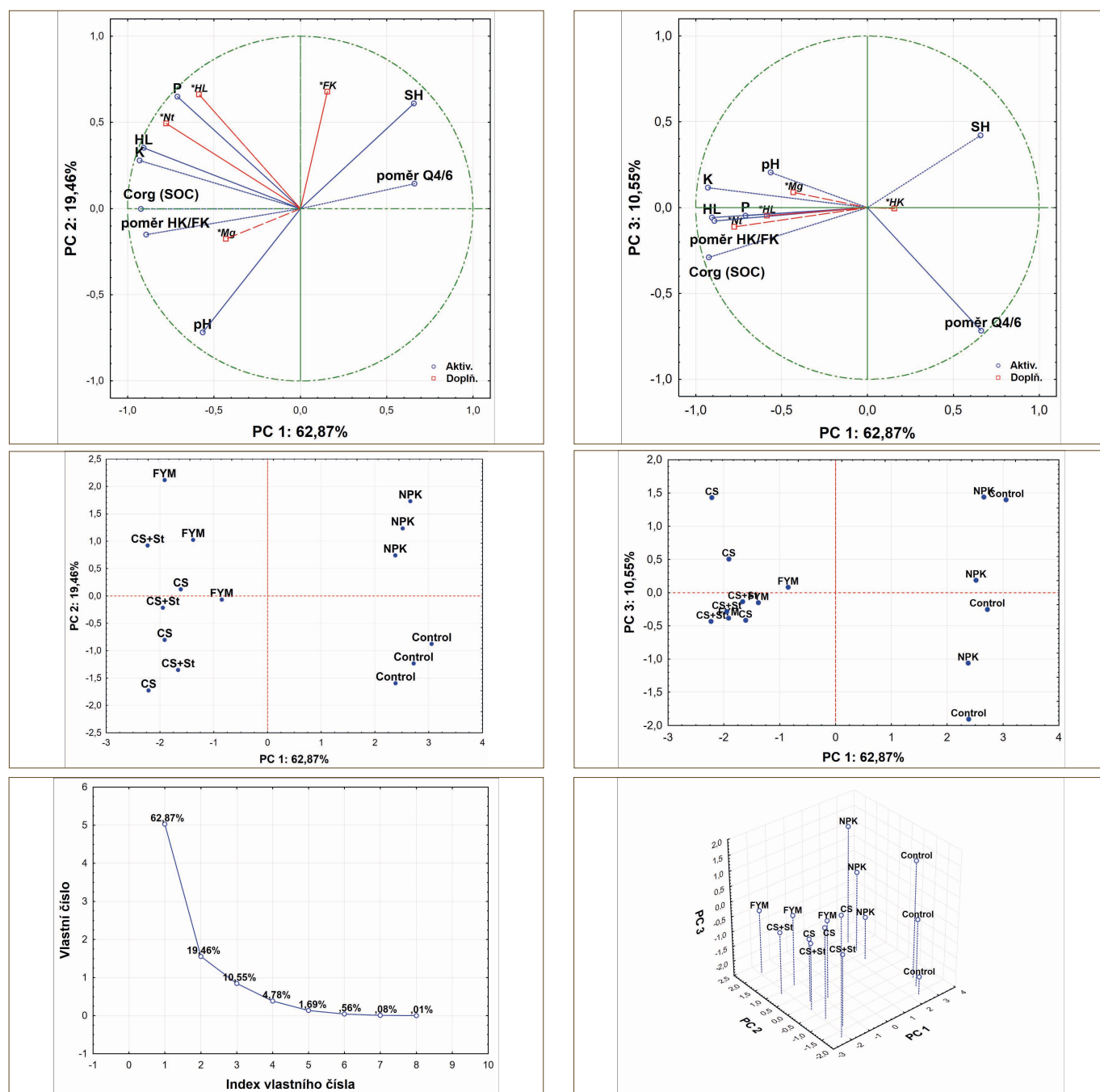
Obr. 4.1.1: Letecký snímek RFE v Praze-Ruzyni s experimentálními hony I-V (Šrek et al. 2010, Hlisenkovský et al. 2016). Latinská čísla (I-V) označují experimentální hony. Pět experimentálních honů bylo opuštěno z důvodu záboru pozemků pro výstavbu silnic v devadesátých letech.

HL) byl extrahován z 5 g vzorku půdy směsí 100 ml 0,1 mol roztoku NaOH a 0,1 mol  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$  (1: 1, obj./obj.). Uhlík v HL, HK, byl stanoven metodou oxidimetrické titrace. Obsah HK byl vypočten jako rozdíl mezi HL a HK. Stupeň humifikace (SH) byl vypočten jako poměr obsahu HK a obsahu SOC x 100. Barevný index ( $Q_{4/6}$ ) byl vypočten jako poměr absorpance HL ve spektrálním rozsahu UV-VIS při 465 nm a 665 nm ( $= A_{465}/A_{665}$ ). UV-VIS spektra byly měřeny za použití přístroje Varian Carry 50 Probe s optickým vláknem v rozmezí 300–700 nm (Varian Mulgrave, Victoria, Austrálie). Podrobný popis metody uvádí Pospíšilová et al. (2016). Obsah přístupných živin byl stanoven

metodou Mehlich III (Mehlich 1984). Koncentrace P, K, Ca a Mg byly analyzovány pomocí ICP-OES (Thermo Scientific iCAP 7400 Duo, Thermo Fisher Scientific, Cambridge, UK).

### Výsledky

Na grafu komponentních vah PC1, PC2, PC3 v období 2014–2016 jsou významné jen první tři osy, které dohromady vyčerpávají cca 93 % variability (obr. 4.1.2). Celková variabilita (osy PC1 a PC2) je více než 82 %. Na ose PC1 v grafu PC1xPC2 byl zjištěn silný a pozitivní vztah  $C_{\text{org}}$ /SOC/ s obsahem HK ( $r = 0,86$ ) a dále mezi  $C_{\text{org}}$ /SOC/ a poměrem HK/FK ( $r = 0,75$ ). Středně



Pozn.:  $C_{\text{org}}$  (SOC) - půdní organický uhlík, HL - humusové látky, HK - huminové kyseliny, FK - fulvokyseliny, SH - stupeň humifikace,  $Q_{4/6}$  - barevný kvocient, pH - půdní reakce, Nt - celkový dusík, P - fosfor, K - draslík, Mg - hořčík; NPK - minerální hnojení, FYM - hnůj, CS - kejda skotu, St - sláma

Obr. 4.1.2: Analýza PCA půdních vlastností (pH,  $C_{\text{org}}$ , HL, HK, FK, poměr HK/FK, SH, poměr  $Q_{4/6}$ , obsah Nt, P, K a Mg) v hloubce 0–30 cm, v období 2014–2016 ve variantách hnojení.

pozitivní vztah byl zaznamenán mezi  $C_{org}/SOC/$  a koncentrací K ( $r = 0,79$ ), resp. koncentrací P ( $r = 0,69$ ). Na ose PC2 neexistuje významná korelace, ale diferencují se směry, např. podle pH, SH a poměru  $Q_{4/6}$ .

Na ose PC1 v grafu PC1xPC3 je obsah HK v pozitivním vztahu s poměrem HK/FK. HK, poměr HK/FK je ve středně pozitivním vztahu s koncentrací K a  $C_{org}/SOC/$ . Na ose PC2 neexistuje významná korelace, ale diferencují se směry podle SH a poměru  $Q_{4/6}$ .

Podél osy PC1 (v grafu PC1xPC2 a PC1xPC3) jsou jednoznačně rozdělené varianty hnojení z pohledu obsahu  $C_{org}/SOC/$ , poměru HK/FK, a dále i obsahu živin P a K. Nejvyšší obsahy  $C_{org}/SOC/$ , P, K byly zaznamenány ve variantách hnojení FYM, CS+St a CS. Osa PC2 (v grafu PC1xPC2) charakterizuje pH, SH a  $Q_{4/6}$  a diferencuje shluky variant hnojení NPK, FYM a variantu bez hnojení (Control).

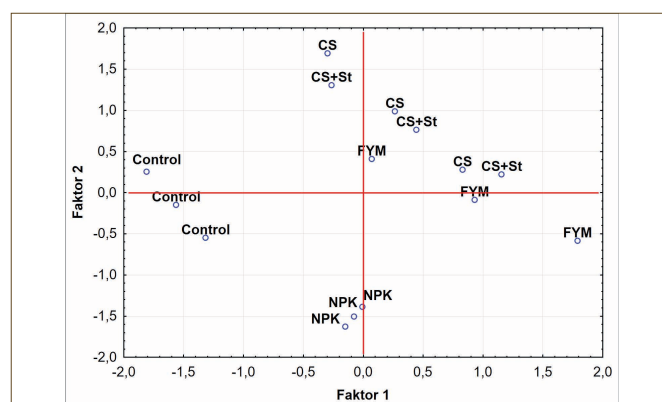
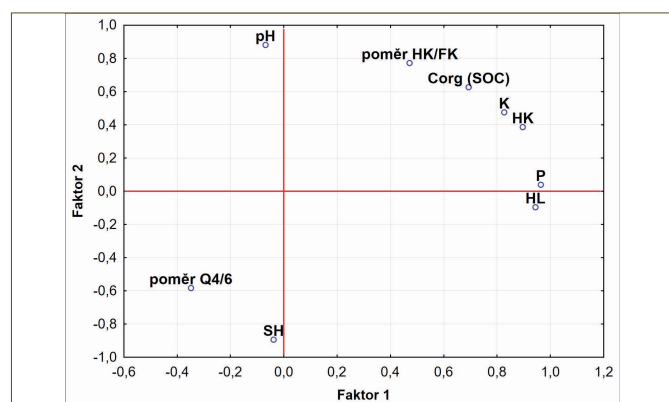
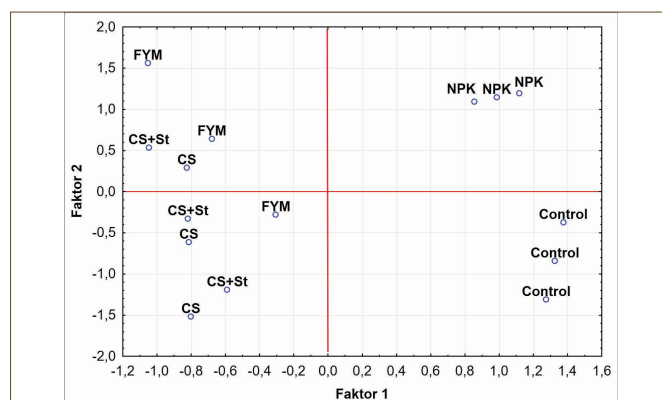
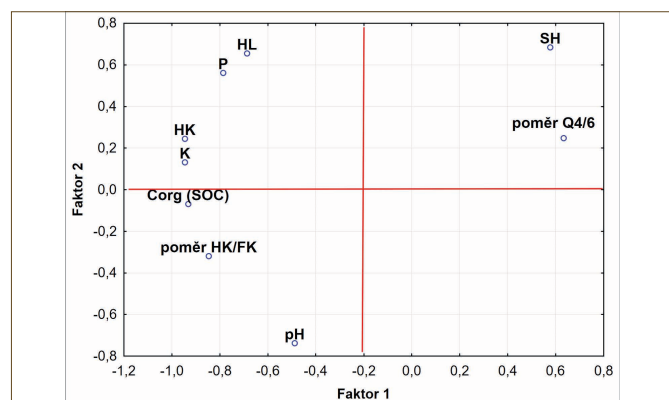
Vícerozměrná analýza PCA (osy PC1, PC2, PC3) významně diferencovala (v hodnocených parametrech viz pH,  $C_{org}/SOC/$ , obsah HL, poměr HK/FK, SH, poměr  $Q_{4/6}$ , obsah P a K) dvě kategorie variant hnojení:

- vlivem účinku hnojení ve variantě FYM, CS+St i CS lze dlouhodobě udržet půdu v optimální kvalitě a dosahovat dlouhodobě stabilních výnosů;
- ve variantě hnojení NPK došlo k výraznému ovlivnění půdních vlastností – pokles pH, nízký obsah  $C_{org}/SOC/$ , HL, HK, nízký poměr HK/FK, vysoký stupeň SH, nižší obsahy P, K, Mg

a jejich zhoršená dostupnost pro rostliny v důsledku poklesu pH a další negativní vlivy pro přírodní prostředí (vyplavování dusíku aj.).

Faktorová analýza (obr. 4.1.3) diferencovala obdobně jako metoda PCA (v hodnocených parametrech) dvě kategorie: (1) varianty hnojení FYM, CS+St i CS (vyšší kvalita humusu) - nižší stupeň acidity půdy, vyšší obsah  $C_{org}/SOC/$  a HL, převaha HK, střední SH, vysoký obsah přístupných živin; (2) varianta hnojení NPK (nižší kvalita humusu) - vyšší acidita půdy, nízký obsah  $C_{org}/SOC/$ , HL, HK, převaha HK, vysoký stupeň SH, nižší obsahy přístupných živin (viz rozptylové diagramy komponentního skóre).

Faktorové váhy vysvětlují korelace mezi faktory a znaky (viz tab. 4.1.3). Představují nejdůležitější informaci, na které je založena interpretace faktorů. Můžeme říci, že Faktor 1 popisuje půdní vlastnosti z hlediska obsahu uhlíku (HL, HK,  $C_{org}/SOC/$ ) a obsahu živin (P, K), Faktor 2 popisuje kyselost /acidifikaci/ půdního prostředí /znak pH/ a dekompoziční procesy /mineralizaci a humifikaci – poměr HK/FK, SH/ v grafu faktorových vah. Komunalita představuje podíl proměnlivosti znaku vyjádřené dotýčnými faktory. Je obdobná hodnotě  $R^2$ , kterou obdržíme, když budeme původní znaky vysvětlovat pomocí regrese vybranými faktory (Meloun et al. 2018). V tabulce 4.1.2 je uveden příspěvek Faktoru 1 a Faktoru 2 do komunalit. Z tabulky je patrné, že komunalita nabývá vysokých hodnot, a tím určuje, že znaky hodnot jsou velmi dobře započteny navrženým faktorovým modelem.



Pozn.:  $C_{org}$  (SOC) - půdní organický uhlík, HL - humusové látky, HK - huminové kyseliny, SH - stupeň humifikace,  $Q_{4/6}$  - barevný kvocient, pH - půdní reakce, P - fosfor, K - draslík; NPK - minerální hnojení, FYM - hnůj, CS - kejda skotu, St - sláma

Obr. 4.1.3: Faktorová analýza (graf faktorových vah a rozptylový diagram komponentního skóre) půdních vlastností v hloubce 0–30 cm v období 2014–2016 ve variantách hnojení (zdrojové matice dat: metoda bez rotace /nahore/, metoda Varimax normalizovaný /dole/).

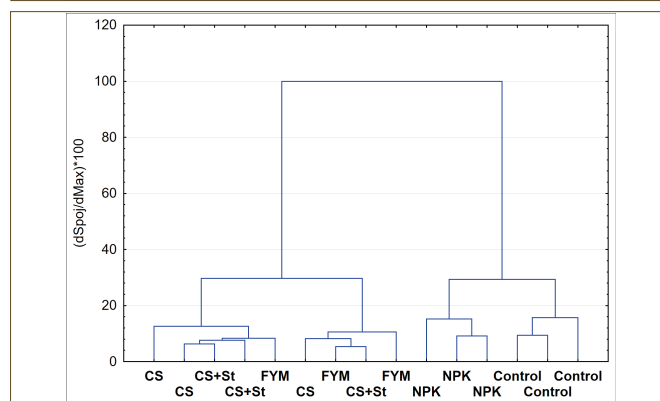
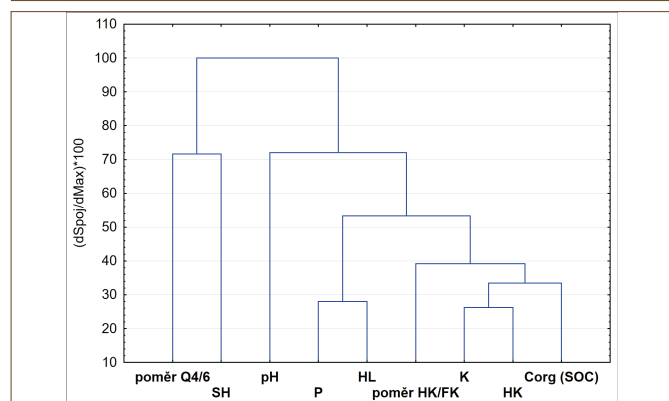
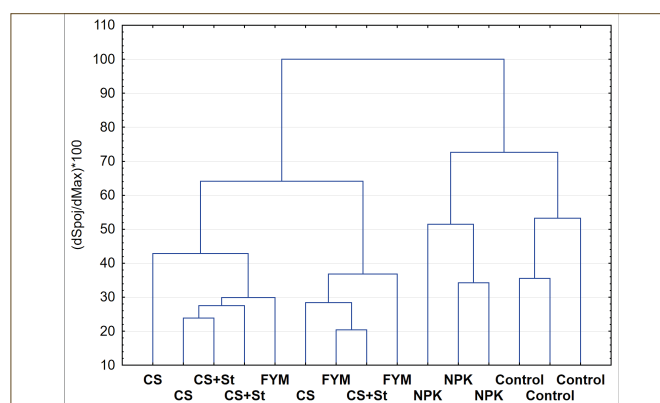
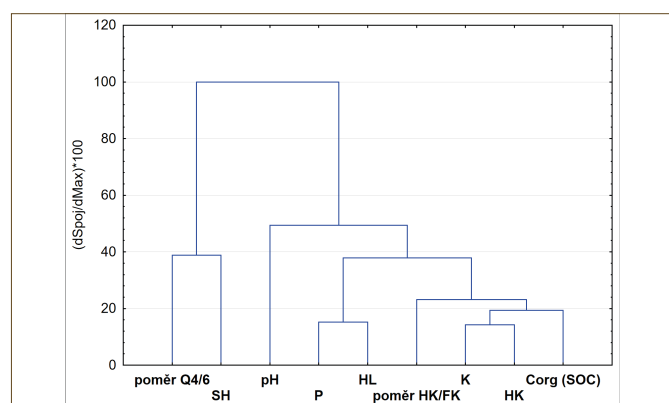
Dendrogramy na obrázku 4.1.4 provedené různými metodami (Wardova, Vážený průměr skupiny dvojic) pro redukované proměnné u variant hnojení potvrzují přítomnost shluků Control, NPK a prolínající se shluky FYM, CS+St a CS. Obdob-

ně analýza CLU rozdělila i objekty půdních vlastností – shluk poměr  $Q_{4/6}$  a SH. Dále shluk obsah P, obsah HL, poměr HK/FK, obsah K, obsah HK a  $C_{org}$ . Analýza CLU je ve shodě s analýzou FA a PCA.

Tab. 4.1.2: Faktorové váhy a příspěvky daného faktoru do komunity pro jednotlivé znaky po rotaci Varimax normalizovaný.

| Faktorové váhy      |          |          | Příspěvky daného faktoru do komunalita |          |            |
|---------------------|----------|----------|----------------------------------------|----------|------------|
| Znak                | Faktor 1 | Faktor 2 | Faktor 1                               | Faktor 2 | Komunalita |
| $C_{org}$ /SOC/ (%) | 0,6937   | 0,6259   | 0,4813                                 | 0,8730   | 0,9979     |
| HL (g/kg)           | 0,9441   | -0,0960  | 0,8914                                 | 0,9006   | 0,9994     |
| HK (g/kg)           | 0,8970   | 0,3868   | 0,8046                                 | 0,9542   | 0,9998     |
| poměr HK/FK         | 0,4721   | 0,7716   | 0,2229                                 | 0,8183   | 0,9994     |
| SH (%)              | -0,0375  | -0,8943  | 0,0014                                 | 0,8012   | 0,9963     |
| poměr $Q_{4/6}$     | -0,3481  | -0,5842  | 0,1212                                 | 0,4625   | 0,8564     |
| pH (KCl)            | -0,0679  | 0,8816   | 0,0046                                 | 0,7818   | 0,9665     |
| P (mg/kg)           | 0,9652   | 0,0389   | 0,9316                                 | 0,9331   | 0,9959     |
| K (mg/kg)           | 0,8277   | 0,4760   | 0,6851                                 | 0,9117   | 0,9931     |

Pozn.:  $C_{org}$  (SOC) - půdní organický uhlík, HL - humusové látky, HK - huminové kyseliny, SH - stupeň humifikace,  $Q_{4/6}$  - barevný kvocient, pH - půdní reakce, P - fosfor, K - draslík; NPK - minerální hnojení, FYM - hnůj, CS - kejda skotu, St - sláma



Pozn.:  $C_{org}$  (SOC) - půdní organický uhlík, HL - humusové látky, HK - huminové kyseliny, SH - stupeň humifikace,  $Q_{4/6}$  - barevný kvocient, pH - půdní reakce, P - fosfor, K - draslík; NPK - minerální hnojení, FYM - hnůj, CS - kejda skotu, St - sláma

Obr. 4.1.4: Dendrogram objektů půdních vlastností a variant hnojení zdrojové matice dat (Wardova metoda /nahore/, Vážený průměr skupiny dvojic /dole/).

#### Dílčí závěr

Dlouhodobé hnojení minerálními (NPK) a organickými hnojivy (hnůj, kejda) v dlouhodobém experimentu (60 let trvání) na půdním typu hnědozem modální v České republice (Praha-Ru-

zyně) vede k výrazné diferenciaci půdních vlastností v hloubce 0–30 cm z pohledu kvality humusu (obsah  $C_{org}$  /SOC/, obsah HL, HK a FK, poměru HK/FK, poměru  $Q_{4/6}$ , stupeň humifikace, pH a obsahu přístupných živin). Metody vícerozměrné analýzy

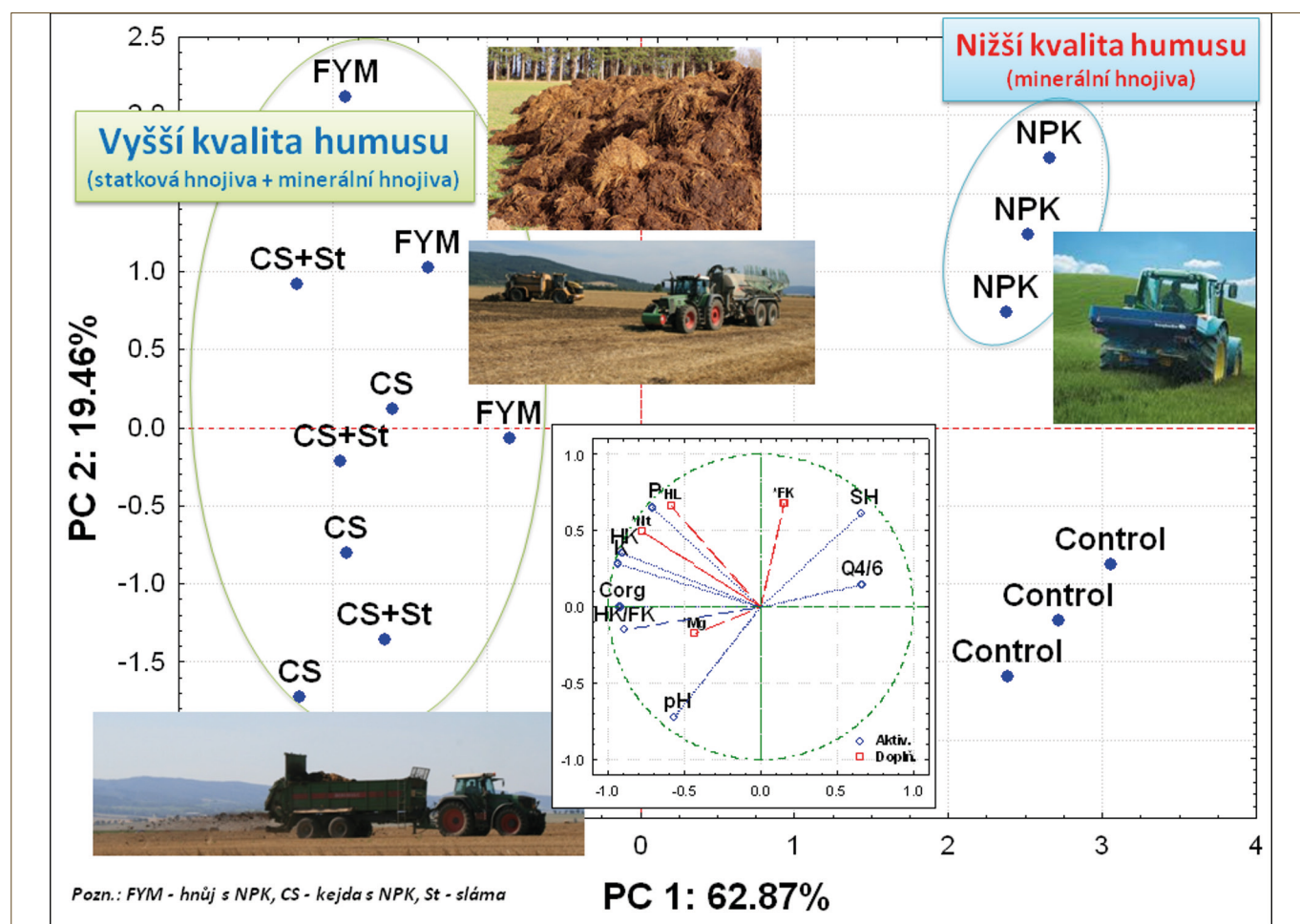


PCA, FA, CLU významně diferencovaly v hodnocených parametrech dvě kategorie variant hnojení:

1. **varianta s minerálním hnojením NPK (nižší kvalita humusu)**  
- vyšší acidita, nižší obsah organického uhlíku a humusových látek, převládají fulvokyseliny, vyšší stupeň humifikace, nižší obsah přístupných živin (fosfor, draslík, hořčík) v půdě;
2. **varianty s minerálními a organickými hnojivy FYM, CS+St a CS (vyšší kvalita humusu – aplikace hnoje, kejdy)** - nižší acidita, vyšší obsah organického uhlíku a humusových látek, převládají huminové kyseliny, střední stupeň humifikace, vysoký obsah přístupných živin (fosfor, draslík, hořčík) v půdě.

Dlouhodobá aplikace minerálních hnojiv NPK bez vstupů organických látek urychluje mineralizaci humusu a degradaci kvality půdy se všemi negativními důsledky, jako je vyluhování dusíku, vyšší „dostupnost“ toxických prvků pro rostliny, pomalá energie pro půdní mikroorganismy apod. Aplikací organických hnojiv (hnůj, kejda) můžeme dosahovat dlouhodobě stabilních výnosů při zachování kvality a zdraví půdy (dlouhodobě udržitelné hospodaření se SOM).

Rozšířené výsledky studie byly publikovány v časopisu Journal of Soil and Sediments (Menšík et al. 2018).



Obr. 4.1.5: Grafický abstrakt k dílčímu závěru.

#### 4.2. Stav půdní organické hmoty a živin v dlouhodobém polním experimentu s aplikací organických a minerálních hnojiv v různých půdně-klimatických podmínkách ČR s ohledem na očekávané změny klimatu

##### Cíl studie

Cílem výzkumu je vyhodnotit vliv dlouhodobé aplikace organických a minerálních hnojiv (kontrola, FYM + 0, FYM + 3NPK a FYM + 2N) na základní půdní vlastnosti (půdní reakce, obsah uhlíku, obsah dusíku, poměr C/N, obsah přístupných živin) v různých půdně-klimatických podmínkách (stanoviště Ivanovice na Hané /ICRFE/, Čáslav /CCRFE/ a Lukavec /LCRFE/) založených v roce 1956 (viz obr. 4.2.1 a tab. 4.2.1). Hodnocené období bylo 2012–2015.

##### Popis výzkumného objektu včetně metod studia

Systém hnojení, dávky hnojiv a osevní postup byl jednotný na

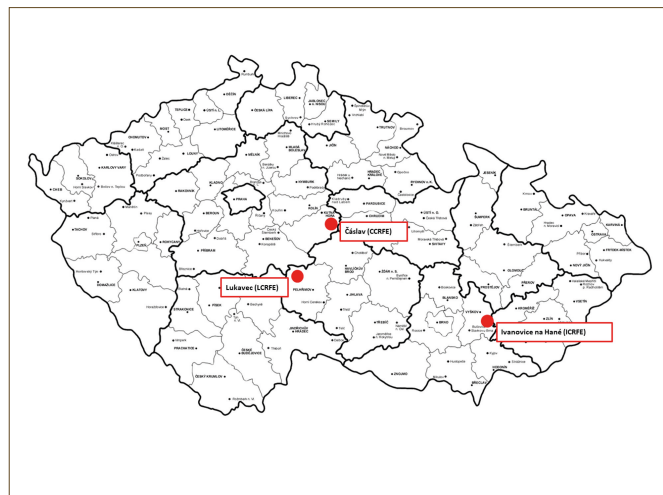
všech stanovištích. Byly vybrány čtyři varianty hnojení (statková + minerální hnojiva): (1) Kontrola/Control/ (bez hnojení, pouze vápnění v dávce 2 t.ha<sup>-1</sup> - základní půdní úrodnost stanoviště); (2) Hnůj/FYM/ + 0 (dávka hnoje 40 t.ha<sup>-1</sup> + minerální hnojiva: N, P, K 0 kg.ha<sup>-1</sup>); (3) Hnůj/FYM/ + N3PK (dávka hnoje 40 t.ha<sup>-1</sup> + minerální hnojiva: N 120 kg.ha<sup>-1</sup>, P 80 kg.ha<sup>-1</sup>; K 100 kg.ha<sup>-1</sup>); (4) Hnůj/FYM/ + N2 (dávka hnoje 40 t.ha<sup>-1</sup> + minerální hnojiva: N 80 kg.ha<sup>-1</sup>). Dusík byl dodáván v ledku amonném s vápencem, fosfor v superfosfátu, draslík v draselné soli. Základní výrobní a klimatické podmínky stanovišť uvádí tabulka 4.2.2. Velikost jednotlivých modelových honů se pohybuje od 0,40 do 0,60 ha. Každý modelový hon byl rozdělen na 48 parcelek (12 variant hnojení ve 4 opakováních) o velikosti 8 x 8 m až 9 x 9 m. Sklizňová parcela (varianta hnojení) měla velikost 5 x 5 m = 25 m<sup>2</sup>.

Tab. 4.2.1: Základní výrobní a klimatické podmínky stanovišť.

| Stanoviště                        | Ivanovice na Hané      | Čáslav                                               | Lukavec                |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------------------------------------|------------------------|
| Výrobní typ                       | řepařský               | řepařský                                             | bramborářský           |
| Nadmořská výška (m.n.m)           | 225                    | 263                                                  | 620                    |
| <b>Půda</b>                       |                        |                                                      |                        |
| Půdní typ                         | Černozem modální (CEm) | Černozem karbonátová /luviská- degradovaná/ (CEc/I/) | Kambizem modální (KAm) |
| Půdní druh                        | hlinitá                | hlinitá                                              | písčitohlinitá         |
| Hloubka ornice (m)                | 0,35–0,45              | 0,40–0,50                                            | 0,15–0,20              |
| <b>Klimatické charakteristiky</b> |                        |                                                      |                        |
| Suma ročních srážek (mm)          | 556                    | 590                                                  | 686                    |
| Průměrná roční teplota (°C)       | 8,4                    | 8,1                                                  | 6,8                    |
| Klimatický region                 | teplý, mírně suchý     | teplý, mírně vlhký                                   | mírně teplý, vlhký     |

Půdní reakce byla stanovena potenciometrickou metodou: 50 ml 0,2 mol KCl (InoLab pH 730, WTW, Německo). Obsah  $C_{org}$  (SOC) byl stanoven kolorimetricky dle (Sims, Haby 1971), byla použita oxidimetrická titrace podle (Nelson, Sommers

1996). Celkový obsah dusíku byl stanoven v koncentrované kyselině sírové v ohřívacím bloku (Tecator, Švédsko), následovala Kjeldahlova metoda (Kjeldahl 1883, Kirk 1950). Obsah přístupných živin byl stanoven metodou Mehlich III (Mehlich 1984). Koncentrace P, K, Ca a Mg byly analyzovány pomocí ICP-OES (Thermo Scientific iCAP 7400 Duo, Thermo Fisher Scientific, Cambridge, UK). Půdní vzorky byly odbírány z horizontu Ap (0–30 cm) z každé varianty hnojení během období 2012–2015 (n = 4).



Obr. 4.2.1: Přehledová mapa VOP pokusů Výzkumného ústavu rostlinné výroby, v.v.i. v ČR.

Podrobné klimatické podmínky (teplota, srážky) ve sledovaném období (2012–2015) uvádí tabulka 4.2.2.

Tab. 4.2.2: Klimatické podmínky (teplota, srážky) ve sledovaném období (2012–2015).

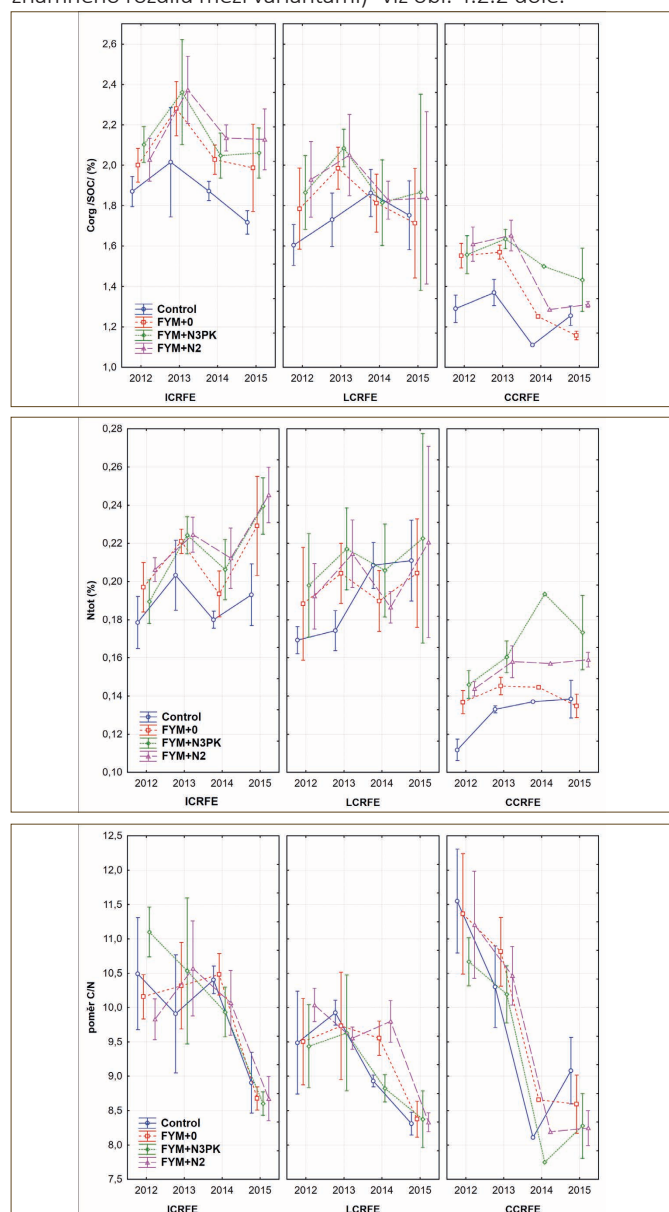
| Lokalita           | Rok  | Teplota (°C) |                           | Srážky (mm)  |                           |
|--------------------|------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|
|                    |      | Průměr /rok/ | Průměr – vegetační období | Průměr /rok/ | Průměr – vegetační období |
| Ivanovice na Hané* | 2012 | 9,6          | 16,8                      | 481,6        | 329,9                     |
|                    | 2013 | 9,2          | 15,7                      | 550,9        | 379,2                     |
|                    | 2014 | 10,5         | 15,9                      | 520,4        | 391,0                     |
|                    | 2015 | 10,4         | 16,8                      | 387,0        | 265,4                     |
| Lukavec**          | 2012 | 8,0          | 14,3                      | 744,4        | 403,5                     |
|                    | 2013 | 7,3          | 13,4                      | 875,7        | 606,5                     |
|                    | 2014 | 8,9          | 14,1                      | 708,8        | 541,5                     |
|                    | 2015 | 8,7          | 14,3                      | 576,1        | 281,2                     |
| Čáslav***          | 2012 | 9,8          | 16,3                      | 636,8        | 439,9                     |
|                    | 2013 | 9,3          | 15,6                      | 636,6        | 466,5                     |
|                    | 2014 | 10,8         | 15,9                      | 619,1        | 448,4                     |
|                    | 2015 | 11,0         | 16,7                      | 442,4        | 232,4                     |

Pozn.: \* meteorologická stanice Ivanovice na Hané, \*\* meteorologická stanice Lukavec, \*\*\* meteorologická stanice Filipov

## Výsledky

### Obsah uhlíku, dusíku a poměr C/N

Obsah SOC ( $C_{org}$ ) byl stanoven v jednotlivých letech (2012–2015) na všech třech stanovištích od 1,05 do 2,38 % viz obr. 4.2.2 (nahore). Vyšší obsahy byly zaznamenány na stanovištích ICRFE, LCRFE oproti CCRFE (degradovaná černozem). Statisticky vyšší (HSD test) obsahy SOC (v jednotlivých letech i za období 2012–2015) byly zaznamenány ve variantách (FYM+N3PK, FYM+N2) oproti Control na všech třech stanovištích a FYM+N2 (stanoviště LCRFE, CCRFE). Podobné výsledky včetně statisticky významných rozdílů (HSD test) byly zaznamenány i u obsahu dusíku ( $N_{tot}$ ) v jednotlivých letech i průměru za období 2012–2015, kde se koncentrace pohybovala v rozmezí od 0,11–0,25 % (obr. 4.2.2, uprostřed). Průměrný poměr C/N v období 2012–2015 byl stanoven od 9,5 do 10,1 na stanovištích ICRFE (bez statisticky významného rozdílu mezi variantami) a CCRFE (statisticky nižší poměr C/N ve variantě FYM+N3PK), nižší 9,0–9,5 na stanovišti LCRFE (bez statisticky významného rozdílu mezi variantami)- viz obr. 4.2.2 dole.

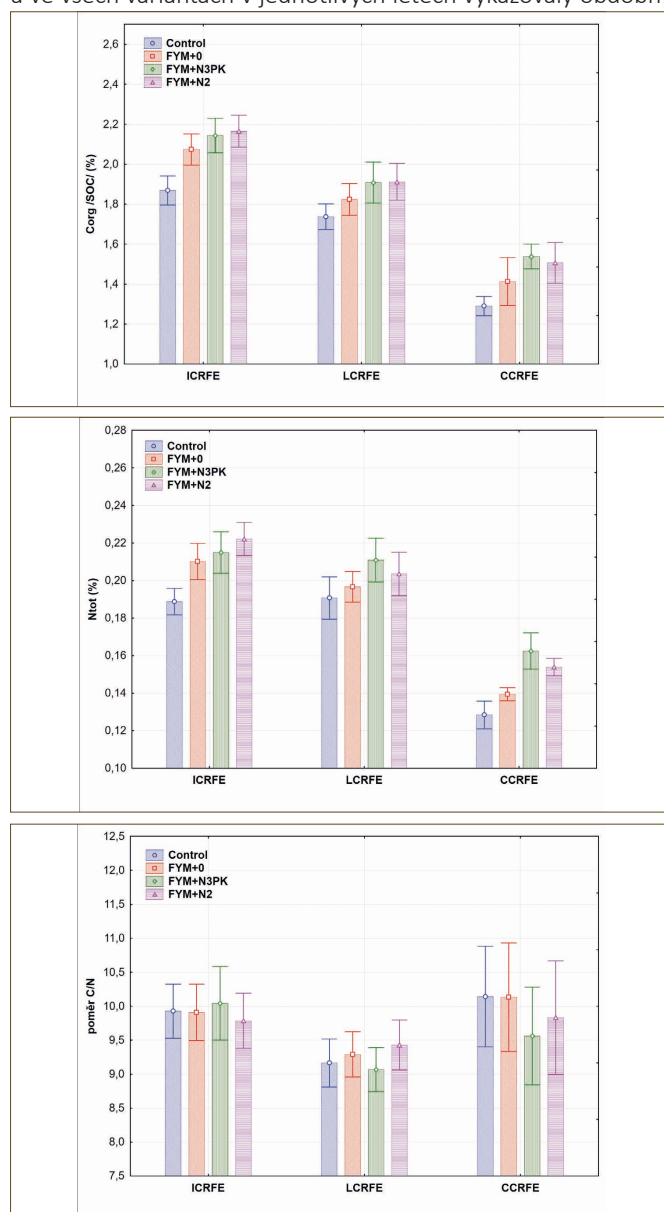


Byla prokázána statisticky významná lineární regresní závislost (data ze všech 3 lokalit) obsahu  $N_{tot}$  na  $C_{org}/SOC/$  (parametry rovnice  $N_{tot} (%) : y = 0,0293 + 0,0886 * C_{org}; r = 0,8139; p = 0,0000; R^2 = 0,6624; MEP = 0,0003; AIC = -4163,4912$ )- viz obr. 4.2.3.

### Stav pH a obsah přístupných živin

Půdní reakce (pH v KCl) na lokalitách ICRFE, CCRFE (černozem, degradovaná černozem) kolísala v rozmezí od 6,5 do 7,4 (viz obr. 4.2.4, vlevo). Pokles pH byl na obou lokalitách zaznamenán ve variantách FYM+N3PK a FYM+N2 (bez statisticky významných rozdílů v jednotlivých letech i za celé období 2012–2015). Nižší pH (5,5–5,8) bylo zaznamenáno na lokalitě LCRFE (kambizem). Na lokalitě LCRFE ve variantě FYM+N3PK bylo zaznamenáno statisticky nižší pH oproti všem ostatním variantám za období 2012–2015 (viz obr. 4.2.4, vpravo).

Obsahy přístupného P a K na všech třech lokalitách (stanovištích) a ve všech variantách v jednotlivých letech vykazovaly obdobný

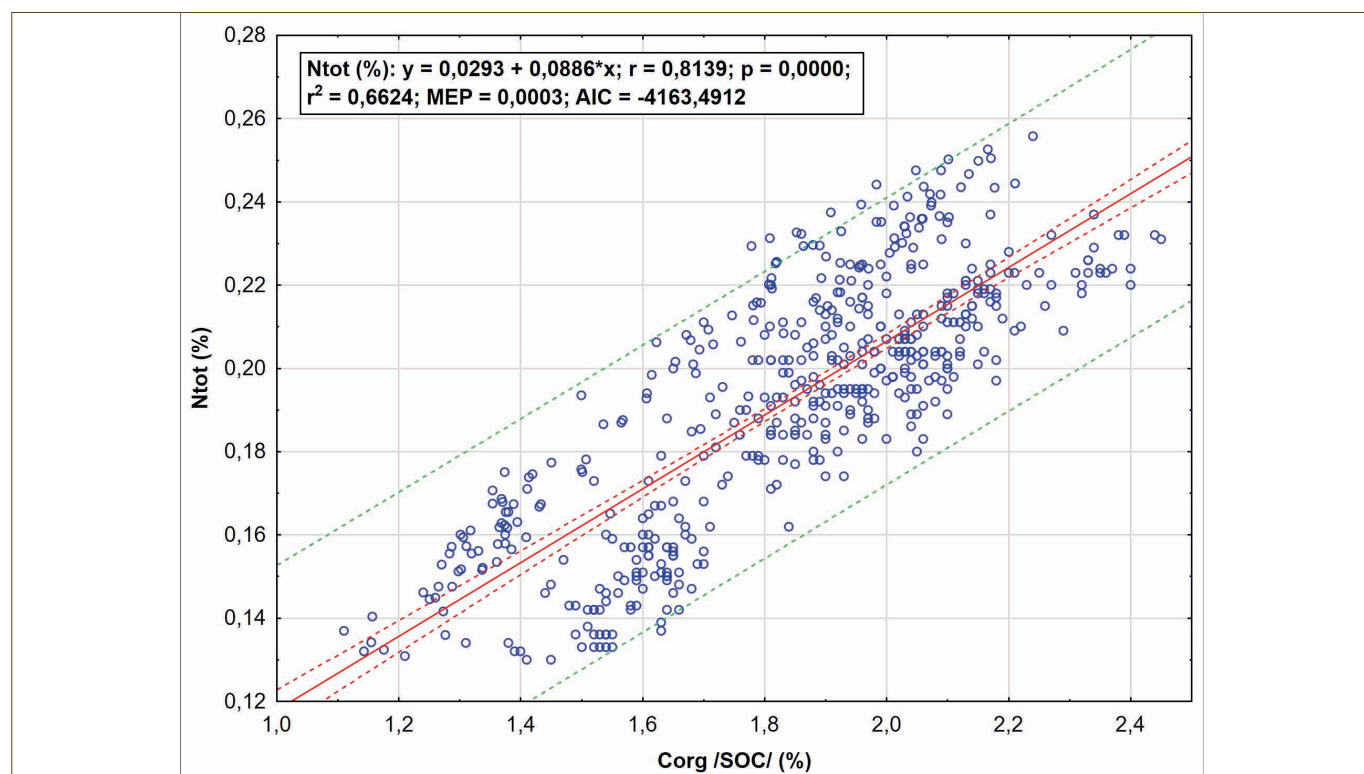


Pozn.: ICRFE - Ivanovice na Hané, CCRFE - Čáslav, LCRFE - Lukavec; Control - kontrola, FYM - hnůj, NPK - minerální hnojivo;  $C_{org}$  (SOC) - půdní organický uhlík,  $N_{tot}$  - celkový dusík, C/N ratio - poměr C/N

Obr. 4.2.2: Obsah uhlíku ( $C_{org}$ ), dusíku ( $N_{tot}$ ) a poměr C/N v období 2012–2015.

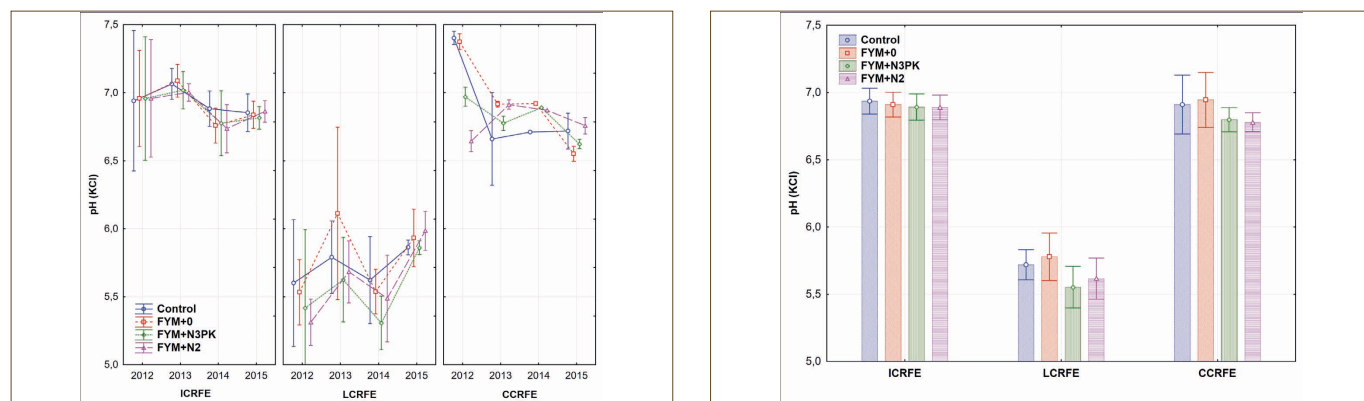
trend (kromě varianty FYM+NPK na lokalitě LCRFE – zaznamenán postupný pokles P). Průměrný obsah P za období 2012–2015 se pohybuje od 45 do 195 mg.kg<sup>-1</sup>. Nejvyšší obsahy byly zaznamenány na všech třech lokalitách ve variantě FYM+N3PK (statisticky významně vyšší oproti Control a FYM+0) - viz obr. 4.2.5. Byla

prokázána statisticky významná lineární regresní závislost (data ze všech 3 lokalit) obsahu K na P (parametry rovnice K /mg.kg<sup>-1</sup>:  $y = 69,8464 + 1,0883 * P / \text{mg.kg}^{-1}$ ;  $r = 0,7331$ ;  $p = 0,0000$ ;  $R^2 = 0,5375$ ; MEP = 3154,2151; AIC = 3674,2704) - viz obr. 4.2.6.



Pozn.:  $C_{org}$  (SOC) - půdní organický uhlík,  $N_{tot}$  - celkový dusík

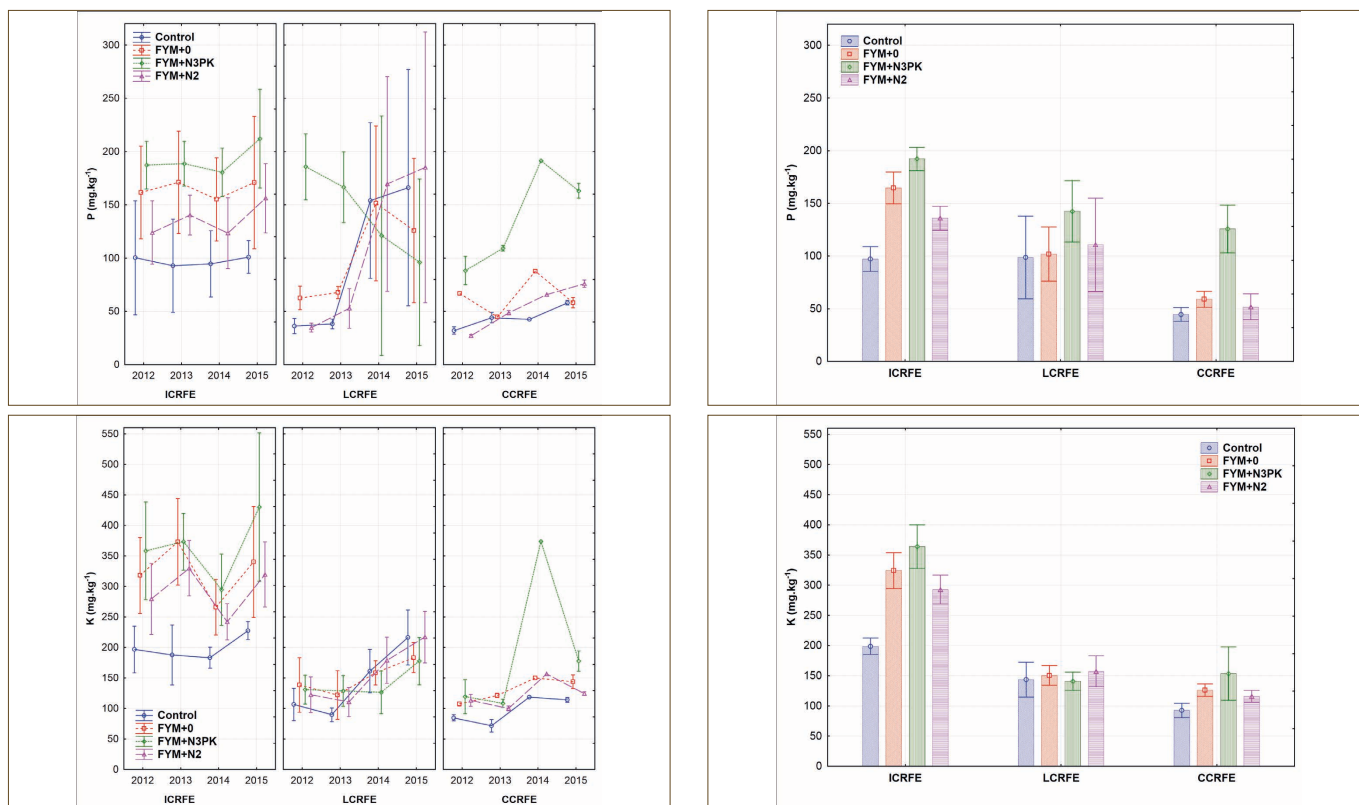
Obr. 4.2.3: Regresní lineární závislost obsahu  $N_{tot}$  na  $C_{org}$  v období 2012–2015.



Pozn.: ICRFE - Ivanovice na Hané, CCRFE - Čáslav, LCRFE - Lukavec; Control - kontrola, FYM - hnůj, NPK - minerální hnojivo

Obr. 4.2.4: Půdní reakce (pH KCl) v období (2012–2015).



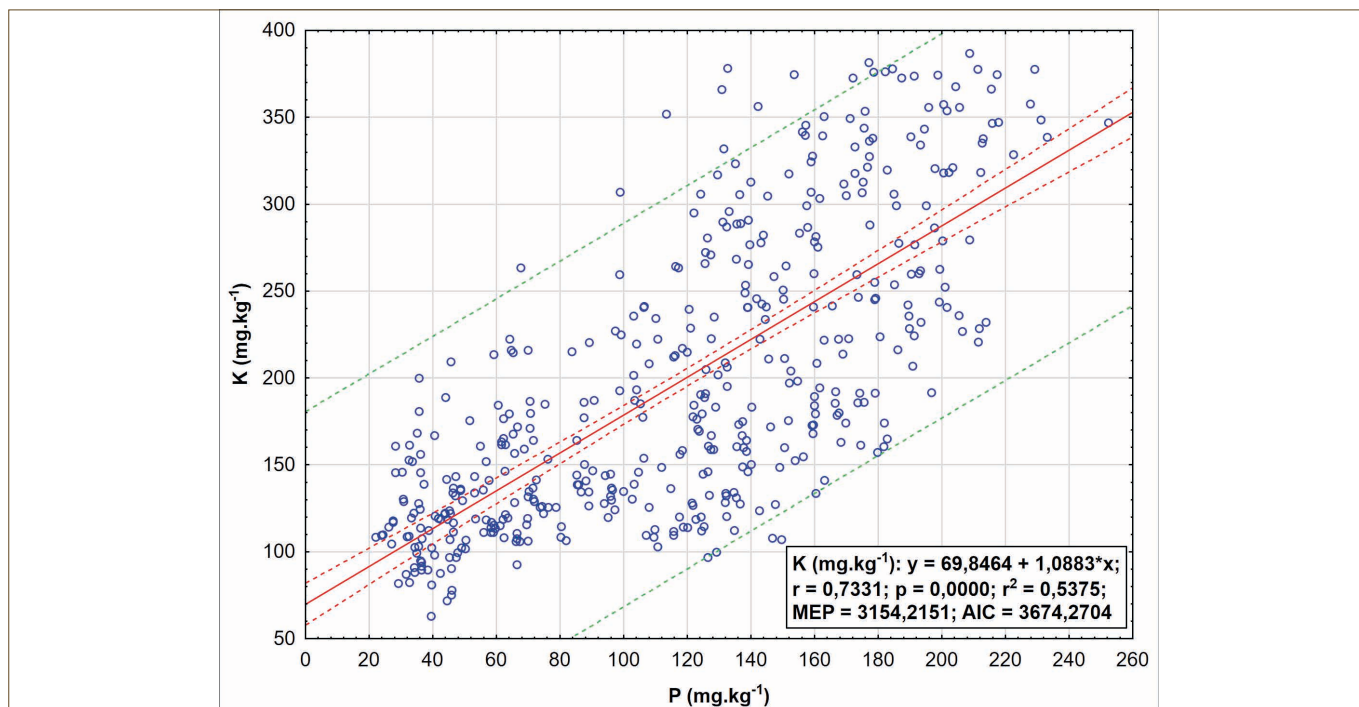


Pozn.: ICRFE - Ivanovice na Hané, CCRFE - Čáslav, LCRFE - Lukavec; Control - kontrola, FYM - hnůj, NPK - minerální hnojivo; P - fosfor, K - draslík

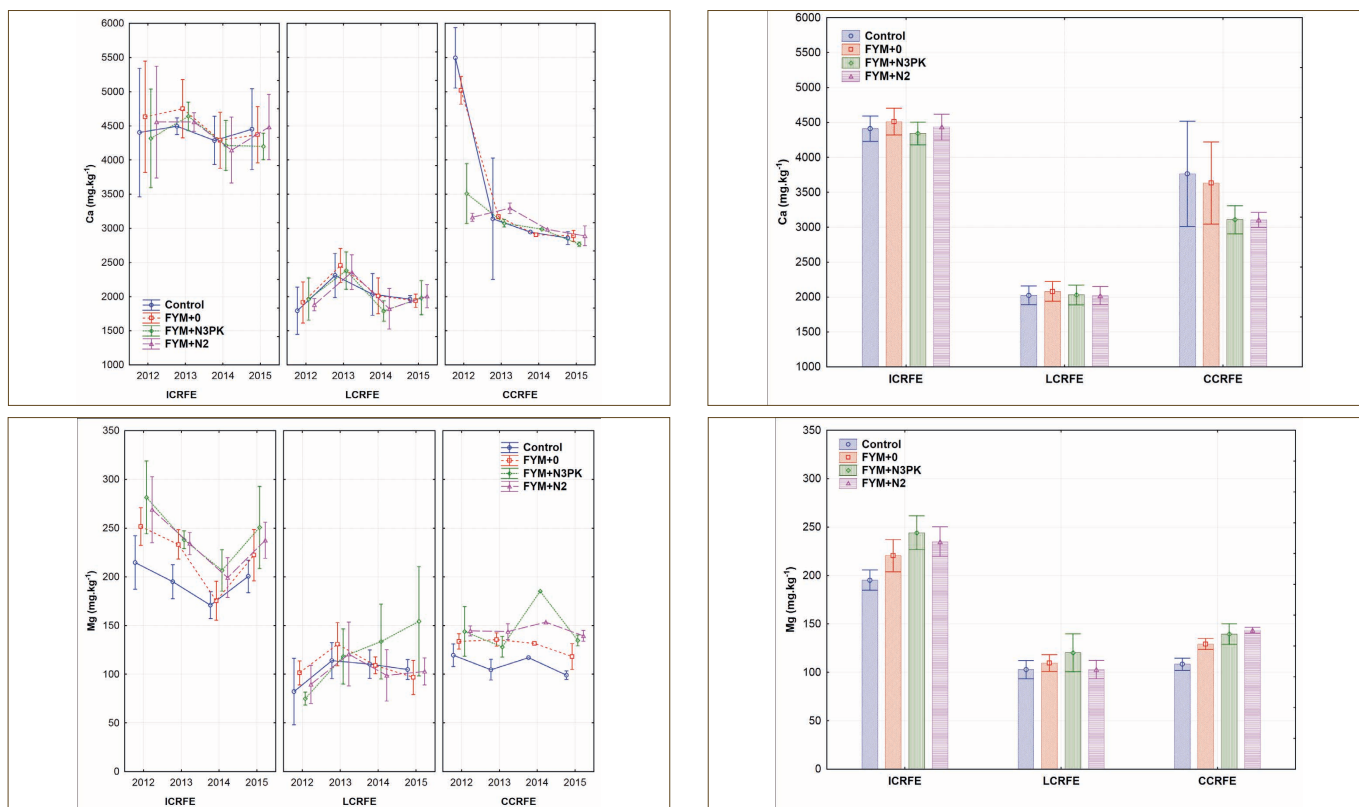
Obr. 4.2.5: Přístupné živiny (fosfor, draslík) v období 2012–2015.

Obsahy přístupného Ca a K na všech třech lokalitách (stanovištích) a ve všech variantách v jednotlivých letech vykazovaly obdobný trend (viz obr. 4.2.7). Obsah Ca na lokalitách ICRFE a LCRFE byl vyrovnaný bez statisticky významných rozdílů mezi variantami. Na všech třech lokalitách byly zaznamenány vyšší obsahy ve variantách Control a FYM+0 (na lokalitě

CCRFE byly statisticky průkazné – významně vyšší). Průměrný obsah Mg za období 2012–2015 se pohybuje od 100 do 250 mg.kg<sup>-1</sup> (vyšší obsahy na ICRFE, nižší v LCRFE a CCRFE). Nejvyšší obsahy byly zaznamenány na všech třech lokalitách ve variantě FYM+N3PK (statisticky významně vyšší oproti Control a FYM+0).



Obr. 4.2.6: Regresní lineární závislost obsahu K (mg.kg<sup>-1</sup>) na P (mg.kg<sup>-1</sup>) v období 2012–2015.



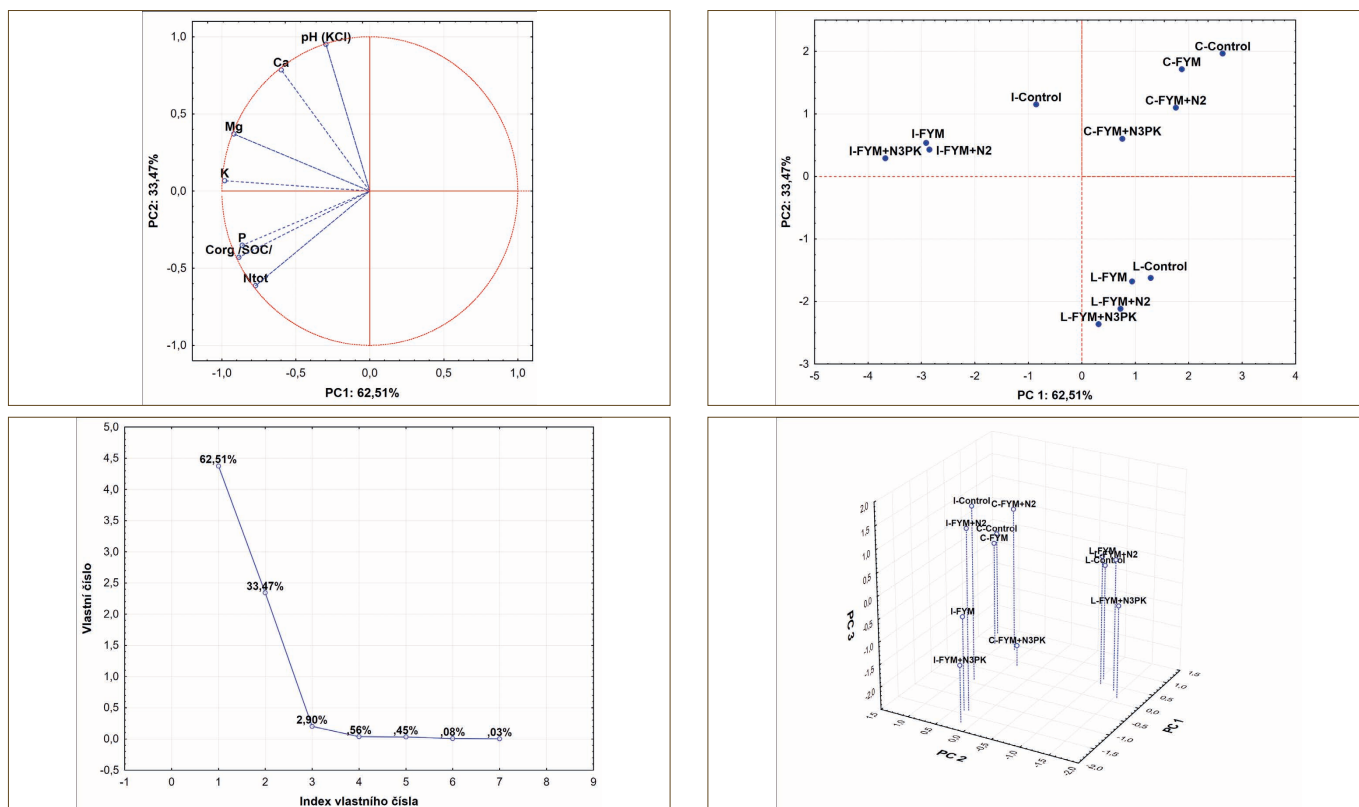
Pozn.: ICRFE - Ivanovice na Hané, CCRFE - Čáslav, LCRFE - Lukavec; Control - kontrola, FYM - hnůj, NPK - minerální hnojivo; Ca - vápník, Mg - hořčík

Obr. 4.2.7: Přístupné živiny (vápník, hořčík) v období 2012–2015.

Na grafu komponentních vah PC1, PC2 /Analýza hlavních komponent- PCA/ v období 2012–2015 jsou významné první dvě osy, které dohromady prezentují cca 95 % variability- viz obr. 4.2.8 (vlevo dole).

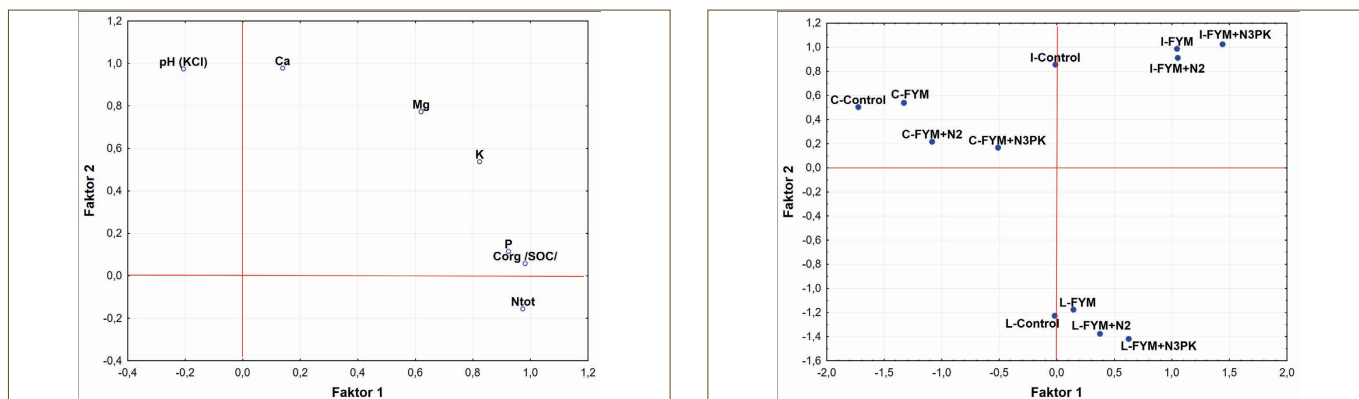
Osa PC1 v grafu PC1 x PC2 charakterizuje jednoznačně obsah přístupných živin K, Mg, P a dále stav SOM ( $C_{org}/SOC$ )- viz obr. 4.2.8 (vlevo nahoře). Obsah K jde přímo podél této osy a je s ní korelovaný -0,98 (záporná korelace), obsah Mg ( $r = -0,91$ ), obsah  $C_{org}/SOC$  ( $r = -0,88$ ), a dále obsah P ( $r = -0,86$ ) i obsah Ntot ( $r = -0,77$ ). Na ose PC2 je korelace s parametrem pH ( $r = 0,95$ ) a Ca ( $r = 0,78$ ). V rozptylovém diagramu komponentního skóre (obr. 4.2.8, vpravo nahoře) jsou podél osy PC1 rozdělené jed-

noznačně varianty hnojení a dále i jednotlivé lokality (I- ICRFE; L- LCRFE; C- CCRFE: skupiny objektů daleko od sebe, skupiny objekty jsou si nepodobné) podle obsahu přístupných živin K, Mg, P a stavu SOM (obsahu  $C_{org}/SOC$ ), podél osy PC2 varianty hnojení podle pH a obsahu Ca. Na lokalitě ICRFE se významně diferencuje Control od ostatních třech variant (shluk variant hnojení blízko sebe- objekty jsou si velmi podobné), na lokalitách LCRFE a CCRFE se významně diferencují dva shluky (1. shluk Control a FYM+0; 2. shluk FYM+N3PK a FYM+N2). Faktor 1 ve Faktorová analýza (FA)- viz obr. 4.2.9 popisuje jednoznačně vlastnosti z pohledu obsahu půdní organické hmoty (dekompozičních procesů) a obsahu živin, Faktor 2 popisuje jednoznačně stav půdy z pohledu pH.



Pozn.: ICRFE - Ivanovice na Hané, CCRFE - Čáslav, LCRFE - Lukavec; Control - kontrola, FYM - hnůj, NPK - minerální hnojivo;  $C_{org}$  (SOC) - půdní organický uhlík,  $N_{tot}$  - celkový dusík, pH - půdní reakce, P - fosfor, K - draslík, Ca - vápník, Mg - hořčík

Obr. 4.2.8: Analýza PCA půdních vlastností – organická hmota ( $C_{org}$ ,  $N_{tot}$ ), přístupné živiny (P, K, Ca, Mg) a půdní reakce (pH) v období 2012–2015.



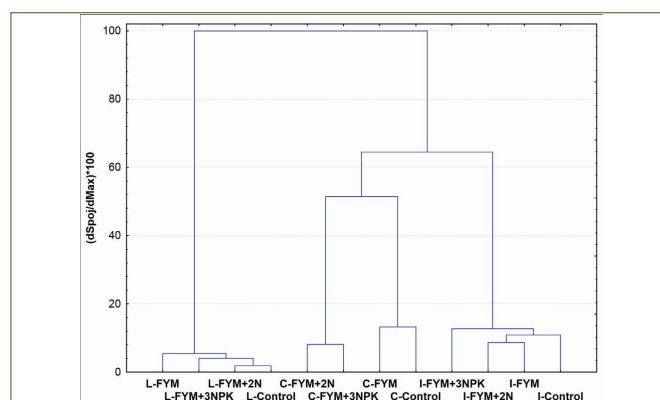
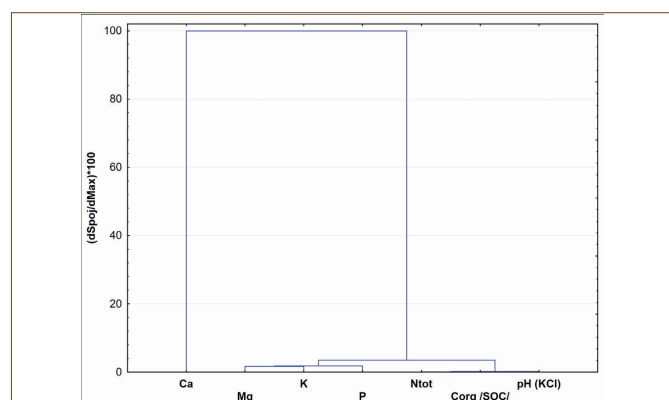
Pozn.: ICRFE - Ivanovice na Hané, CCRFE - Čáslav, LCRFE - Lukavec; Control - kontrola, FYM - hnůj, NPK - minerální hnojivo;  $C_{org}$  (SOC) - půdní organický uhlík,  $N_{tot}$  - celkový dusík, pH - půdní reakce, P - fosfor, K - draslík, Ca - vápník, Mg - hořčík

Obr. 4.2.9: Faktorová analýza (FA) půdních vlastností – organická hmota ( $C_{org}$ ,  $N_{tot}$ ), přístupné živiny (P, K, Ca, Mg) a půdní reakce (pH) v období 2012–2015.

Tab. 4.2.3: Faktorové váhy a příspěvky daného faktoru do komunity pro jednotlivé znaky v období 2012–2015.

| Parametr                  | Faktorové váhy |          | Příspěvky daného faktoru do komunity |          |            |
|---------------------------|----------------|----------|--------------------------------------|----------|------------|
|                           | Faktor 1       | Faktor 2 | Faktor 1                             | Faktor 2 | Komunalita |
| pH (KCl)                  | -0,2063        | 0,9737   | 0,0426                               | 0,9906   | 0,9876     |
| $C_{org}$ /SOC/ (%)       | 0,9818         | 0,0578   | 0,9638                               | 0,9672   | 0,9966     |
| $N_{tot}$ (%)             | 0,9736         | -0,1564  | 0,9479                               | 0,9724   | 0,9962     |
| P (mg.kg <sup>-1</sup> )  | 0,9241         | 0,1151   | 0,854                                | 0,8673   | 0,9126     |
| K (mg.kg <sup>-1</sup> )  | 0,8232         | 0,5375   | 0,6777                               | 0,9665   | 0,9718     |
| Ca (mg.kg <sup>-1</sup> ) | 0,1389         | 0,977    | 0,0193                               | 0,9739   | 0,963      |
| Mg (mg.kg <sup>-1</sup> ) | 0,6200         | 0,7721   | 0,3844                               | 0,9806   | 0,9865     |

Pozn.:  $C_{org}$  (SOC) - půdní organický uhlík,  $N_{tot}$  - celkový dusík, pH - půdní reakce, P - fosfor, K - draslík, Ca - vápník, Mg - hořčík



Pozn.: ICRFE - Ivanovice na Hané, CCRFE - Čáslav, LCRFE - Lukavec; Control - kontrola, FYM - hnůj, NPK - minerální hnojivo;  $C_{org}$  (SOC) - půdní organický uhlík,  $N_{tot}$  - celkový dusík, pH - půdní reakce, P - fosfor, K - draslík, Ca - vápník, Mg - hořčík

Obr. 4.2.10: CLU analýza půdních vlastností – organická hmota ( $C_{org}$ ,  $N_{tot}$ ), přístupné živiny (P, K, Ca, Mg) a půdní reakce (pH) v období 2012–2015.

Dendrogramy viz obr. 4.2.10 provedené metodou úplného spojení pro redukované proměnné u variant hnojení potvrzují přítomnost shluků Control a prolínající se shluky FYM+0, FYM+N3PK a FYM+N2 (lokality ICRFE, LCRFE). Na lokalitě CCRFE jsou vidět dva shluky – Control a FYM+0; FYM+N3PK a FYM+N2). Obdobně analýza CLU diferencovala i objekty půdních vlastností – shluk obsahů živin, SOM a pH. Analýza CLU je ve shodě s analýzou FA a PCA.

#### Dílčí závěr

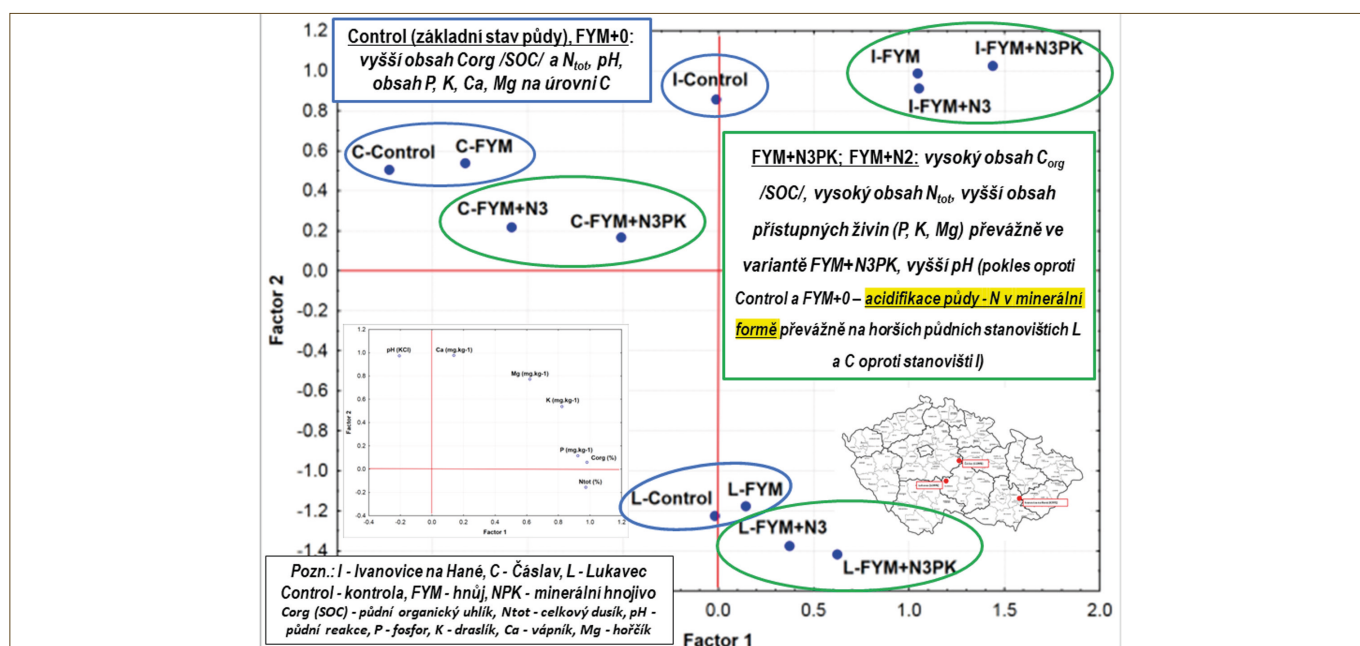
Multikriteriální statistické hodnocení dat (analýzy PCA, FA, CLU) jednoznačně diferencuje na základě sledovaných charakteristik (obsah  $C_{org}$  /SOC/,  $N_{tot}$ , poměr C/N, půdní reakce, přístupné živiny) tři půdně-klimaticky rozdílné lokality (půda,

klima) a dále i významně diferencuje vliv hnojení v rámci každé lokality:

- Control (základní stav půdy), FYM+0: vyšší obsah  $C_{org}$  a  $N_{tot}$ , pH, obsah P, K, Ca, Mg na úrovni Control (kromě ICRFE – velmi kvalitní půdní stanoviště /černozem/);
- FYM+N3PK; FYM+N2: vysoký obsah  $C_{org}$  /SOC/, vysoký obsah  $N_{tot}$ , vyšší obsah přístupných živin (P, K, Mg) převážně ve variantě FYM+N3PK, vyšší pH (pokles oproti Control a FYM+0 – acidifikace půdy v důsledku dodávání N v minerální formě převážně na horších půdních stanovištích LCRFE, CCRFE oproti ICRFE).

Rozšířené výsledky studie byly publikovány jako kapitola v knize Menšík et al. (2019) v nakladatelství IntechOpen.





Obr. 4.2.11: Grafický abstrakt k dílčímu závěru.

### 4.3. Vliv hnojení TTP statkovými a minerálními hnojivy na půdu

#### Cíl studie

Cílem výzkumu je vyhodnotit vliv dlouhodobého hnojení (minerální, chlévský hnůj, kejda, digestát; modelové zatížení skotem 1–2 DJ.ha<sup>-1</sup>) a managementu využívání TTP (2–4 seče/rok) na stav půdy (pH, obsah N, obsah přístupných živin apod.) v modelovém pokusu<sup>12</sup>, založeném na údolní louce s trvalým travním porostem (půdní typ – fluvizem slabě oglejená) v oblasti Malé Hané (Boskovická brázda) v období sledování 2016–2019.



Obr. 4.3.1: Dlouhodobý pokus se statkovým a organickým hnojením na VS Jevíčko, VÚRV, v.v.i. (foto. L. Menšík).

#### Popis výzkumného objektu včetně metod studia

Výzkum probíhal v dlouhodobém pokusu, založeném v roce 2004 na trvalém travním porostu /TTP/ společnosti Hanácká

zemědělská společnost Jevíčko a.s., (poloha: 49.6282881N, 16.7317036E; VÚRV, v.v.i., VS Jevíčko), v nadmořské výšce 342 m n. m., s průměrnou roční teplotou 7,4°C /vegetační období 13,4 °C/ a průměrnými ročními srážkami 545 mm /vegetační období 347 mm/ (Stanice Jevíčko /1966–1995/ ČHMÚ Ostrava, Nerušil 2008), formou přesných maloparcelových ploch (kolmo dělené bloky se čtyřmi opakováními, s pěšinami o šířce 0,25 m, které ohraničují parcely a umožňují pohyb sklizňových strojů, kolem pokusu a mezi bloky opakování byly ponechány chodníky o šířce 5,0 m, rozměr pokusné parcely činil 1,25 m x 8 m, tj. 10 m<sup>2</sup> sklizňová plocha). Travní porost byl v období před založením pokusu bez aplikace hnojiv, sklizený třikrát ročně velkovýrobní technologií. Půdním typem výzkumných ploch je fluvizem slabě oglejená (Němeček et al. 2011). Geologický podklad území je tvořen horninami permokarbonu Českého masivu. Experimentální plocha se nachází v nivě Úsobrnského potoka složené z nevápnitých nivních uloženin s hlinitou až jílovitohlinitou texturou a dobrou sorpční schopností. V době založení pokusu byly fyzikálně-chemické parametry půdy následující: pH (KCl) 6,46, obsah přístupných živin P 37 mg.kg<sup>-1</sup>, K 68 mg.kg<sup>-1</sup>, Mg 130 mg.kg<sup>-1</sup> a SOC 1,93 % (Komárek et al. 2005). Botanické složení TTP při založení experimentu: Luční porost ovsíkového typu (*Arrhenatheretum*), dominantní travní druhy-ovsík vyvýšený (*Arrhenantherum elatius* L.) /J. Presl et C. Presl/, srha laločnatá (*Dactylis glomerata* L.), psárka luční (*Alopecurus pratensis* L.), lipnice luční (*Poa pratensis* L.) a kostřava červená (*Festuca rubra* L.) /Nerušil 2008/.

Varianty pokusu zahrnovaly různou intenzitu využívání porostu, spočívající v rozdílném počtu sečí za rok v kombinaci se stupňovanými úrovněmi hnojení minerálními (NPK), statkovými (Hnůj+Močůvka, Hovězí Kejda) a organickými hnojivy (Digestát). Varianta Digestát byla založena až v roce 2012 při vzniku zemědělské bioplynové stanice v Jevíčku (Hanácká ze-

<sup>12</sup> Dlouhodobý pokus s původním zaměřením pro stanovení vlivu zatížení travních porostů skotem na produkci a kvalitu píce byl založen v roce 2004 dle společné metodiky se zahraniční partnerskou

organizací HBLFA Raumberg-Gumpenstein z Rakouska (dřívejší BAL Gumpenstein), zabývající se zejména pícninářsky orientovaným výzkumem travních porostů v oblasti alpských spolkových zemí.

mědělská společnost Jevíčko a.s., Jurka et al. 2014). Kontrola (varianta bez hnojení) byla pro tuto studii vybrána z obdobného pokusu zaměřeného pouze na aplikaci minerálních hnojiv s různou intenzitou využívání porostu viz podrobně Nerušil (2008). Při stanovení dávek dusíku bylo zohledněno v systému trvale udržitelného využívání a obhospodařování TTP jejich uvažované zatížení travních porostů skotem v méně příznivých oblastech ČR, které odpovídá 0,9; 1,4 a 2,0 DJ.ha<sup>-1</sup>. Dávky dusíku byly navrženy dle společné metodiky HBLFA Raumberg-Gumpenstein a VÚRV, v.v.i. (Komárek et al. 2005) viz tab. 4.3.1.

#### Způsob využívání TTP (počet sečí):

Byly zvoleny tři intenzity s odstupem provedení 1. seče po 15 dnech:

- I- intenzivní (4 seče/rok): 15.5.; 30.6.; 15.8.; 30.9. (nárůst 45 dní\*)
  - II- středně intenzivní (3 seče/rok): 30.5.; 30.7.; 30.9. (nárůst 60 dní\*)
  - III- málo intenzivní (2 seče/rok): 15.6.; 15.9. (nárůst 90 dní\*)
- \* / zatímco přesný termín seče se může v určitém roce podle stavu vegetace pohybovat, udaný odstup ve dnech byl ve všech pokusných letech neměnný.

#### Způsob hnojení TTP dusíkem (N):

Bylo zvoleno modelové zatížení pastviny skotem (1 DJ = 60 kg N.ha<sup>-1</sup> č.ž.):

- I- intenzivní (4 seče/rok): 2,0 DJ.ha<sup>-1</sup> (120 kg N);
- II- středně intenzivní (3 seče/rok): 1,4 DJ.ha<sup>-1</sup> (84 kg N);
- III- málo intenzivní (2 seče/rok): 0,9 DJ.ha<sup>-1</sup> (54 kg N).

#### Termíny aplikace statkových hnojiv

- Chlévský hnůj: v roce založení pokusů na jaře, v dalších letech na podzim;
- Močůvka: po první seči;
- Hovězí kejda: ½ na jaře, ½ po první seči;
- Digestát: ½ na jaře, ½ po první seči.

#### Termíny aplikace minerálních hnojiv

- N: na jaře, po 1. seči, po 2. seči, po 3. seči;
- P a K: na jaře;
- ve variantě Hnůj+Močůvka u čtyř-sečného využití: N 27 % LAV po 3. seči.

Vzorky půdy pro chemické analýzy byly odebírány sondýrkou z hloubky 0–15 cm (horizont Ad) vždy na jaře před hnojením v období 2016–2019. V každé variantě hnojení byl odebrán směsný vzorek (cca 10–15 vpichů v jednotlivém opakování).

Odebrané vzorky půd byly vysušeny při teplotě menší než 40 °C a poté z nich byla připravena jemnozem I a jemnozem II standardním postupem. Takto připravené vzorky byly použity k analýze.

Půdní reakce byla stanovena potenciometrickou metodou (inoLab pH 730, WTW, Německo). Obsah SOC v půdě (horizont Ad) byl analyzován kolorimetricky podle Sims, Haby (1971). Obsah N<sub>tot</sub> byl stanoven Kjeldahlovou metodou (Kirk 1950). Obsah přístupných živin (P- fosfor, K- draslík, Ca- vápník, Mg- hořčík) byl stanoven ve výluhu dle Mehlich III (Mehlich 1984) na analyzátoru ICP-OES (Thermo Scientific iCAP 7400 Duo, Thermo Fisher Scientific, Cambridge, UK).

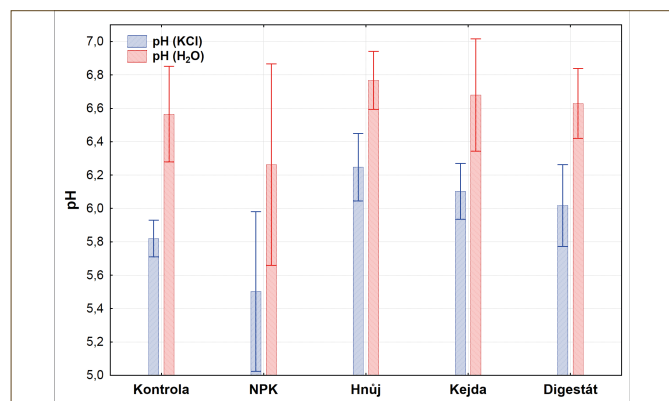
Tab. 4.3.1: Modelové zatížení, dávky minerálních, statkových a organických hnojiv, termíny aplikací.

| Varianta | Zatížení<br>(DJ.ha <sup>-1</sup> )* | Hnojení           | Minerální hnojení        |             |              |               |      |      | Chlévský hnůj<br>+ Močůvka** | Hovězí<br>kejda** |      | Digestát**  |      |         |
|----------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------|-------------|--------------|---------------|------|------|------------------------------|-------------------|------|-------------|------|---------|
|          |                                     |                   | N                        |             |              |               | P    | K    |                              |                   |      |             |      |         |
|          |                                     |                   | kg.ha <sup>-1</sup> č.ž. |             |              |               |      |      | t.ha <sup>-1</sup>           |                   |      |             |      |         |
|          |                                     |                   | Jaro                     | po I.<br>s. | po II.<br>s. | po III.<br>s. | Jaro | Jaro | Podzim                       | po I.s.           | Jaro | po I.<br>s. | Jaro | po I.s. |
| K1       | -                                   | Kontrola          | -                        | -           | -            | -             | -    | -    | -                            | -                 | -    | -           | -    |         |
| K2       | -                                   |                   | -                        | -           | -            | -             | -    | -    | -                            | -                 | -    | -           |      |         |
| K3       | -                                   |                   | -                        | -           | -            | -             | -    | -    | -                            | -                 | -    | -           |      |         |
| 1        | 0,9                                 | NPK               | 30                       | 24          | -            | -             | 30   | 60   | -                            | -                 | -    | -           | -    |         |
| 2        | 1,4                                 |                   | 30                       | 30          | 24           | -             | 30   | 60   | -                            | -                 | -    | -           | -    |         |
| 3        | 2,0                                 |                   | 40                       | 30          | 30           | 20            | 30   | 60   | -                            | -                 | -    | -           | -    |         |
| 4        | 0,9                                 | Hnůj +<br>močůvka | -                        | -           | -            | -             | -    | -    | 9,8                          | 3,7               | -    | -           | -    | -       |
| 5        | 1,4                                 |                   | -                        | -           | -            | -             | -    | -    | 15,4                         | 5,7               | -    | -           | -    | -       |
| 6        | 2,0                                 |                   | -                        | -           | -            | 50            | -    | -    | 21,9                         | 8,2               | -    | -           | -    | -       |
| 7        | 0,9                                 | Kejda             | -                        | -           | -            | -             | -    | -    | -                            | -                 | 6,5  | 6,5         | -    | -       |
| 8        | 1,4                                 |                   | -                        | -           | -            | -             | -    | -    | -                            | -                 | 10,1 | 10,1        | -    | -       |
| 9        | 2,0                                 |                   | -                        | -           | -            | -             | -    | -    | -                            | -                 | 14,5 | 14,5        | -    | -       |
| 10       | 0,9                                 | Digestát          | -                        | -           | -            | -             | -    | -    | -                            | -                 | -    | -           | 6,5  | 6,5     |
| 11       | 1,4                                 |                   | -                        | -           | -            | -             | -    | -    | -                            | -                 | -    | -           | 10,1 | 10,1    |
| 12       | 2,0                                 |                   | -                        | -           | -            | -             | -    | -    | -                            | -                 | -    | -           | 14,5 | 14,5    |

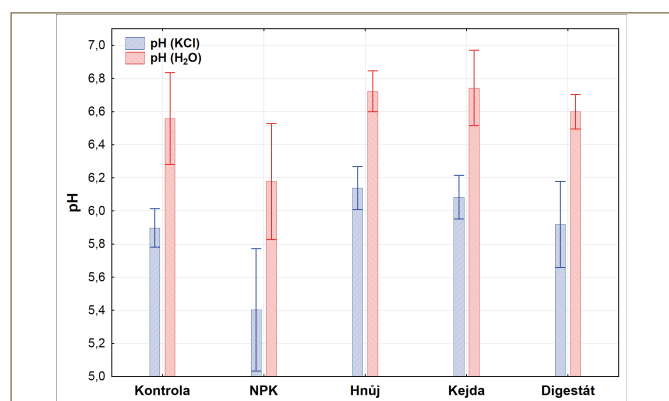
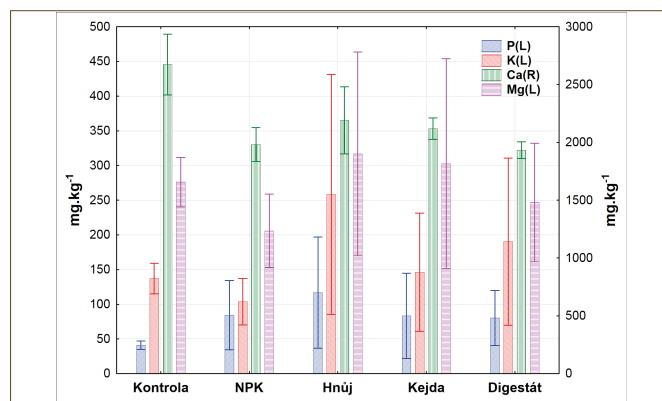
Pozn.: \* Modelové zatížení TTP bylo navrženo dle společné metodiky HBLFA Raumberg-Gumpenstein a VÚRV, v.v.i. (Komárek et al. 2005); \*\*skutečné dávky statkových hnojiv byly stanoveny na základě obsahu živin v hnojivu v daném roce

## Výsledky

Půdní reakce pH ( $H_2O$ , resp. KCl) ve 4, 3, 2sečném systému obhospodařování má obdobný průběh jak v nehněnojené Kontrolě, tak i ve všech variantách minerálního, statkového i organického hnojení (viz obr. 4.3.2, 4.3.3 a 4.3.4). Nejnížší hodnoty pH (KCl) byly zjištěny ve variantě minerálního hnojení (NPK) v rozpětí od 5,4 do 5,5 (statisticky významný rozdíl oproti Kontrolě i variantám statkového /Hnůj, Kejda/ i organického /Digestát/ hnojení ve všech třech intenzitách využívání /4, 3, 2sečné/).



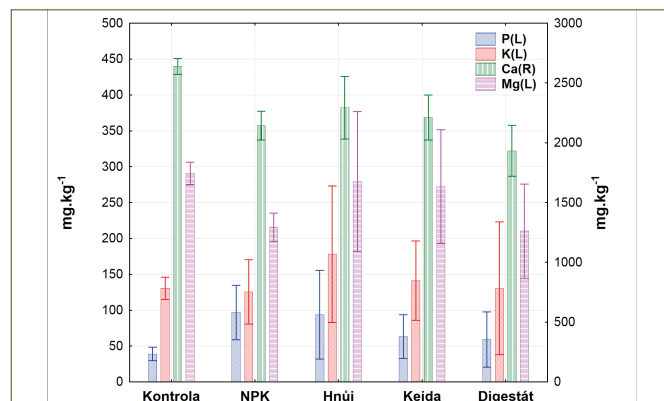
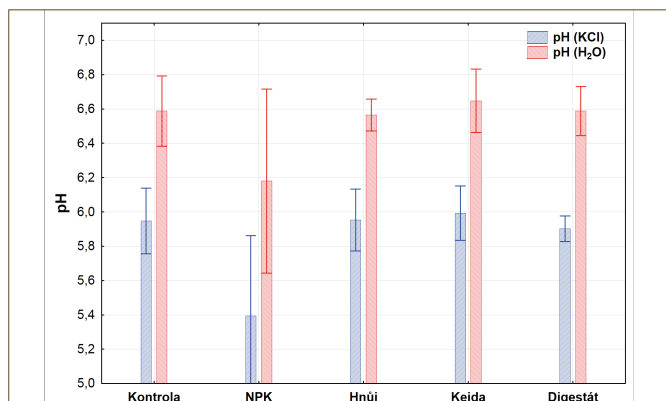
Obr. 4.3.2: Průměrné hodnoty pH a přístupných živin (P, K, Ca, Mg) při 4sečném využití TTP ve variantách hnojení za období 2016–2019 (L - osa vlevo, R - osa vpravo).



Obr. 4.3.3: Průměrné hodnoty pH a přístupných živin (P, K, Ca, Mg) při 3sečném využití TTP ve variantách hnojení za období 2016–2019 (L - osa vlevo, R - osa vpravo).

Obsah uhlíku (SOC) u 4sečné intenzity využívání se pohyboval od 1,8 do 2,4 %. Nejnížší obsah SOC byl zaznamenán u varianty NPK a Digestát, naopak nejvyšší obsah SOC byl zjištěn u varianty Hnůj a nehněnojená Kontrola. Ve 3 a 2sečné intenzitě využívání byl nejvyšší obsah uhlíku zaznamenán shodně ve variantě Kontrola (2,2–2,3 %), resp. nejnížší ve variantě Digestát (1,7–1,8). Obsah dusíku ( $N_{tot}$ ) u 4sečné intenzity využívání se pohyboval v rozpětí od 0,19 do 0,26 %. Nejnížší obsah  $N_{tot}$  byl zaznamenán ve variantě NPK, nejvyšší byl zjištěn ve variantě Hnůj a nehněnojená Kontrola (mezi jednotlivými variantami hnojení a Kontrolou nebyl zaznamenán statisticky významný rozdíl). Ve 3 a 2sečné intenzitě využívání byl nejvyšší obsah dusíku zaznamenán shodně u varianty Kontrola (0,25–0,27 %), nejnížší obsah ve variantách NPK /0,19–0,23 %/ (statisticky významný rozdíl mezi Kontrolou a NPK v 3sečné intenzitě využívání) a Digestát /shodně 0,20 %/ (statisticky významný rozdíl mezi Kontrolou a Digestátem v 2sečné intenzitě využívání).

Obsah přístupného fosforu /P/, draslíku /K/, vápníku /Ca/ a hořčíku /Mg/ za období 2016–2019 ve 4, 3, 2sečném systému obhospodařování uvádí obrázky 4.3.2, 4.3.3 a 4.3.4. Obsah P, K má obdobný trend ve všech třech intenzitách využívání TTP. Nejnížší obsah P byl stanoven ve variantě nehněnojená Kontrola (38–41  $mg.kg^{-1}$ ) ve 4, 3, 2sečné intenzitě využívání. Nejvyšší obsahy P byly zaznamenány ve variantě Hnůj (94–116  $mg.kg^{-1}$ ) ve 4 a 3sečné intenzitě využívání (statisticky významný rozdíl) a NPK 97  $mg.kg^{-1}$  u 2sečné intenzity využívání (statisticky významný rozdíl). Nejnížší obsah K byl stanoven u varianty NPK (94–125  $mg.kg^{-1}$ ) ve 4, 3, 2sečné intenzitě využívání (statisticky nejnížší obsah ve variantě NPK oproti variantě Hnůj u 3sečné intenzity využívání). Nejvyšší obsah K byl zaznamenán ve variantě Hnůj (176–258  $mg.kg^{-1}$ ) 4, 3, 2sečné intenzitě využívání (statisticky významný rozdíl mezi variantou Hnůj a variantami Kontrola, NPK, Kejda u 4sečné intenzity využívání). Nižší obsahy byly zaznamenány ve variantách hnojení Kejda, Digestát a u nehněnojené kontroly.



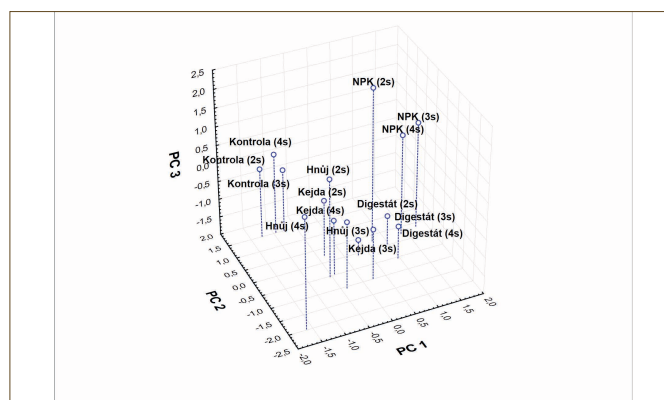
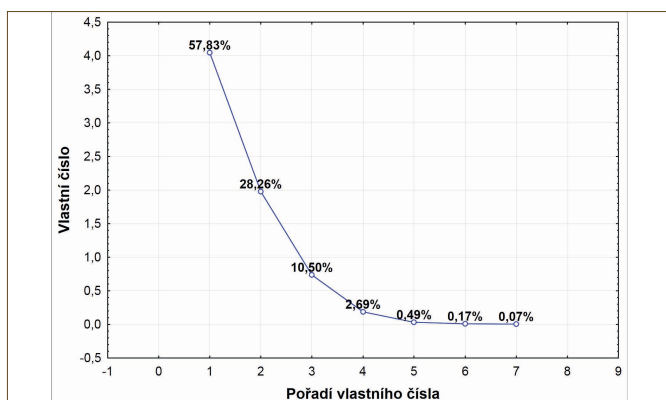
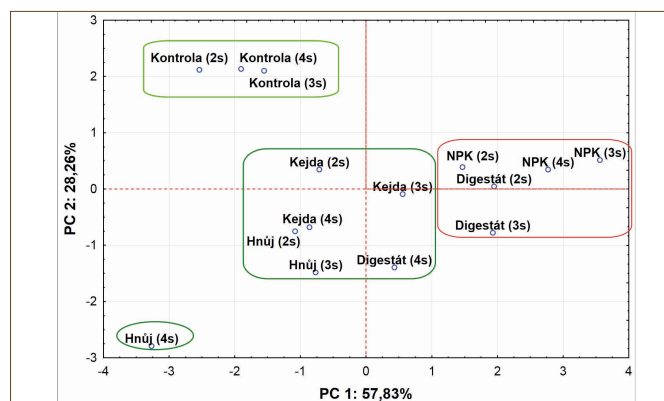
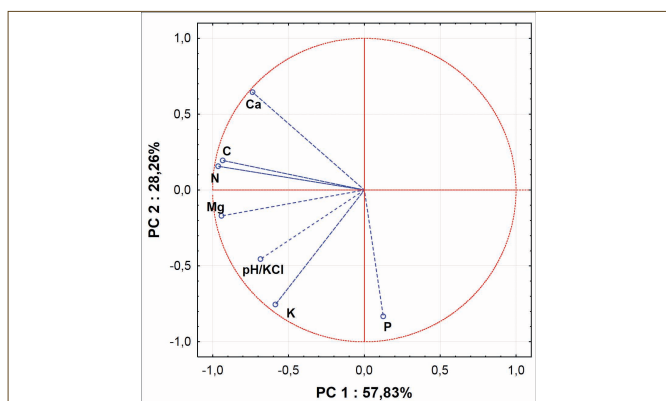
Obr. 4.3.4: Průměrné hodnoty pH a přístupných živin (P, K, Ca, Mg) při 2sečném využití TTP ve variantách hnojení za období 2016–2019 (L - osa vlevo, R - osa vpravo).

Nejnižší obsah Ca, resp. Mg byl stanoven ve variantách NPK (1905–2144 mg.kg<sup>-1</sup> Ca, resp. 180–215 mg.kg<sup>-1</sup> Mg) a Digestát (1819–1933 mg.kg<sup>-1</sup> Ca, resp. 210–246 mg.kg<sup>-1</sup> Mg) u 4, 3, 2sečné intenzity využívání. Nejvyšší obsah Ca, resp. Mg byl zaznamenán ve variantě nehnojená Kontrola (2577–2672 mg.kg<sup>-1</sup> Ca, resp. 279–317 mg.kg<sup>-1</sup> Mg) u 4, 3 a 2sečné intenzity využívání. Varianta Kejda se svými hodnotami obsahu Ca, Mg je blízká variantě Hnůj.

Pro komplexní hodnocení půdních vlastností byly použity metody vícerozměrné statistické analýzy: Analýza hlavních komponent (PCA) a Faktorová analýza /FA/, které jednoznačně diferencovaly skupiny variant hnojení: (1) Kontrola, (2) Hnůj, Kejda (u všech tří

intenzit využívání porostu), (3) Hnůj v intenzitě využívání 4 seče, (4) NPK (intenzita využití 4, 3, 2sečné) a Digestát (intenzita využití 3, 2sečné) /viz rozptylové diagramy komponentního skóre/ (obr. 4.3.5 a 4.3.6).

Na grafu komponentních vah PC1, PC2 (obr. 4.3.5 dole a nahoře vlevo) jsou významné první dvě osy, které dohromady vyčerpávají cca 86 % variability. Osa PC1 v grafu PC1 x PC2 charakterizuje jednoznačně obsah C, N a Mg, které jdou přímo podél této osy a jsou s ní korelované na úrovni přesahující hodnotu 0,9 (vysoká korelace), a dále obsah pH, Ca, které jsou s ní korelované přesahující hodnotu 0,6. Na ose PC2 je výrazná korelace s P a K ( $r = -0,83$  a  $-0,75$ ).

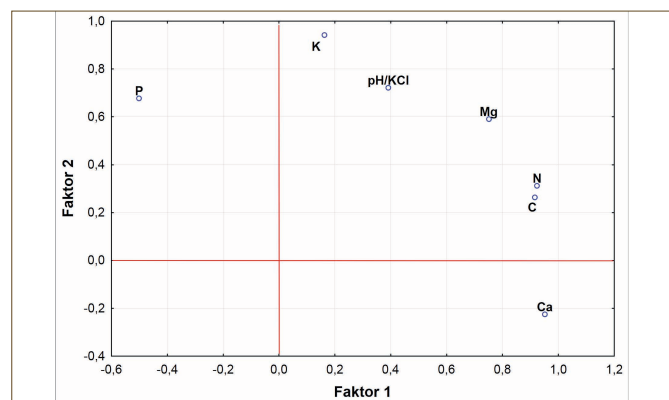


Pozn.: pH - půdní reakce, C - půdní organický uhlík /SOC/, N - půdní celkový dusík /N<sub>tot</sub>/, P - fosfor, K - draslík, Mg - hořčík, Ca - vápník; 4s - intenzita 4seče, 3s - intenzita 3seče, 2s - intenzita 2seče

Obr. 4.3.5: Vícerozměrná matematicko-statistická analýza (PCA) parametrů půdy (pH, obsah C, N, poměr C/N a obsah přístupných živin P, K, Mg, Ca) v hloubce 0–15 cm při 4, 3 a 2sečném systému obhospodařování TTP ve variantách hnojení za období 2016–2019.

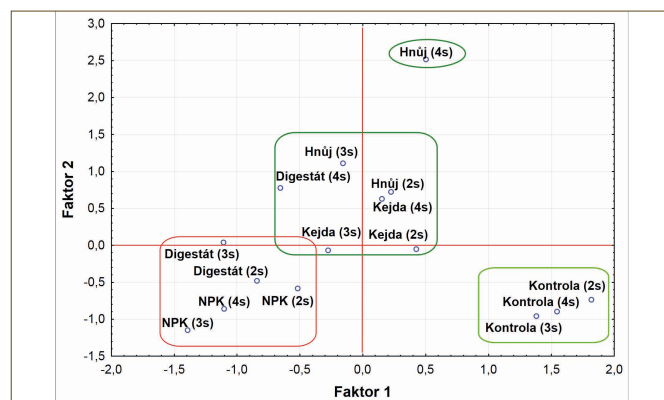


V rozptylovém diagramu komponentního skóre (obr. 4.3.5 vpravo nahoře) jsou podél osy PC1 jednoznačně umístěny jak varianty hnojení, tak i intenzity využívání TTP (4, 3, 2sečný systém obhospodařování). Vyšší obsah C, N, Mg a vyšší půdní reakce je ve variantách hnojení Hnůj, Kejda (u všech tří intenzit využívání), naopak nejnižší obsahy C, N, Mg a nejnižší pH byly zaznamenány u varianty NPK (intenzita využití 4, 3, 2 sečné) a Digestát (intenzita využití 3, 2 sečné). Nehnojená Kontrola se významně diferencovala ve všech třech intenzitách oproti



Pozn.: pH - půdní reakce, C - půdní organický uhlík /SOC/, N - půdní celkový dusík / $N_{tot}$ /, P - fosfor, K - draslík, Mg - hořčík, Ca - vápník; 4s - intenzita 4seče, 3s - intenzita 3seče, 2s - intenzita 2seče

hnojeným variantám (varianty Kontrola ve všech třech intenzitách jsou si velmi podobné – objekty jsou velmi blízko u sebe a dále jsou velmi vzdálené všem ostatním variantám hnojeným – shluky daleko od sebe). Významně se vyčlenila varianta Hnůj v intenzitě využívání 4 seče (nejvyšší obsah C, N, P, K, a Mg a dále i nejvyšší pH z hnojených variant) oproti všem ostatním variantám (shluky daleko od sebe). Varianta Digestát v intenzitě využívání 4 seče se svými parametry velmi podobá variantám Hnůj, Kejda v intenzitě využívání 3 seče.



Obr. 4.3.6: Vícerozměrná matematicko-statistická analýza (FA) parametrů půdy (pH, obsah C, N, poměr C/N a obsah přístupných živin P, K, Mg, Ca) v hloubce 0–15 cm při 4, 3 a 2sečném obhospodařování TTP ve variantách hnojení za období 2016–2019.

Tab. 4.3.2: Faktorové váhy a příspěvky daného faktoru do komunity pro jednotlivé znaky po rotaci Varimax normalizované půdních vlastností (pH, obsah C, N, poměr C/N a obsah přístupných živin P, K, Mg, Ca) v hloubce 0–15 cm při 4, 3 a 2sečném systému obhospodařování TTP ve variantách hnojení za období 2016–2019.

| Parametr | Faktorové váhy |          | Příspěvky daného faktoru do komunity |          |            |
|----------|----------------|----------|--------------------------------------|----------|------------|
|          | Faktor 1       | Faktor 2 | Faktor 1                             | Faktor 2 | Komunalita |
| pH/KCl   | 0,3911         | 0,7215   | 0,1530                               | 0,6737   | 0,9800     |
| P        | -0,5006        | 0,6774   | 0,2506                               | 0,7095   | 0,9675     |
| K        | 0,1634         | 0,9410   | 0,0267                               | 0,9123   | 0,9599     |
| Ca       | 0,9520         | -0,2251  | 0,9064                               | 0,9571   | 0,9756     |
| Mg       | 0,7512         | 0,5909   | 0,5643                               | 0,9135   | 0,9798     |
| C        | 0,9162         | 0,2637   | 0,8395                               | 0,9090   | 0,9833     |
| N        | 0,9240         | 0,3114   | 0,8538                               | 0,9508   | 0,9858     |

Pozn.: pH - půdní reakce, C - půdní organický uhlík /SOC/, N - půdní celkový dusík / $N_{tot}$ /, P - fosfor, K - draslík, Mg - hořčík, Ca - vápník

Faktorové váhy vysvětlují korelace mezi faktory a znaky (tab. 4.3.2). Představují nejdůležitější informaci, na kterých je založena interpretace faktorů. Můžeme říci, že Faktor 1 popisuje půdní vlastnosti z hlediska obsahu uhlíku, dusíku a přístupných živin Ca a Mg. Faktor 2 popisuje kyselost /acidifikaci/ půdního prostředí /znak pH (KCl)/ a dále obsah P a K. Komunalita představuje podíl proměnlivosti znaku vyjádřený dotýčnými faktory. Je obdobná hodnotě  $R^2$ , kterou obdržíme v případě, když se budou původní

znaky vysvětlovat pomocí regrese vybranými faktory (Meloun et al. 2018). Z příspěvku Faktoru 1 a Faktoru 2 do Komunity je patrné, jak Komunita nabývá vysokých hodnot, a tím jsou znaky hodnot velmi dobře započteny navrženým faktorovým modelem (tab. 4.3.2). Jednoznačně se tím prokazuje, že při hnojení pouze minerálními hnojivy (NPK) dochází k významné acidifikaci půdního prostředí a tím i poklesu obsahu uhlíku, dusíku i přístupných živin (nejnižší obsahy C, N, Mg a nejnižší pH byly prokázány ve variantě NPK ve všech třech intenzitách využití /4, 3, 2sečné/) a dále ve variantě organického hnojení Digestát (3, 2sečná intenzita využívání). Vyšší obsah C, N, Mg i vyšší půdní reakce byla prokázána ve variantách statkového hnojení Hnůj, Kejda (ve všech třech intenzitách využívání). Významně se diferencovala varianta statkového hnojení Hnůj v intenzitě využívání 4 seče (nejvyšší obsah C, N, P, K, a Mg a dále i nejvyšší pH z hnojených variant) oproti všem ostatním variantám hnojení i nehnojené kontrole. Varianta Digestát v intenzitě využívání 4 seče se svými parametry velmi podobá variantám Hnůj, Kejda v intenzitě využívání 3 seče.

#### Dílčí závěr

Při předpokládané změně klimatu bude hlavní důraz kladen na přijímání nových systémových řešení v zemědělském hospodaření, resp. na realizaci adaptačních opatření. Trvalé travní porosty vstupují do uhlíkových, dusíkových a dalších bilancí tím, že poutají významné množství těchto prvků jak ve své biomase, tak i v půdě, a proto je důležité sledovat stav půdní reakce a koncentrace jednotlivých prvků.

Nejnižší pH (KCl) bylo zjištěno ve variantách minerálního hnojení (NPK) oproti variantám Kontrola i variantám statkového /Hnůj, Kejda/ i organického /Digestát/ hnojení u všech tří intenzit využívání /4, 3, 2sečné/. Naopak nejvyšší pH bylo za-

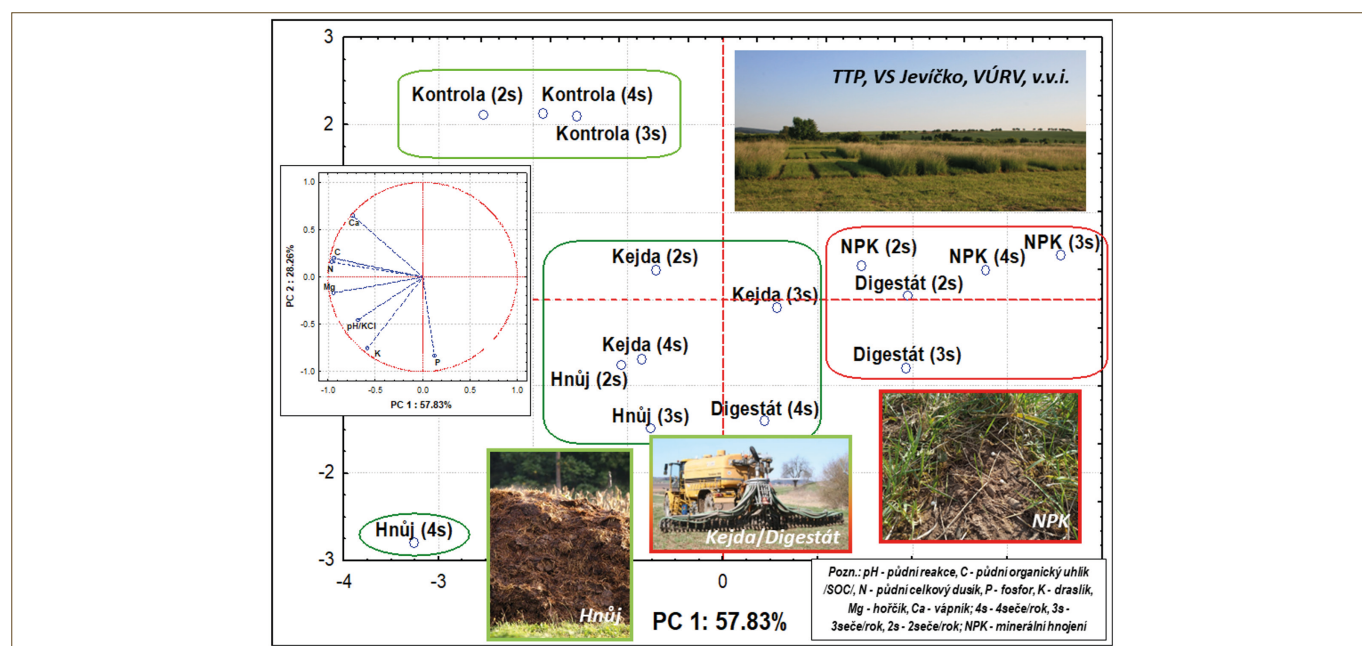
znamenáno ve variantách statkového hnojení /Hnůj, Kejda/ (statisticky významný rozdíl oproti variantě Kontrola i variantě NPK u 4sečné intenzity využívání, resp. u 3, 2sečné využití statisticky významný rozdíl oproti variantě NPK).

Nejnižší obsah SOC i  $N_{tot}$  byl zaznamenán ve variantě Digestát, nejvyšší obsah SOC byl zjištěn ve variantě Hnůj a nehnojená Kontrola u všech tří intenzit využívání (bez statistiky významných rozdílů). Nejnižší poměr C/N byl stanoven u všech třech intenzit využití ve variantě Digestát (statisticky významný rozdíl oproti všem ostatním variantám včetně Kontroly u 4 a 3sečné ho využití porostu).

Nejnižší obsah P byl stanoven u varianty nehnojená Kontrola ve 4, 3, 2sečné intenzitě využívání. Naopak nejvyšší obsahy P byly zaznamenány u varianty Hnůj ve 4, 3sečné intenzitě využívání (statisticky významný rozdíl) a u varianty NPK ve 2sečné intenzitě využívání (statisticky významný rozdíl). Nejnižší obsah K byl stanoven u varianty NPK ve 4, 3, 2sečné intenzitě využívání, naopak nejvyšší u varianty Hnůj ve 4, 3, 2sečné intenzitě využívání. Nejnižší obsahy Ca, resp. Mg byly stanoveny u variant NPK a Digestát ve 4, 3, 2sečné intenzitě využívání, resp. nejvyšší u varianty nehnojená Kontrola ve 4, 3 a 2sečné intenzitě využívání. Varianta Kejda je svými hodnotami obsahu Ca, Mg blízká variantě Hnůj.

Multikriteriální hodnocení (Analýza hlavních komponent, Faktorová analýza) významně diferencovala varianty hnojení: (1) Kontrola, (2) Hnůj, Kejda (u všech tří intenzit využívání), (3) Hnůj v intenzitě využívání 4 seče, (4) NPK (ve 4, 3, 2sečné intenzitě využití) a Digestát (intenzita využití 3, 2sečné). Jednoznačně se tím prokazuje, že při hnojení pouze minerálními hnojivy (NPK) dochází k významné acidifikaci půdního prostředí a tím i poklesu obsahu uhlíku, dusíku i přístupných živin (nejnižší obsahy SOC,  $N_{tot}$ , Mg a nejnižší pH byly prokázány ve variantě NPK ve všech třech intenzitách využití /4, 3, 2sečné/) a dále ve variantě organického hnojení Digestát (3, 2sečná intenzita využívání). Vyšší obsah SOC,  $N_{tot}$ , Mg i vyšší půdní reakce byla prokázána ve variantách statkového hnojení Hnůj, Kejda (ve všech třech intenzitách využívání). Významně se diferencovala varianta statkového hnojení Hnůj v intenzitě využívání 4 seče (nejvyšší obsah SOC,  $N_{tot}$ , P, K, a Mg a dále i nejvyšší pH z hnojených variant) oproti všem ostatním variantám hnojení i nehnojené kontrole. Varianta Digestát v intenzitě využívání 4 seče se svými parametry velmi podobá variantám Hnůj, Kejda v intenzitě využívání 3 seče.

Rozšířené výsledky studie včetně výnosů, botanického složení a kvality píce byly publikovány v knize Menšík, Nerušil (2019), Produkční, kvalitativní a porostové změny trvalého lučního společenstva ve vztahu k intenzitě využívání a úrovni hnojení v oblasti Malé Hané).



Obr. 4.3.7: Grafický abstrakt k dílčímu závěru.

#### 4.4. Monitoring stavu půdní organické hmoty v zemědělských podnicích v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny

##### Cíl studie

Cílem studie je vyhodnotit pomocí vícerozměrných statistických metod (PCA, FA, CLU) vliv minerálního (NPK) a organického hnojení (hnůj) na stav půdní organické hmoty (obsah organického uhlíku, frakcionaci humusových látek /obsah huminových kyselin, fulvo kyselin/, stupeň humifikace, barevný kvocient), půdní reakci a obsah přístupných živin (dusík, fosfor, draslík, hořčík) v půdě v provozních pokusech zemědělských

společností, hospodařících v oblasti Boskovické brázdy (Malá Haná - AGROSPOL, a.d.) a Dražanské vrchoviny (AGROSPOL, a.d., ZD Lipová, družstvo).

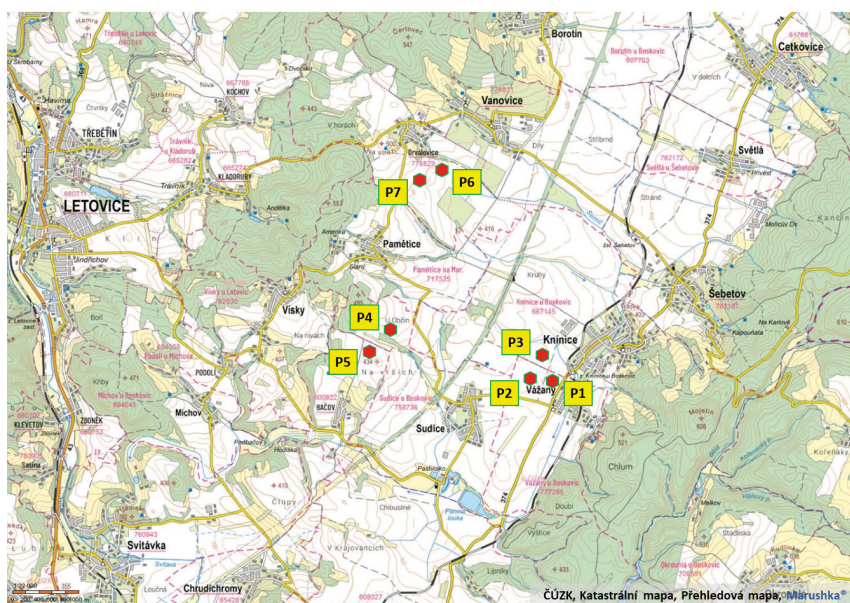
##### Popis výzkumného objektu včetně metod studia

Výzkum sledování a hodnocení optimální kombinace vstupů živin v různých půdně klimatických podmínkách byl založen na podzim v roce 2018 a dále hodnocen v roce 2019 v poloprovozních pokusech v lokalitách:

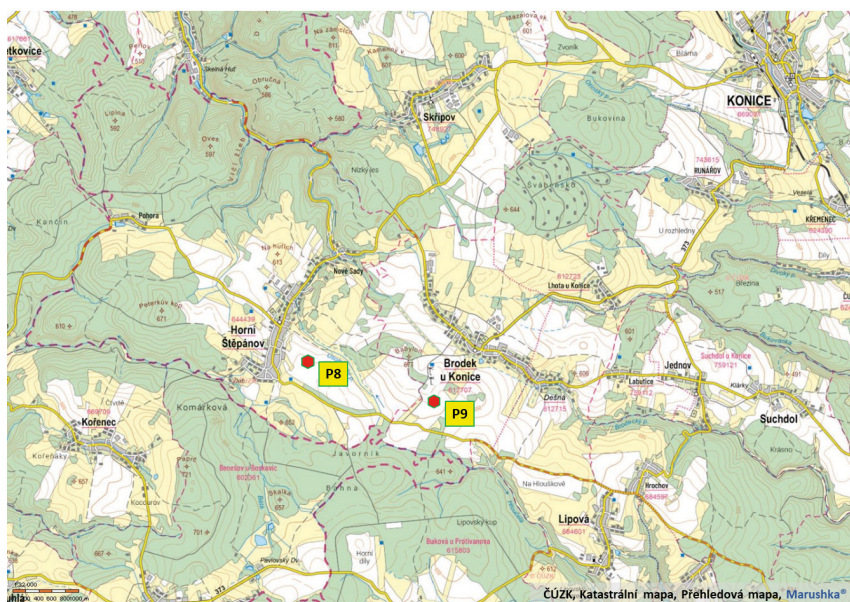
- (1) Vážany /Za humny/- 49.5326231N, 16.6851158E; podnik: AGROSPOL, a.d. Knínice; půdní blok: PB 8302/9; nadmořská výška: 375 m n. m.; půdní typ: černozem luvická /CEL/; Hnůj I;



- (2) Vážany /Za humny/- GPS: 49.5344683N, 16.6825194E; podnik: AGROSPOL, a.d. Knínice; půdní blok: PB 9303/1; nadmořská výška: 375 m n. m.; půdní typ: černozem luvická /CEL/; NPK I;
- (3) Knínice /U Konstantina/ - GPS: 49.5372117N, 16.6840000E; podnik: AGROSPOL, a.d. Knínice; půdní blok: PB 8301; nadmořská výška: 375 m n. m.; půdní typ: černozem luvická /CEL/; Hnůj I;
- (4) Sudice /U Občin/ - GPS: 49.5379775N, 16.6528433E; podnik: AGROSPOL, a.d. Knínice; půdní blok: PB 0204/19; nadmořská výška: 430 m n. m.; půdní typ: hnědozem modální /HNm/; Hnůj II;
- (5) Bačov /Za Stráží/- GPS: 49.5345797N, 16.6496033E; podnik: AGROSPOL, a.d. Knínice; půdní blok: PB 1302/59; nadmořská výška: 430 m n. m.; půdní typ: hnědozem modální /HNm/; NPK II;
- (6) Drválovice /Nad stráněmi/ - GPS: 49.5614039N, 16.6549139E; podnik: AGROSPOL, a.d. Knínice; půdní blok: PB 9005/1; nadmořská výška: 460 m n. m.; půdní typ: kambizem modální /KAm/; Hnůj III;
- (7) Drválovice /Horky/ - GPS: 49.5601792N, 16.6534550E; podnik: AGROSPOL, a.d. Knínice; PB 0101/2; nadmořská výška: 460 m n. m.; půdní typ: kambizem modální /KAm/; NPK III;
- (8) Horní Štěpánov /Za Hamplovým/ - GPS: 49.5440311N, 16.7988414E; podnik: ZD Lipová, družstvo; půdní blok: PB 9306/6; nadmořská výška: 650 m n. m.; půdní typ: kambizem mesobazická /KAa'/; Hnůj IV;
- (9) Brodek u Konice /Babylón/ - GPS: 49.5400906N, 16.8224878E; podnik: AGROSPOL, a.d. Knínice; půdní blok: PB 8403/4; nadmořská výška: 650 m n. m.; půdní typ: kambizem mesobazická /KAa'/; NPK IV.



Obr. 4.4.1: Lokalizace poloprovozních pokusů AGROSPOL, a.d. v Boskovické brázdě (Malá Haná).



Obr. 4.4.2: Lokalizace poloprovozních pokusů ZD Lipová, družstvo a AGROSPOL, a.d. na Dražanské vrchovině.

Půdní vzorky byly odebírány z horizontu Ap (0–30 cm) v období 2018–2019. Půdní reakce byla stanovena potenciometrickou metodou: 50 ml 0,2 mol KCl (InoLab pH 730, WTW, Německo). Obsah  $C_{org}$  (SOC) byl stanoven kolorimetricky dle (Sims, Haby 1971), byla použita oxidimetrická titrace podle (Nelson, Sommers 1996). Frakcionace humusových látek byla provedena krátkou frakcionací dle metody Kononové-Belchikové (Kononova 1963). Postup: obsah HK a FK (= součet HL) byl extrahován z 5 g vzorku půdy se 100 ml 0,1 mol roztoku NaOH a 0,1 mol  $Na_4P_2O_7$  (1: 1, obj./obj.). Uhlík v HL, HK, byl stanoven metodou oxidimetrické titrace. Obsah HK byl vypočten jako rozdíl mezi HL a HK. Stupeň humifikace (SH) byl vypočten jako poměr obsahu HK a obsahu SOC x 100. Barevný in-

dex ( $Q_{4/6}$ ) byl vypočten jako poměr absorbance HL ve spektrálním rozsahu UV-VIS při 465 nm a 665 nm ( $= A_{465}/A_{665}$ ). UV-VIS spektra byly měřeny za použití přístroje Varian Carry 50 Probe s optickým vláknem v rozmezí 300–700 nm (Varian Mulgrave, Victoria, Austrálie). Podrobná charakterizace metod použití je uvedena v publikaci Pospíšilová et al. (2016). Obsah přístupných živin byl stanoven metodou Mehlich III (Mehlich 1984). Koncentrace P, K, Ca a Mg byly analyzovány pomocí přístroje ICP-OES (Thermo Scientific iCAP 7400 Duo, Thermo Fisher Scientific, Cambridge, UK). FTIR spektra byla měřena na spektrometru Thermo Nicolet Avatar 320 FTIR vybaveném doplňkem Smart Diffuse Reflectance (Thermo Fisher Scientific, Cambridge, UK).

Tab. 4.4.1: Souhrnný přehled poloprovozních ploch v období 2018–2019 (Agrospol Knínice, a.d., ZD Lipová, družstvo).

| Pole - Půdní blok | Plodina           | Předplodina       |                 | Výnos - hlavní produkt (t.ha <sup>-1</sup> ) | Výnos - vedlejší produkt (t.ha <sup>-1</sup> ) /sláma, chrást/ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| P1- PB 8302/9     | cukrovka          | pšenice ozimá     | hnůj 50         | -                                            | drceno                                                         |
|                   |                   |                   | N84, P10, K20   |                                              |                                                                |
| P2- PB 9303/1     | cukrovka          | ječmen jarní      | N 84, P10, K 20 | -                                            | drceno                                                         |
| P3- PB 8301       | pšenice ozimá     | kukuřice na siláž | hnůj 50         | 8,40                                         | 4,05                                                           |
|                   |                   |                   | N 158           |                                              |                                                                |
| P4- PB 0204/19    | pšenice ozimá     | kukuřice na siláž | hnůj 44         | 7,34                                         | 3,80                                                           |
|                   |                   |                   | N 170           |                                              |                                                                |
| P5- PB 1302/59    | pšenice ozimá     | mák/kukuřice      | N 153           | 7,05                                         | 3,65                                                           |
| P6- PB 9005/1     | kukuřice na zrno  | pšenice ozimá     | hnůj 46         | 10,38                                        | drceno                                                         |
|                   |                   |                   | N 138           |                                              |                                                                |
| P7- PB 0101/2     | pšenice ozimá     | řepka ozimá       | N 158           | 6,52                                         | 3,42                                                           |
| P8- PB9306/6      | kukuřice na siláž | jarní ječmen      | hnůj 41         | 19,50                                        | -                                                              |
|                   |                   |                   | N146, P45, K45  |                                              |                                                                |
| P9- PB 8403/4     | ječmen ozimý      | ječmen ozimý      | N 113           | 6,22                                         | drceno                                                         |

#### Zemědělské společnosti:

AGROSPOL, a.d. Knínice hospodaří celkem na 2 215 ha zemědělské půdy (orná 1 929 ha, TTP 180 ha) v mírně teplé řepařské oblasti na sever od Boskovic v Boskovické brázdě a až po katastr Borotín a v chladné bramborářské výrobní oblasti Horního Štěpánova a Brodku u Konice. Mezi hlavní pěstované plodiny patří obilniny – ozimá pšenice (550 ha), ječmen (150 ha), oves (30 ha), kukuřice (160 ha siláž), okopaniny – cukrovka (160 ha), brambory (5 ha), krmená řepa (2 ha), olejnin – řepka (200 ha), slunečnice (30 ha), píce – vojtěška (140 ha), jetelotrávní směsi a žito (50 ha), čirok (60 ha) a léčivé rostliny – ostropestřec mariánský (60 ha). Dále provozuje sady a školky – višně (38 ha), jablka (7 ha) a švestky (10 ha). Živočišná výroba se zaměřuje na dojný skot – 460 plemenic českého strakatého skotu, jalovičky se používají především do vlastního obratu stáda a býčci (200) se vykrmují do jateční hmotnosti. Prasata – základní stádo 230 prasnic, předvýkrm (1000 kusů, na rostech), výkrm (2000 kusů, hluboká podestýlka).

ZD Lipová, družstvo hospodaří celkem na 686 ha zemědělské půdy (orná 382 ha) v bramborářské výrobní oblasti Horního Štěpánova, Brodku u Konice, Lipové (Drahanská vrchovina). Mezi hlavní pěstované plodiny patří obilniny – ozimá pšenice (13 ha), ječmen (155 ha), oves (3 ha), kukuřice na siláž (40 ha), čirok na siláž (45 ha), ozimé žito /tritikále/ (48 ha), olejnin – řepka (64 ha), píc-

niny – jetel (28 ha), jetelotrávní směsi a žito (25 ha). Dále obhospodařuje 303 ha trvalých travních porostů (TTP). Živočišná výroba se zaměřuje na dojný skot – 158 plemenic českého strakatého skotu, jalovičky se používají především do vlastního obratu stáda a býčci se vykrmují do jateční hmotnosti.

#### Výsledky

Na grafu komponentních vah PC1, PC2 /Analýza hlavních komponent – PCA/ v období 2018–2019 jsou významné první dvě osy, které dohromady prezentují cca 88 % variability - viz obr. 4.4.3 (vlevo dole).

Osa PC1 v grafu PC1 x PC2 charakterizuje jednoznačně parametry organické hmoty (IH – index rozkladu, IR – index hydrofobicity,  $C_{org}$  /SOC/ a obsah FK), dále obsah přístupných živin K, P, Mg, a půdní reakce (pH) - viz obr. 4.4.3 (vlevo nahoře). IH, obsah K, P a IR jdou přímo podél této osy a jsou s ní korelované 0,97; 0,83; 0,84 (kladná korelace) a -0,88 (záporná korelace). Dále  $C_{org}$  /SOC/ ( $r = 0,84$ ), FK (0,82), pH ( $r = -0,78$ ) a Ca ( $r = 0,76$ ). Na ose PC2 je významná korelace s parametrem HK ( $r = 0,96$ ), HL ( $r = 0,90$ ) a  $Q_{4/6}$  ( $r = -0,93$ , záporná korelace).

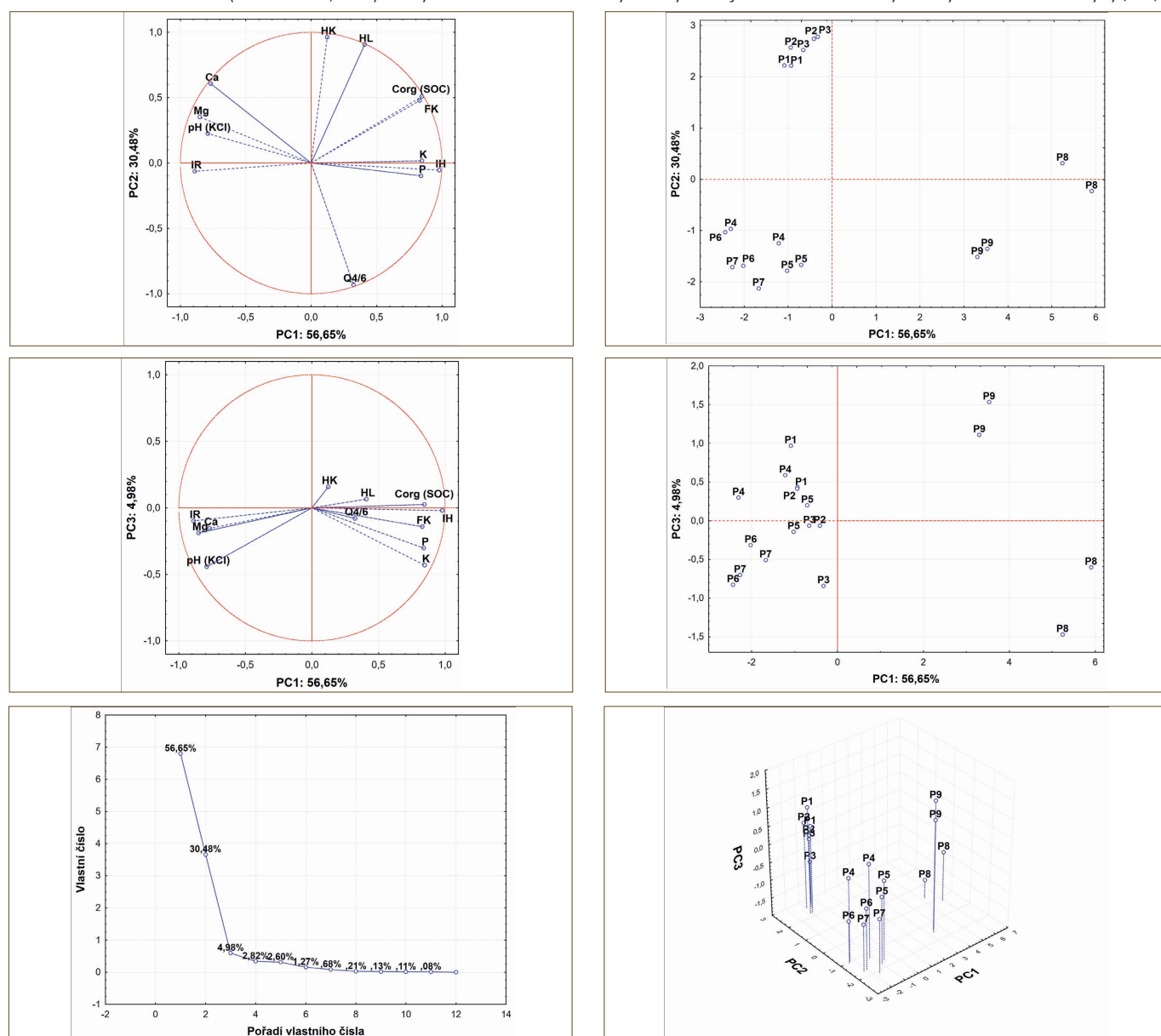
V rozptylovém diagramu komponentního skóre (obr. 4.4.3, vpravo nahoře) jsou podél osy PC1 rozděleny jednoznačně jednotlivé skupiny experimentálních polí (druh půdy, nadmořská výška, varian-



ta hnojení) v oblasti Malé Hané a Dražanské vrchoviny (lze nalézt shluky vzájemně podobných objektů-shluků /P1-P3; P4-P7; P8, P9/ a dále objekty odlehle a silně odlišné od ostatních objektů /viz varianty P8-hnůj a P9-NPK/, objekty blízko sebe si jsou podobné, daleko od sebe jsou si nepodobné/) podle obsahu přístupných živin K, Mg, P a stavu SOM (obsahu  $C_{org}$  /SOC/, FK, IR, IH apod.), podél osy PC2 jsou experimentální pole rozděleny podle HK, HL,  $Q_{4/6}$ . Analýza PCA jednoznačně diferencovala na základě zjištěných chemických parametrů půdy půdní klimatické podmínky daných experimentálních polí (P1-3; P4-7; P8-9). V oblasti Dražanské vrchoviny (P8,9) se významně vyčleňuje P8 (dlouhodobé hnojení hnojem – ZD Lipová, družstvo) od P9 (dlouhodobé hnojení pouze minerálními hnojivy se zapravením slámy a posklizňových zbytků – AGROSPOL, a.d. v oblasti Dražanské vrchoviny nepoužívá statková hnojiva). Pole 8 má vyšší pH, vyšší obsah  $C_{org}$  /SOC/, HL, HK, nižší barevný index ( $Q_{4/6}$ ) a dále vyšší obsah přístupných živin Ca, Mg, K i P oproti P9. V oblasti Malé Hané (AGROSPOL, a.d.) se významně diferen-

covaly shluky experimentálních polí P1-3 a P4-P7. Pole P1-P3 jsou situovány na velmi kvalitních půdách typu černozem luvická (CEI), pole (P4-7) jsou na půdních typech hnědozem modální /HNm/ a kambizem modální /KAm/. V oblasti Malé Hané AGROSPOL, a.d. standardně každý rok používá statková hnojiva (hnůj, kejda). Ročně aplikuje tato hnojiva na cca 350–450 ha půdy (cca 1 x za 4–5 let je každé jednotlivé pole hnojeno statkovými hnojivy v dávkách 40–60 t.ha<sup>-1</sup>). Shluk v rozptylovém diagramu experimentálních polí 1-3 je velmi blízko u sebe (objekty jsou si vzájemně podobné, a proto se neprojevil vliv hnojení /hnůj – NPK/) i v návaznosti na půdní typ černozem luvická. Ve shluku polí P4-P7 lze diferencovat půdní typy hnědozem modální /HNm/ (P4,5) a kambizem modální /KAm/ (P6,7). Dále ve shluku P4,5 již je významný rozdíl mezi P4 a P5 (projevil vliv hnojení /hnůj – NPK/, objekty dále od sebe). Obdobnou situaci jako u shluku P4,5 lze sledovat i ve shluku (P6,7).

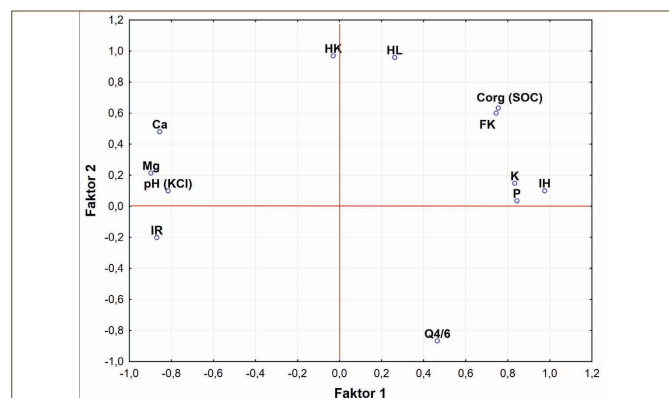
Výsledky PCA jsou v souladu s výsledky faktorové analýzy /FA/.



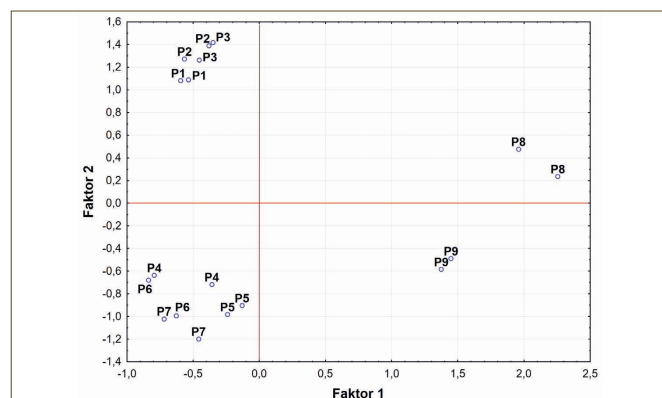
Pozn.: pH - půdní reakce,  $C_{org}$  /SOC/ - půdní organický uhlík, HL - humusové látky, HK - huminové kyseliny, FK - fulvokyseliny,  $Q_{4/6}$  - barevný kvocient, P - fosfor, K - draslík, Mg - hořčík, Ca - vápník, IH - index rozkladu, IR - index hydrofobicity; P1 - hnůj, P2 - NPK, P3 - hnůj, P4 - hnůj, P5 - NPK; P6 - hnůj; P7 - NPK, P8 - hnůj, P9 - NPK

Obr. 4.4.3: Analýza PCA půdních vlastností (pH,  $C_{org}$ , HL, HK, FK,  $Q_{4/6}$ , obsah P, K, Mg, Ca, IH, IR) v hloubce 0–30 cm v období 2018–2019 ve variantách poloprovozních pokusů.

FA - viz obr. 4.4.4 (vpravo), popisuje jednoznačně vlastnosti z pohledu obsahu půdní organické hmoty ( $C_{org}/SOC/$ , IR, IH) a obsahu živin (Ca, Mg, P, a K) a dále pH, Faktor 2 popisuje jednoznačně stav půdy z pohledu HK, HL,  $Q_{4/6}$ . Na rozptylovém



diagramu komponentního skóre – viz obr. 4.4.4 (vlevo), se diferencovaly tři shluky na základě chemických parametrů půdy sledovaných experimentálních polí (P1-3; P4-7; P8-9).



Pozn.: pH - půdní reakce,  $C_{org}/SOC/$  - půdní organický uhlík, HL - humusové látky, HK - huminové kyseliny, FK - fulvokyseliny,  $Q_{4/6}$  - barevný kvocient, P - fosfor, K - draslík, Mg - hořčík, Ca - vápník, IH - index rozkladu, IR - index hydrofobicity; P1 - hnůj, P2 - NPK, P3 - hnůj, P4 - hnůj, P5 - NPK; P6 - hnůj; P7 - NPK, P8 - hnůj, P9 - NPK

Obr. 4.4.4: Graf faktorových vah a rozptylový diagram komponentního skóre půdních vlastností (zdrojové matice dat - metoda Varimax normalizovaný) v hloubce 0–30 cm v období 2018–2019 ve variantách poloprovozních pokusů.

Tab. 4.4.2: Faktorové váhy a příspěvky daného faktoru do komunity pro jednotlivé znaky po rotaci Varimax normalizovaný půdních vlastností v hloubce 0–30 cm v období 2018–2019 ve variantách poloprovozních pokusů.

| Parametr       | Faktorové váhy |          | Příspěvky daného faktoru do komunity |          |            |
|----------------|----------------|----------|--------------------------------------|----------|------------|
|                | Faktor 1       | Faktor 2 | Faktor 1                             | Faktor 2 | Komunalita |
| $C_{org}/SOC/$ | 0,7546         | 0,6334   | 0,5694                               | 0,9706   | 0,9855     |
| HL             | 0,2621         | 0,9592   | 0,0687                               | 0,9888   | 1,0000     |
| HK             | -0,0298        | 0,9688   | 0,0009                               | 0,9395   | 1,0000     |
| FK             | 0,7443         | 0,6005   | 0,5540                               | 0,9145   | 1,0000     |
| $Q_{4/6}$      | 0,4654         | -0,8683  | 0,2166                               | 0,9705   | 0,9746     |
| pH (KCl)       | -0,8151        | 0,0988   | 0,6643                               | 0,6741   | 0,8762     |
| Ca             | -0,8548        | 0,4801   | 0,7306                               | 0,9611   | 0,9827     |
| Mg             | -0,8967        | 0,2148   | 0,8040                               | 0,8502   | 0,9397     |
| P              | 0,8435         | 0,0355   | 0,7115                               | 0,7127   | 0,8471     |
| K              | 0,8333         | 0,1479   | 0,6944                               | 0,7163   | 0,8831     |
| IR             | -0,8687        | -0,2015  | 0,7546                               | 0,7952   | 0,9267     |
| IH             | 0,9758         | 0,1002   | 0,9521                               | 0,9622   | 0,9798     |

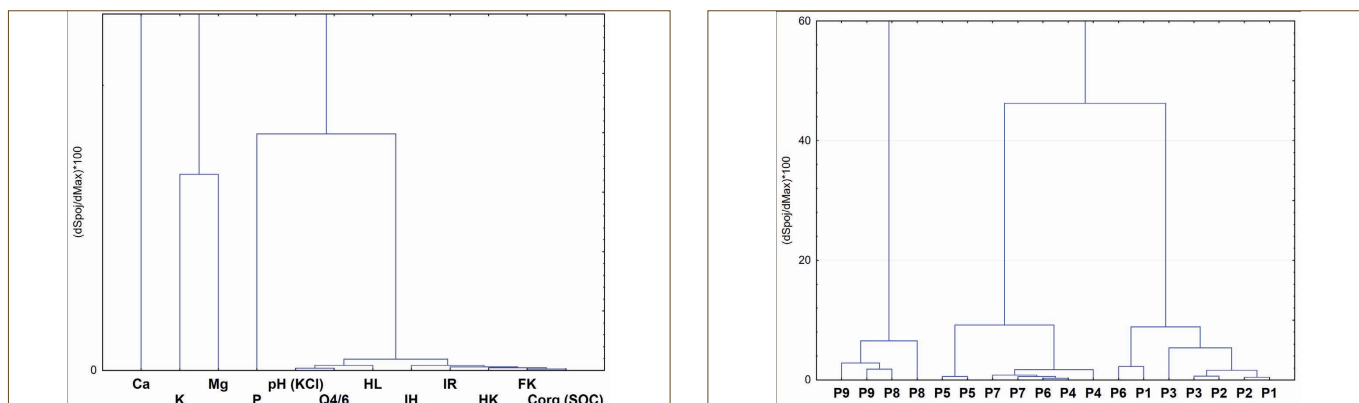
Pozn.: pH - půdní reakce,  $C_{org}/SOC/$  - půdní organický uhlík, HL - humusové látky, HK - huminové kyseliny, FK - fulvokyseliny,  $Q_{4/6}$  - barevný kvocient, P - fosfor, K - draslík, Mg - hořčík, Ca - vápník, IH - index rozkladu, IR - index hydrofobicity

Faktorové váhy vysvětlují korelace mezi faktory a znaky - viz tab. 4.4.2. Představují nejdůležitější informaci, na které je založena interpretace faktorů (viz výše). Komunalita představuje podíl proměnlivosti znaku vyjádřené dotýčnými faktory. Je obdobná hodnotě  $R^2$ , kterou dostaneme, když budeme původní znaky vysvětlovat pomocí regrese vybranými faktory (Meloun, Milítký 2012).

V tabulce 4.4.2 je uveden příspěvek Faktoru 1 a Faktoru 2 do komunity. Z tabulky je patrné, že komunalita nabývá vyso-

kých hodnot, a tím znaky hodnot jsou velmi dobře započteny navrženým faktorovým modelem.

Dendrogramy (viz obr. 32), byly provedené Wardovou metodou pro redukované proměnné u variant experimentálních polí (P1-9) přítomnost shluků P1-P3, P4-P7 a dále P8,9. Obdobně analýza CLU diferencovala i objekty půdních vlastností – shluky obsahů živin, SOM a pH. Analýza CLU je ve shodě s analýzou FA a PCA.



Pozn.: pH - půdní reakce, C<sub>org</sub>/SOC/ - půdní organický uhlík, HL - humusové látky, HK - huminové kyseliny, FK - fulvokyseliny, Q<sub>4/6</sub> - barevný kvocient, P - fosfor, K - draslík, Mg - hořčík, Ca - vápník, IH - index rozkladu, IR - index hydrofobicity; P1 - hnůj, P2 - NPK, P3 - hnůj, P4 - hnůj, P5 - NPK; P6 - hnůj; P7 - NPK, P8 - hnůj, P9 - NPK

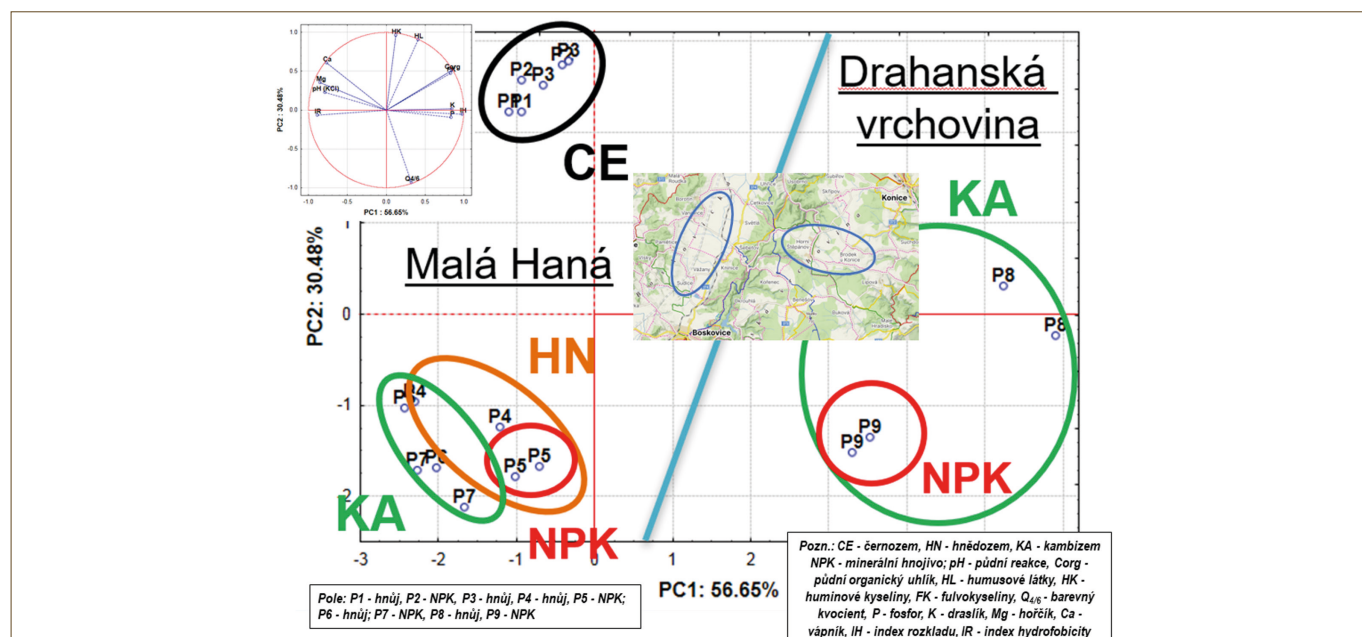
Obr. 4.4.5: Dendrogram objektů půdních vlastností v hloubce 0–30 cm v období 2018–2019 ve variantách poloprovozních pokusů zdrojové matice dat zpracovaný Wardovou metodou.

#### Dílčí závěr

Výsledky zjištěné v provozních pokusech potvrdily, že pozemky (půdy) pravidelně hnojené kvalitními statkovými hnojivy (hnůj) a statkovými hnojivy v kombinaci s minerálními hnojivy (NPK, resp. N) si udržují svou úrodnost v optimální kvalitě a stabilizují produkci z pohledu kvantity a kvality potravin (krmiv) a zároveň zvyšují adaptační potenciál současné půdy v důsledku měnících se podmínek prostředí (předpokládané účinky probíhající klimatické

změny). Naopak na pozemcích (půdě) dlouhodobě hnojených pouze minerálními hnojivy se zapravením slámy a posklizňových zbytků se zvyšuje mineralizace a acidifikace půdy a snižuje se obsah stabilních humusových látek a přístupných živin apod.

Další výzkum v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny je zaměřen na monitoring SOM, živin i rizikových prvků a bude pokračovat prostřednictvím výzkumných projektů a zakázek MZe ČR.



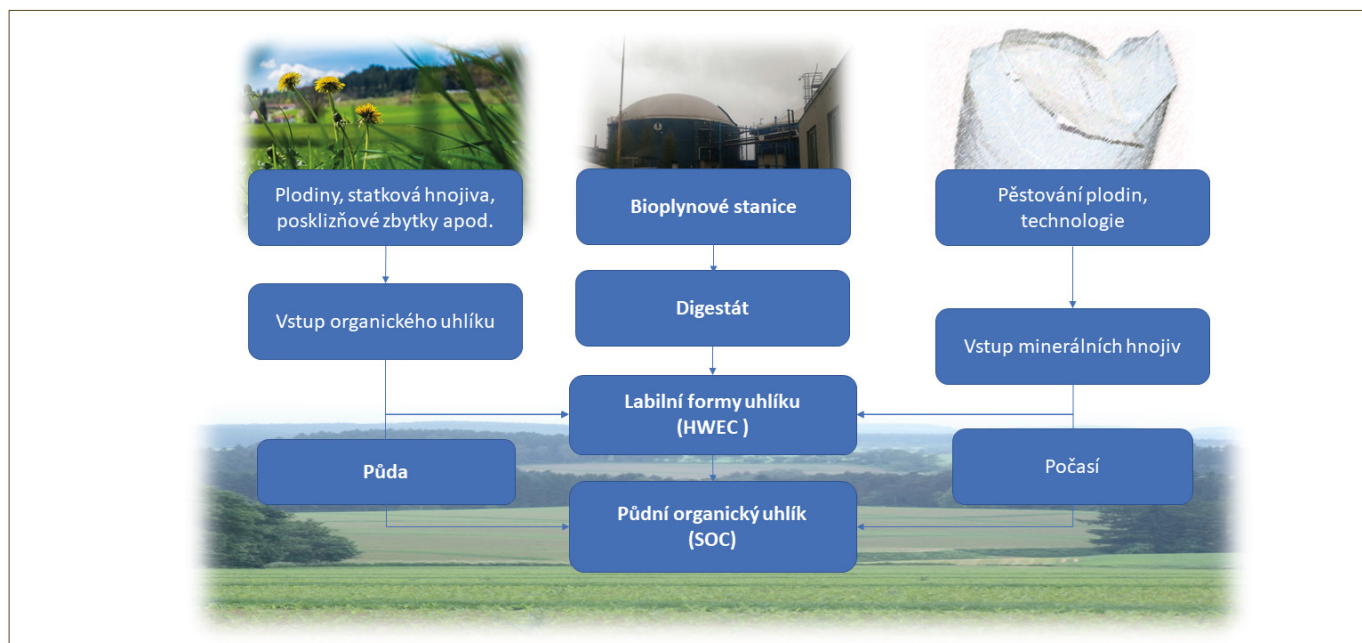
Obr. 4.4.6: Grafický abstrakt k dílčímu závěru.

#### 4.5. Tvorba organické hmoty v půdě v závislosti na vlastnostech půdy a aplikaci různých hnojiv v 10letém provozním pokusu

##### Cíl studie

Cílem studie je komplexně vyhodnotit stav a změny obsahu půdního organického uhlíku /SOC/ (stabilní forma C) a uhlíku rozpustného v horké vodě /HWEC/ (labilní forma C, angl. *hot water extractable carbon*)- viz obr. 4.5.1 ve vztahu k fyzikálně-chemickým

vlastnostem půdy (pH, sorpční komplex, fyzikální vlastnosti půdy apod.) a způsobem obhospodařování (tj. aplikace statkových / hnůj/, organických /digestát/ a minerálních /NPK/ hnojiv, management posklizňových zbytků apod.). Využity byly moderní statistické metody (vícerozměrná lineární regrese – MLR /výstavba regresního modelu regresním tripletem/) rozsáhlého souboru dat (68 lokalit) získaného v provozních podmínkách zemědělských podniků hospodařících v různých půdně-klimatických podmínkách v České republice za období 2008–2018.



Obr. 4.5.1: Obecné schéma tvorby SOC a HWEC.

#### Objekt a metody studia

Výzkum stavu půdní organické hmoty byl realizován v provozních podmínkách zemědělských podniků (farem) na 68 lokalitách (experimentálních polích) v České republice (ČR) v období 2008–2018. Experimentální pozemky se nacházely v klimatických regionech 2, 3, 5, 6, 7. Podrobná charakteristika klimatických regionů v ČR - viz tab. 4.5.1. Půdními typy experimentálních pozemků byly černoze (CE), hnědozemě (HN), luvizemně (LU), kambizemě (KA), fluvisemě (FL), stagnogleje (SG) a další (Němeček et al. 2011, WRB 2015). Experimentální plochy byly vybrány na základě průzkumu homogenních půdních vlastností v dlouhodobém sledování výnosů plodin (Voltr 2012) na základě evidence půdně-ekologických jednotek /BPEJ/ (Šarapatka, Bednář 2015) tak, aby alespoň 70 % plochy pozemku bylo tvořeno jednou BPEJ (Voltr 2012). Zemědělské podniky (farmy), zahrnuté do sledování, provozovaly zemědělské bioplynové stanice (na experimentálních polích byl do půdy aplikován digestát podle dispozice zemědělského pozemku).

Vzorky půdy pro chemické analýzy byly odebírány z hloubky 0–30 cm a 30–60 cm v průběhu let 2008 a 2018. Odběr se pro-

váděl na každé experimentální ploše tak, že byl vyznačen obdélník o délce stran 25 x 40 m (celková rozloha 1000 m<sup>2</sup>) a vzorky se odebíraly v úhlopříčkách. Na každé úhlopříčce bylo provedeno 16 vpichů (celkem 32 vpichů). Z každé lokality byl vytvořen směsný vzorek. Dále na každém experimentálním poli byl odebrán porušený směsný vzorek pro fyzikální analýzy půdy.

Půdní reakce (pH /KCl/) byla stanovena potenciometricky: 50 ml of 0,2 mol KCl (inoLab pH 730, WTW, Germany). Obsah Corg (SOC) byl stanoven kolorimetricky dle (Sims, Haby 1971) a dále byla použita oxidimetrická titrace podle (Nelson, Sommers 1996). Stanovení v horké vodě rozpuštěného uhlíku (HWEC) bylo provedeno dle Körchensovy metody (Körschens et al. 1990). Metodou Kappena (1929) byly měřeny charakteristiky půdního sorpčního komplexu /S- obsah bází, T- kationtová výměnná kapacita, V- nasycení sorpčního komplexu bázemi/ (Zbiral 1997). Zrnitostní složení půdy (jednotlivé zrnitostní frakce - do 0,001 mm, od 0,001 do 0,01 mm, 0,01–0,05 mm, 0,05–0,25 a 0,25–2 mm) bylo stanoveno pipetovací metodou (Pospíšilová et al. 2015).

Tab. 4.5.1: Charakteristika klimatických regionů v ČR.

| Číselný kód regionů | Suma teplot (°C) | Aktualizovaná suma teplot (°C) | Průměrná teplota (°C) | Aktualizovaná průměrná teplota (°C) | Průměr srážek mm/rok | Riziko suchých let koeficient | Vláhová jistota 1 - minimální, 10 - maximální |
|---------------------|------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
| 0                   | 2950             | 3680                           | 9,5                   | 10,1                                | 550                  | 0,4                           | 2                                             |
| 1                   | 2700             | 3430                           | 8,5                   | 9,4                                 | 450                  | 0,5                           | 1                                             |
| 2                   | 2700             | 3430                           | 8,5                   | 9,4                                 | 550                  | 0,3                           | 3                                             |
| 3                   | 2650             | 3380                           | 8,5                   | 9,3                                 | 600                  | 0,2                           | 6                                             |
| 4                   | 2500             | 3230                           | 7,8                   | 8,9                                 | 500                  | 0,4                           | 2                                             |
| 5                   | 2350             | 3080                           | 7,5                   | 8,4                                 | 600                  | 0,2                           | 7                                             |
| 6                   | 2600             | 3330                           | 8,0                   | 9,1                                 | 800                  | 0,1                           | 10                                            |
| 7                   | 2300             | 3030                           | 6,5                   | 8,3                                 | 700                  | 0,1                           | 10                                            |
| 8                   | 2100             | 2830                           | 5,5                   | 7,8                                 | 750                  | 0,0                           | 10                                            |
| 9                   | 1950             | 2680                           | 4,5                   | 7,3                                 | 850                  | 0,0                           | 10                                            |



Na experimentálních polích (lokalitách) byly kromě výnosu pěstovaných plodin sledovány další informace, jako sběr slámy, agrotechnika (tj. orba nebo bezorebné zpracování půdy), aplikace hnojiv – dusíku, fosforu, draslíku, organických živin ve formě živočišných hnojiv a rostlinných hnojiv. Specificky byly sledovány dávky technologické vody a digestátu z bioplynových stanic. Statková (organická), rostlinná a minerální hnojiva byla přepočítána na dávky živin N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a K<sub>2</sub>O na základě platné metodiky v ČR (Klír 2008). Hodnoty statkových (organických) a rostlinných hnojiv byly přepočítány na organickou hmotu na základě platné metodiky v ČR (Klír 2008). Na základě BPEJ byly přiřazeny hlavní půdní jednotky a klimatické regiony ČR (0–9) – viz tab. 4.5.1, které byly následně pro potřeby agregace sloučeny. Pozemky byly rovněž seskupeny i z hlediska kamenitosti a svažitosti (zák. č. 227/2018 Sb.). Vstupy a výstupy nutné k produkci plodin byly vyhodnoceny podle metodiky platné v ČR (Voltr et al. 2020). Výnosy vedlejších produktů byly zjištěny dle normativních podkladů, včetně poměru výnosu hlavní a vedlejší produkce (Klír 2008).

K hodnocení výsledků výzkumu byly použity techniky průzkumové analýzy jednorozměrných a vícerozměrných dat, lineární regrese – výstavba vícerozměrného lineárního regresního modelu regresním tripletem apod. (Meloun, Militký 2012). Navržený vícerozměrný lineární model byl dále zpřesněn postupem nazývaným hledání regresního modelu regresním tripletem, který se skládal z následujících kroků: (1) návrh modelu, (2) předběžná analýza dat (multikolinearita, heteroskedasticita, autokorelace a vlivné body), (3) odhad parametrů klasickou metodou nejmenších čtverců (MNČ) a následným testováním významnosti parametrů Studentovým t-testem, střední kvadratickou chybou predikce (MEP), Akaikovým informačním kritériem (AIC), (4) regresní diagnostikou – identifikaci vlivných bodů a ověření předpokladů MNČ, (5) konstrukci zpřesněného modelu: parametry zpřesněného modelu jsou odhadovány s využitím (a) metody vážených nejmenších čtverců (MVNČ) při nekonstantnosti rozptylu, (b) metody zobecněných nejmenších čtverců (MZNČ) při autokorelaci, (c) metody podmínkových nejmenších čtverců (MPNČ) při omezení kladených na parametry, (d) metody racionálních hodnotností u multikolinearity, (e) metody rozšířených nejmenších čtverců (MRNČ) pro případ, že všechny proměnné jsou zatíženy náhodnými chybami, a (f) robustních metod pro jiná rozdělení než normální a data s vybočujícími hodnotami a extrémy (Meloun, Militký 2012). Statistická významnost byla testována na hladině významnosti  $p = 0,05$ .

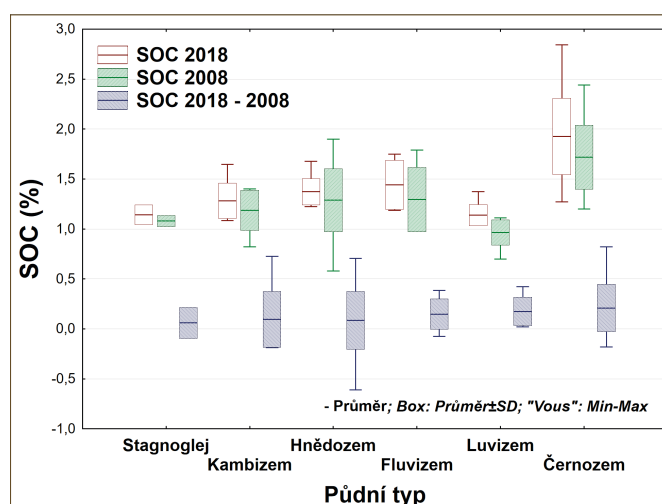
## Výsledky

### Základní parametry půdy

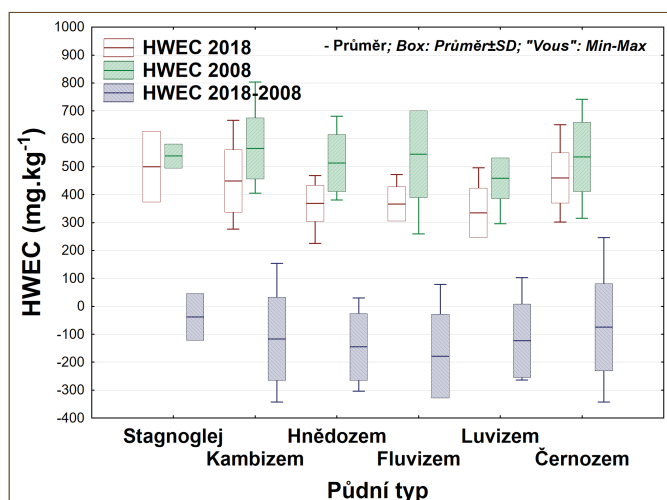
Soubor dat byl pořízen v provozních podmínkách zemědělských farem na 68 lokalitách (experimentálních polích) v České republice v období 2008–2018. Nejzastoupenějším půdním typem byla černozem (28 lokalit), dále hnědozem (13 lokalit), kambizem (11 lokalit), luvizem (8 lokalit), fluvizem (6 lokalit) a na dvou lokalitách byl půdní typ stagnoglej.

Stav pH (KCl), stanovený u experimentálních polí v roce 2018, se pohyboval v intervalu od 4,7 do 7,5. Nejvyšší průměrné pH bylo stanoveno u půdního druhu černozem (6,59), nejnižší u půdního

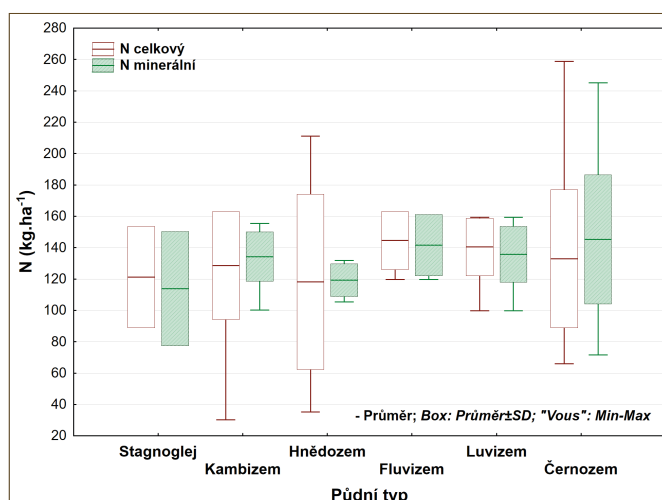
ho typu stagnoglej (5,42). Dále bylo zjištěno, že na všech sledovaných experimentálních lokalitách došlo za období 10 let k poklesu pH v půdě. Obsah SOC se v roce 2018 pohyboval od 1,04 do 2,84 %. Nejvyšší průměrný obsah SOC byl stanoven u půdního druhu černozem (1,92 %), nejnižší u půdního typu luvizem a stagnoglej (shodně 1,14 %). Průměrný rozdíl obsahu SOC (2018–2008; obsah SOC na konci pokusu – obsah SOC na začátku pokusu) se pohyboval od 0,06 % (stagnoglej) do 0,20 % (černozem). Na všech sledovaných experimentálních lokalitách došlo v půdě k nárůstu SOC viz obr. 5.4.2. Obsah HWEC byl stanoven v roce 2008 a 2018. Obsah HWEC na experimentálních polích v roce 2018 byl stanoven od 225 do 666 mg.kg<sup>-1</sup>. Průměrné hodnoty dle půdního typu byly vypočítány od 335 mg.kg<sup>-1</sup> (luvizem) až po 500 (stagnoglej). Průměrný rozdíl obsahu HWEC (2018–2008; obsah HWEC na konci pokusu – obsah HWEC na začátku pokusu) se pohyboval od 38 mg.kg<sup>-1</sup> (stagnoglej) do 178 mg.kg<sup>-1</sup> (luvizem). V průměru všech sledovaných půdních typů došlo v půdě k poklesu HWEC – viz obr. 5.4.3. Průměrná nasycenost sorpčního komplexu (CEC %) za období 2008–2018 byla stanovena od 63 (stagnoglej) do 93 (luvizem, černozem). V tomto případě platí, že pokud je průměrná CEC vyšší než 50 %, půdy jsou sorpčně nasyceny. Průměrný roční vstup do půdy celkového N v hnojivech za období 2008–2018 na sledovaných experimentálních lokalitách byl stanoven od 121,2 kg.ha<sup>-1</sup> (stagnoglej) do 157,2 kg.ha<sup>-1</sup> (luvizem). Vstup N z minerálních hnojiv je obdobný jako celkový N (viz obr. 4.5.4). Průměrný vstup celkového P do půdy v hnojivech na sledovaných experimentálních lokalitách se pohyboval od 19,7 kg.ha<sup>-1</sup> (luvizem) do 47,6 kg.ha<sup>-1</sup> (černozem). Průměrný vstup celkového K na sledovaných experimentálních lokalitách se pohyboval od 12,0 kg.ha<sup>-1</sup> (kambizem) do 69,1 kg.ha<sup>-1</sup> (luvizem). Nejvyšší průměrný vstup K byl zaznamenán na půdním typu stagnoglej (186,5 kg.ha<sup>-1</sup>) – viz obr. 4.5.5. Průměrná zrnitost půdy (%) dle jednotlivých půdních typů se v první kategorii (0,001–0,01 mm) pohybovaly v rozsahu od 13,7 (luvizem) do 24,8 (stagnoglej). Ve druhé kategorii (0,25–2,00 mm) průměrné hodnoty byly v rozpětí od 1,3–3,9 % (černozem, luvizem, hnědozem, fluvizem) a dále od 16,4 do 20,7 % (stagnoglej, kambizem).



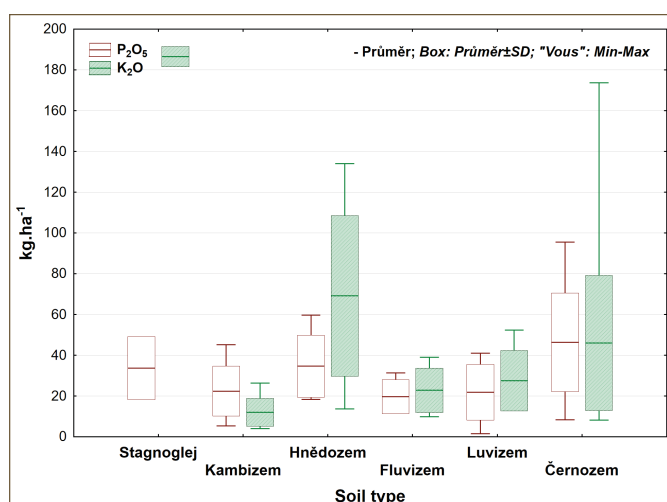
Obr. 4.5.2: Základní charakteristika souboru experimentálních polí (lokalit) pro SOC v období 2008–2018 pro jednotlivé půdní typy.



Obr. 4.5.3: Základní charakteristika souboru experimentálních polí (lokalit) pro HWEc v období 2008–2018 pro jednotlivé půdní typy.



Obr. 4.5.4: Průměrný vstup N (celkový a minerální) do půdy v hnojivech za období 2008–2018 pro jednotlivé půdní typy.

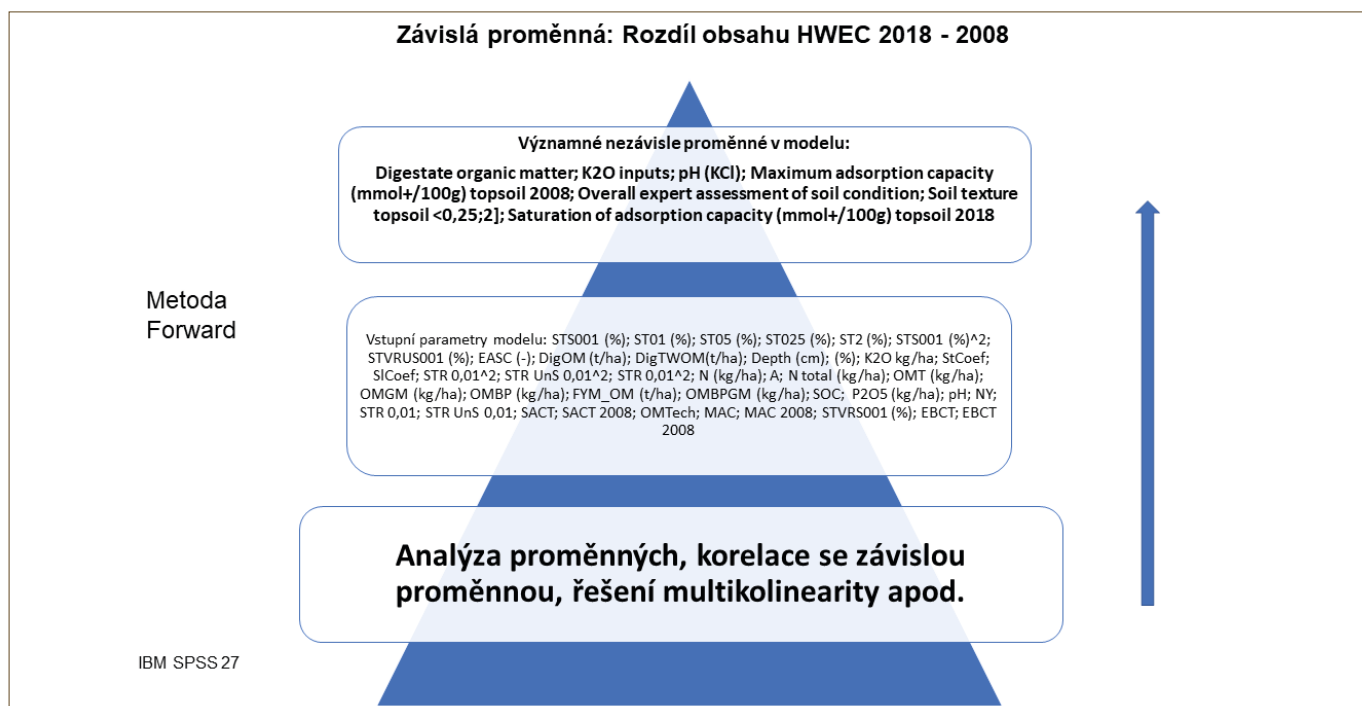


Obr. 4.5.5: Průměrný vstup P a K (minerální) do půdy v hnojivech v období 2008–2018 pro jednotlivé půdní typy.

### Modely HWEc a SOC

#### Model 1: Rozdíl obsahu HWEc (období 2016–2018)

Model byl vypracován na základě schématu viz obr. 4.5.6 a vycházel z naměřených dat základních parametrů půdy. Finální model (celkem bylo řešeno 7 modelů) pro závislost parametru „Rozdíl obsahu HWEc“ za období 2016–2018 dosáhl nízké hodnoty koeficientu determinace ( $R^2 = 0,3791$ ). Výsledky finálního modelu jsou uvedeny v tab. 4.5.2. Statistika kolinearit VIF vykazovala hodnotu mírně přes 1, což dokládá vzájemně nezávislá data.



Obr. 4.5.6: Vývojové schéma pro model Rozdíl obsahu HWEc (období 2016–2018).

Tab. 4.5.2: Vícerozměrný lineární regresní model pro Rozdíl obsahu HWEK (období 2016–2018).

| Coefficients |                                                             |                             |            |                           |         |        |
|--------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------|---------------------------|---------|--------|
| Model        |                                                             | Unstandardized Coefficients |            | Standardized Coefficients | t       | Sig.   |
|              |                                                             | B                           | Std. Error | Beta                      |         |        |
| 7            | Constant                                                    | -1998.4895                  | 881.3441   |                           | -2.2675 | 0.0256 |
|              | Digestate organic matter                                    | 570.2867                    | 203.3981   | 0.2836                    | 2.8038  | 0.0061 |
|              | K2O inputs                                                  | -0.8128                     | 0.6343     | -0.1393                   | -1.2815 | 0.2030 |
|              | pH (KCl)                                                    | -99.9548                    | 104.6603   | -0.2608                   | -0.9550 | 0.3419 |
|              | Maximum adsorption capacity (mmol+/100g) topsoil 2008       | -33.2229                    | 6.1221     | -0.7234                   | -5.4267 | 0.0000 |
|              | Overall expert assessment of soil condition                 | -445.8829                   | 91.1054    | -0.5115                   | -4.8941 | 0.0000 |
|              | Soil texture topsoil [<0,25;2]                              | 8.2161                      | 2.1590     | 0.3415                    | 3.8055  | 0.0002 |
|              | Saturation of adsorption capacity (mmol+/100g) topsoil 2018 | 40.1689                     | 16.2613    | 0.7154                    | 2.4702  | 0.0152 |

Vícerozměrný lineární regresní model pro Rozdíl HWEK (období 2016–2018) byl dále zpřesněn pomocí regresní diagnostiky tzv. regresním tripletem.

Zpřesněný model má tvar:

$\text{Rozdíl HWEK} = 542,6295 + 156,3642 * \text{Digestate organic matter} - 0,1025 * \text{K2O inputs} - 114,4247 * \text{pH (KCl)} + 1,6734 * \text{Maximum adsorption capacity (mmol+/100g) topsoil 2008} - 37,8306 * \text{Overall expert assessment of soil condition} + 2,3033 * \text{Saturation of adsorption capacity (mmol+/100g) topsoil 2018}.$

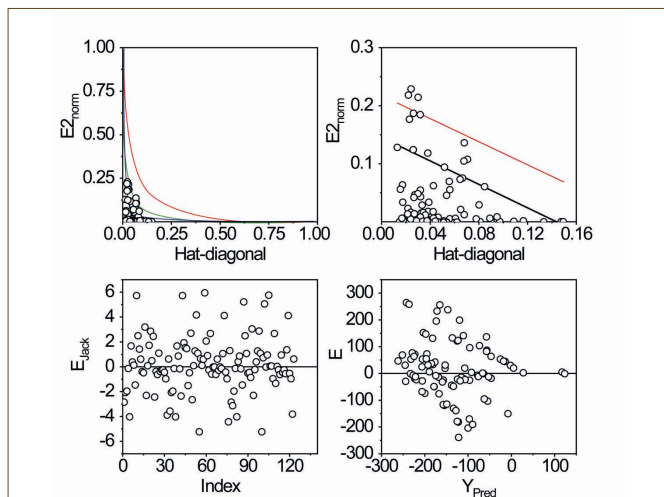
V odhadech parametrů viz tab. 4.5.3, parametry K2O inputs, Maximum adsorption capacity (mmol+/100g) topsoil 2008 a Soil texture topsoil [<0,25;2] nejsou statisticky významné a proto byly odstraněny a finální vícerozměrný regresní model má tvar:

$\text{Rozdíl HWEK} = 542,6295 + 156,3642 * \text{Digestate organic matter} - 0,1025 * \text{pH (KCl)} - 37,8306 * \text{Overall expert assessment of soil condition} + 0,9948 * \text{Soil texture topsoil [<0,25;2]} + 2,3033 * \text{Saturation of adsorption capacity (mmol+/100g) topsoil 2018}.$

Statistické charakteristiky regrese jsou následující:  $r = 0,9053$ ,  $R^2 = 0,8195$ , MEP = 12003,1472, AIC = 976,6503. Model je významný dle Fisher-Snedecorova testu významnosti modelu ( $F = 74,6373$ , kvantil  $F = 2,0901$ ,  $p = 8,55465E-40$ ). Model je korektní dle Scottova kritéria multikolinearity ( $SC = 0,1137$ ). Rezidua vykazují heteroskedasticitu (Cook-Weisbergův test heteroskedasticity). Rezidua mají normální rozdělení (Jarque-Berrův test normality). Rezidua jsou negativně autokorelována (Durbin-Watsonův test autokorelace). V reziduiích není trend (Znaménkový test reziduií) - viz obr. 4.5.7.

Tab. 4.5.3: Zpřesněný vícerozměrný lineární regresní model pro Rozdíl HWEK (období 2016–2018).

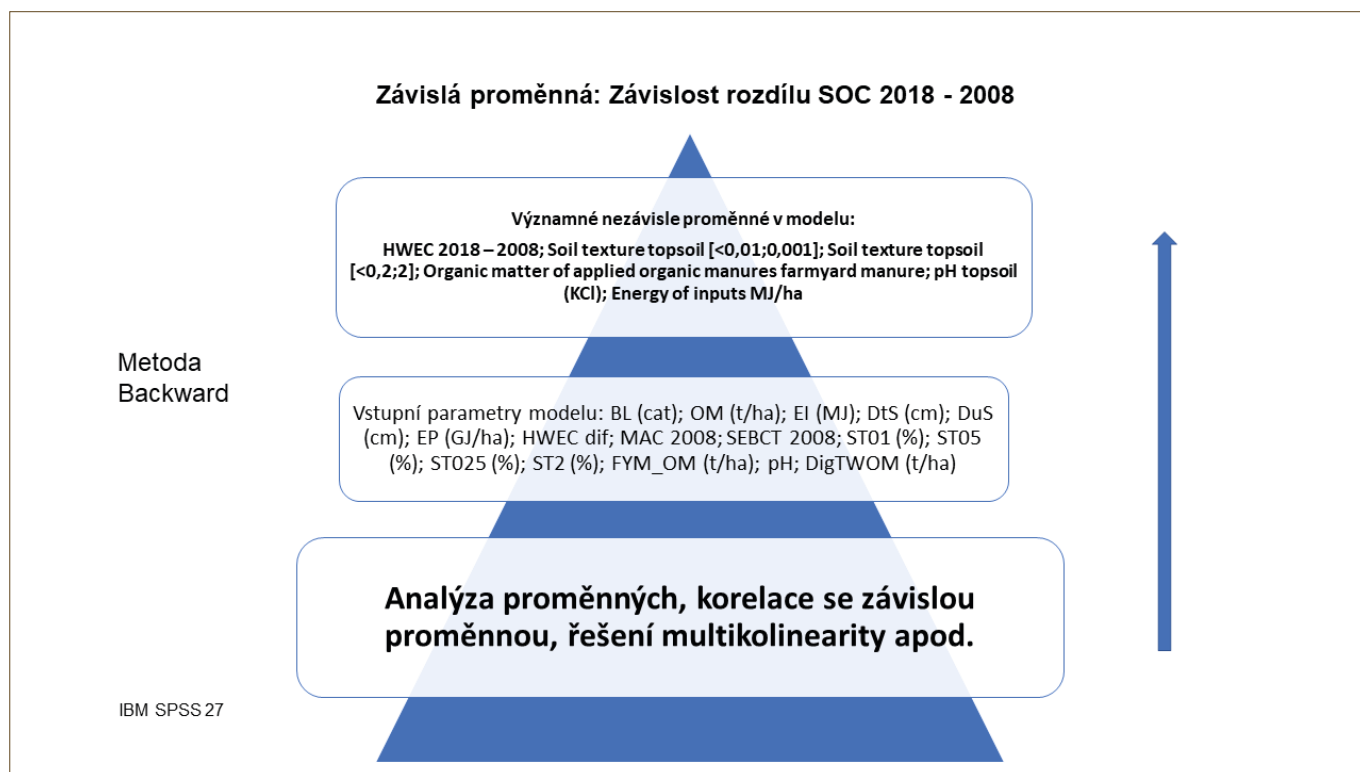
| Variable                                                    | B (approx.) | Std. Error | Result   | Probabil. | Lower limit | Upper limit |
|-------------------------------------------------------------|-------------|------------|----------|-----------|-------------|-------------|
| Constant                                                    | 542.6295    | 47.5988    | Sign.    | 0         | 448.3453    | 636.9137    |
| Digestate organic matter                                    | 156.3642    | 34.5987    | Sign.    | 1.51E-05  | 87.8307     | 224.8978    |
| K2O inputs                                                  | -0.1025     | 0.07174    | NotSign. | 0.1556    | -0.2446     | 0.0395      |
| pH (KCl)                                                    | -114.4247   | 10.0059    | Sign.    | 0         | -134.2450   | -94.6050    |
| Maximum adsorption capacity (mmol+/100g) topsoil 2008       | 1.6734      | 1.10854    | NotSign. | 0.1338    | -0.5223     | 3.8692      |
| Overall expert assessment of soil condition                 | -37.8306    | 13.5679    | Sign.    | 0.0062    | -64.7061    | -10.9552    |
| Soil texture topsoil [<0,25;2]                              | 0.9948      | 0.59528    | NotSign. | 0.0974    | -0.1843     | 2.1739      |
| Saturation of adsorption capacity (mmol+/100g) topsoil 2018 | 2.3033      | 0.17213    | Sign.    | 0         | 1.9623      | 2.6442      |



Obr. 4.5.7: Analýza reziduí pro vícerozměrný lineární regresní model pomocí (a) L-R graf, (b) Pregibonův graf, (c) Jackknife rezidua graf a (d) graf predikovaných reziduí (Rozdíl obsahu HWEC / období 2016–2018/).

#### Model 2: Závislost rozdílu SOC mezi roky 2018 a 2008

Na základě získaných výsledků (viz základní parametry půdy), byl sestaven vícerozměrný lineární regresní model pro Závislost rozdílu humusu (SOC) mezi roky 2008 a 2018 (Hodnota humusu byla získána přepočtem ze SOC přepočtem koeficientem 1,721088 pro průměrné podmínky ČR) viz obr. 4.5.8. Pro stanovení regresních rovnic byla použita metoda Backware, která postupně odebírala nesignifikantní proměnné. Finální model (celkem bylo 10 modelů) pro závislost rozdílu obsahu humusu mezi roky 2018 a 2018 dosáhl koeficientu determinace  $R^2 = 0,3910$ , při hodnotě testu Durbin-Watson 2.2630. Výsledky finálního modelu jsou uvedeny v tab. 4.5.4. Statistika kolinearit vykazovala hodnotu mírně přes 1, což dokládá vzájemně nezávislá data.



Obr. 4.5.8: Vývojové schéma pro model Závislost rozdílu SOC mezi roky 2018 a 2008.

Finální vícerozměrný lineární regresní model pro Závislost rozdílu SOC mezi roky 2018 a 2008 (DH SOC) byl dále zpřesněn pomocí regresní diagnostiky tzv. regresním tripletem (Meloun, Militký 2012). Pro zpřesnění modelu byla použita metoda IRWLS exp(-e). To je robustní regresní metoda ze třídy M-odhadů, při níž se minimalizuje čtverec vážených normovaných reziduí  $w(eni)$  s vahami  $w(e) = \exp(-e)$ . K výpočtu se používá iterativně vážená metoda nejmenších čtverců (Iteratively Re-Weighted Least Squares).

Zpřesněný model má tvar:

*Humus Difference 2018 – 2008* =  $2,3920 + 0,0006 * \text{Difference HWEC} - 0,223 * ST01\% - 0,0232 * ST2 (\%) + 0,0201 * FYM\_OM$

$(t/ha) - 0,1308 * pH(KCl) - 6,9199 * ENPKB(MJ.ha^{-1}) - 0,0111 * SSD(cm)$ .

Statistické charakteristiky regrese jsou následující:  $r = 0,9385$ ,  $R^2 = 0,8808$ ,  $MEP = 0,1396$ ,  $AIC = -221,3600$ . Model je významný dle Fisher-Snedecorova testu významnosti modelu ( $F = 54,9392$ , kvantil  $F = 2,1916$ ,  $8,4837E-022$ ). Model je korektní dle Scottova kritéria multikolinarit ( $SC = -0,0751$ ). Rezidua vykazují heteroskedasticitu (Cook-Weisbergův test heteroskedasticity). Rezidua nemají normální rozdělení (Jarque-Berrův test normality). Rezidua jsou negativně autokorelována (Durbin-Watsonův test autokorelace). V reziduích není trend (Znaménkový test reziduí) - viz obr. 4.5.9.



Tab. 4.5.4: Vícerozměrný lineární regresní model pro Závislost rozdílu SOC mezi roky 2018 a 2008.

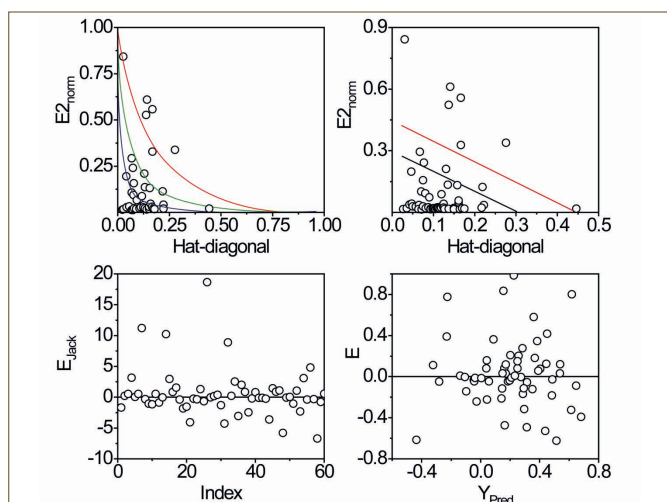
| Model |                                                                         | Unstandardized Coefficients |            | Standardized Coefficients | t       | Sig.   | Collinearity Statistics |        |
|-------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------|---------------------------|---------|--------|-------------------------|--------|
|       |                                                                         | B                           | Std. Error | Beta                      |         |        | Tolerance               | VIF    |
| 10    | Constant                                                                | 2.4010                      | 0.6040     |                           | 3.9770  | 0.0000 |                         |        |
|       | Difference HWEK 2018 – 2008                                             | 0.0010                      | 0.0000     | 0.3460                    | 3.0010  | 0.0040 | 0.9360                  | 1.0690 |
|       | Soil texture, percentage of particles smaller than 0,01-0.001 mm (ST01) | -0.0280                     | 0.0100     | -0.3050                   | -2.6320 | 0.0110 | 0.9260                  | 1.0800 |
|       | Soil texture of topsoil - percentage of particles 0.25-2 mm (ST2)       | -0.0230                     | 0.0070     | -0.4390                   | -3.4080 | 0.0010 | 0.7480                  | 1.3360 |
|       | Organic matter from applied organic manures farmyard manure (FYM_OM)    | 0.0190                      | 0.0110     | 0.2120                    | 1.7350  | 0.0890 | 0.8340                  | 1.1980 |
|       | pH(KCl)                                                                 | -0.1360                     | 0.0710     | -0.2490                   | -1.9100 | 0.0620 | 0.7310                  | 1.3690 |
|       | Energy of NPK + the energy of the by-product left on the field (ENPKB)  | -3.968E-7                   | 0.0000     | -0.3020                   | -2.5190 | 0.0150 | 0.8650                  | 1.1560 |
|       | Subsoil depth (SSD)                                                     | -0.0110                     | 0.0060     | -0.2320                   | -1.9570 | 0.0560 | 0.8870                  | 1.1270 |

Notes on the regression model: In the analysis of variables in the model, the variables that correlated with the difference in humus between 2018 and 2008 were considered. The following variables were included: the HWEK values from 2018 minus the HWEK values from 2008 (Difference HWEK 2018 – 2008), energy difference (ED), maximum adsorption capacity (MACT), V\_topsoil, Soil texture - percentage of particles smaller than 0.001 mm (STS001), Soil texture of topsoil, - percentage of particles 0.01-0.05 mm (ST05), Soil texture of topsoil - percentage of particles 0.05-0.25 mm (ST025), Soil texture of topsoil - percentage of particles 0.25-2 mm (ST2), Organic matter from applied FYM (t), pH (KCl), Energy potential 2018 Topsoil (EPT), Total amount of organic matter applied to the soil including the by-products (TAOM), Inputs energy (IE), Biological activity of soil Category (BAC), Subsoil depth (SSD) and Topsoil depth (TSD). Of these variables, the energy potential of the soil (EPT), which was excluded in the last design of the model, and the maximum sorption capacity in topsoil (MACT), which was excluded in the 8th model, were of great importance for the creation of the regression model.

Tab. 4.5.5: Zpřesněný vícerozměrný lineární regresní model pro Závislost rozdílu SOC mezi roky 2018 a 2008.

| Variable        | B (approximation) | Std. Error | Result      | Probability | Lower limit | Upper limit |
|-----------------|-------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Constant        | 2.3921            | 0.2597     | Significant | 0.000000    | 1,8709      | 2,9132      |
| Difference HWEK | 0.0007            | 0.0002     | Significant | 0.000075    | 0.0004      | 0.0010      |
| ST01            | -0.0223           | 0.0037     | Significant | 0.000000    | -0.0298     | -0.0148     |
| ST2             | -0.0233           | 0.0027     | Significant | 0.000000    | -0.0287     | -0.0178     |
| FYM_OM          | 0.0202            | 0.0042     | Significant | 0.000016    | 0.0117      | 0.0287      |
| pH(KCl)         | -0.1309           | 0.0286     | Significant | 0.000030    | -0.1883     | -0.0735     |
| ENPKB           | 0.0000            | 0.0000     | Significant | 0.000000    | 0.0000      | 0.0000      |
| SSD             | -0.0112           | 0.0020     | Significant | 0.000001    | -0.0151     | -0.0072     |

Note: Difference HWEK - difference HWEK 2018 - 2008, ST01 - soil texture, percentage of particles smaller than 0,01-0.001 mm, ST2 - soil texture of topsoil - percentage of particles 0.25-2 mm, FYM\_OM - organic matter from applied organic manures farmyard manure, pH (KCl) - soil reaction, ENPKB - energy of NPK + the energy of the by-product left on the field, SSD - subsoil depth.



Obr. 4.5.9: Analýza reziduí pro vícerozměrný lineární regresní model pomocí (a) L-R graf, (b) Pregibonův graf, (c) Jackknife rezidua graf a (d) graf predikovaných reziduí (Závislost rozdílů SOC mezi roky 2018 a 2008).

#### Dílčí závěr

Výsledky jednoznačně prokázaly, že:

- na všech sledovaných experimentálních lokalitách v období 2008–2018 se v průměru obsah SOC (stabilní složka SOM) zvýšil, obsah HWEC (labilní složka SOM) se naopak snížil;
- došlo k poklesu pH a nasycenosti sorpčního komplexu (SEBCT) v důsledku aplikace digestátu napříč půdními půdně-klimatickými podmínkami. Intenzifikace zemědělské výroby obecně zvyšuje biologické pochody v půdě, zejména hnojením minerálními hnojivy. Na druhou stranu však dochází k poklesu pH i snižování nasycenosti sorpčního komplexu /SEBCT/ (významným způsobem k tomu přispívá i aplikace digestátu);
- obsah HWEC (labilní složka C) je významně ovlivňován aktuální úrodností půdy v parametrech obsah fosforu (-30 %) a aplikací organických hnojiv /digestát/ (+29 %), dále SEBCT (+21 %) a dávkou celkového aplikovaného dusíku (N) do půdy (-20 %). Z dlouhodobějšího časového hlediska je obsah HWEC v půdě ovlivňován aplikací digestátu (+15 %), nasycení sorpčního komplexu (+37 %), negativně působí aplikace minerálního draslíku (-7 %), pH půdy (-14 %) a celkový stav půdy (-27 %);
- obsah SOC, resp. Humus (stabilní složka C), je ovlivňován obsahem HWEC /+17 %/ (organická hmota z HWEC /labilní forma C/ se transformovala do SOC /stabilní formy C/), půdní textura 0,01–0,001 mm (+10 %), vstup organické hmoty a živin ze živočišné výroby (+10 %), negativně působí minerální hnojení (-14 %), dále hloubkou půdy v podorníci (-11 %) i půdní textura 0,25–2 mm (-21 %);
- aplikací statkových hnojiv (hnůj /FYM/) udržujeme, resp. zvyšujeme obsah SOC i HWEC (digestát má na obsah SOC pozitivní vliv v případě aplikace dostatečného množství organické hmoty ve formě statkových hnojiv /FYM/). V případě, že se organická hmota ve formě statkových hnojiv /FYM/ aplikuje málo, obsah humusu výrazně klesá – to potvrzuje i výstavba regresního modelu Závislost rozdílů SOC mezi

roky 2018 a 2008 – viz obr. 4.5.8, kdy digestát byl z modelu odebrán v předposledním kroku – nesignifikanční proměnná, a následně tento výsledek potvrdil i zpřesněný model viz podrobně Voltr, Menšík et al. (2021).

Dosažené výsledky dále potvrdily důležitost sledovat současně stabilní /SOC/ i labilní /HWEC/ složky SOM ve vztahu k fyzikálně-chemickým a dále i biologickým vlastnostem půdy, ale i ve vztahu k péči (hospodaření) na půdě (pravidelným hnojením se vytváří v půdě lepší prostředí k rozkladu organické hmoty a následně na méně kvalitních půdách zůstává nerozložená organická hmota déle – statisticky prokazatelný trend nárůstu obsahu organické hmoty v půdě s přírůstkem hnoje /FYM/, kdy současně narůstá i HWEC).

Rozšířené výsledky studie byly publikovány v časopisu *Agronomy* (Voltr, Menšík et al. 2021).

#### 4.6. Modelování změn obsahu půdní organické hmoty v orných půdách ČR

##### Cíl studie

Cílem kapitoly je na příkladu tří případových vědeckých studií vyhodnotit možnosti predikce změn obsahu půdní organické hmoty v orných půdách v České republice pomocí procesně orientovaných simulačních modelů, jakým je např. volně dostupný model EPIC<sup>13</sup>. Realizované studie v oblasti modelování obsahu půdní organické hmoty jsou uvedeny v následujícím přehledu:

- (1) V pilotní studii Madaras et al. (2017) byl model EPIC kalibrován a validován na lokální úrovni pomocí výsledků dlouhodobého pokusu se zaorávkou slámy v lokalitě Trutnov. Validovaný model EPIC byl využit pro testování virtuálních scénářů různých managementů při stejném klimatu a hnojení pouze minerálními hnojivy.
- (2) V další studii Stehlík et al. (2020) byl model validován na trutnovském pokusu využit pro cvičení, jak model reaguje na virtuální scénáře teplotních změn (+1 °C a +2 °C oproti teplotám v období 1965–2009), změn srážek (-30 %, -10 %, beze změny, +10 %, +30 %), změn obsahu CO<sub>2</sub> v ovzduší (350 ppm, 420 ppm, 540 ppm, 670 ppm) a hospodaření (ochranná agrotechnika se zamezením eroze vs. konvenční hospodaření).
- (3) Ve studii Balkovič et al. (2020) byl vytvořen a otestován postup, pomocí kterého lze využít dostupné regionální databáze a další podklady a efektivně je začlenit do rastrového regionálního modelu EPIC-IIASA, který je sestaven pro odhad regionální dynamiky uhlíku v orných půdách České republiky. Postup zahrnoval kalibraci modelu EPIC-IIASA na datech čtyř dlouhodobých polních pokusů v rozdílných regionech a s rozdílným klimatem.

##### Popis výzkumného objektu včetně metod studia

Regionální monitorování, reporting emisí uhlíku a ověřování změn organického uhlíku v zemědělské půdě jsou nezbytné pro podporu národních politik a legislativy související se snižováním emisí CO<sub>2</sub>, sekvestrací C a dosažení uhlíkové neutrality.

<sup>13</sup> Izaurralde, R. C., Williams, J. R., McGill, W. B., Rosenberg, N. J., & Jakas, M. C. Q. (2006). Simulating soil C dynamics with EPIC:

Model description and testing against long-term data. *Ecological Modelling*, 192(3-4), 362–384. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.07.0

Jedním z přístupů je využití slibně se rozvíjejících agronomických modelů.

Existuje řada počítačových simulačních modelů, které jsou schopny agrotechnické zásahy a vliv klimatu věrohodně simulovat. Pomocí těchto modelů lze predikovat výnosy plodin a řadu půdních a dalších environmentálních parametrů jak pro různé klimatické scénáře, tak i pro různé způsoby hospodaření nebo hnojení. Sestavení relevantních modelů, vhodně popisujících realitu, předpokládá jejich předchozí kalibraci a validaci pro specifické podmínky různých půdně-klimatických oblastí. K často využívaným procesně orientovaným modelům patří model EPIC (Environmental Policy Integrated Climate), vyvíjený od 80. let ve Spojených státech amerických (Williams 1995). Samotný model je volně dostupný, nicméně pro dosažení uspokojivých výsledků je nutná jeho kalibrace a validace. Cílem kalibrace a validace modelu je dosáhnout co nejvyšší přesnosti u více výstupů modelu současně a generalizovat vstupní parametry.

Model EPIC operuje se vstupy dat o počasí (denní maximální a minimální teplota, denní srážky a radiace, aj.), s plánem prací na pozemku (setí, hnojení, zpracování půdy, orba), s osevními postupy, typy a dávkou hnojení, typy zemědělských strojů (hloubka zpracování půdy, rozteč řádků, intenzita mísení půdy, drsnost povrchu), vlastnostmi půdy (zrnatost, objemová hmotnost půdy, obsah organického uhlíku, kationtová výměnná kapacita, aj.) a vlastnostmi stanoviště (obsah  $\text{CO}_2$  a dusíku v atmosféře, sklon, nadmořská výška aj.). Tyto vstupy jsou v modelu zpracovávány sadou rovnic a nastavením řídicích parametrů. Výstupy modelu EPIC jsou výnosy hlavního a vedlejšího produktu pěstované plodiny, obsah půdního uhlíku, objemová hmotnost půdy, drsnost povrchu půdy, obsah vody v půdě, perkolace a odtok vody, evapotranspirace, evaporace, eroze půdy, odtok živin aj.

Nejvhodnější data pro sestavení a ověření správně fungujících modelů představují dlouhodobé polní pokusy, z nichž jsou pro každý rok dostupná reálná měření charakteristik počasí, specifikace pěstebních postupů a prací na pozemku. Na datech výnosů hlavního a vedlejšího produktu a obsahu organického uhlíku z různých variant z dlouhodobých pokusů, trvajících i přes 60 let, je ověřována přesnost predikcí modelu EPIC. Na základě citlivostní analýzy je vyhodnocen význam jednotlivých vstupních a řídicích parametrů modelu. Výsledkem je nalezení takové sady parametrů, které jsou rozhodující pro správné fungování modelu ve variabilních podmínkách.

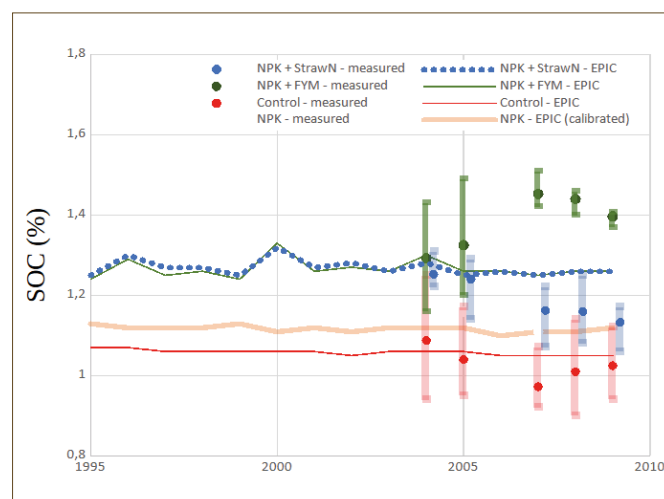
Simulační modely lze využít nejenom pro lokální, ale i pro regionální, národní či globální modelování dynamiky uhlíku v půdě. Zde se však objevují nová omezení, se kterými je nutné se vypořádat. Modely často vyžadují specifické, a ne vždy dostupné vstupní údaje, resp. regionální údaje mohou být zatíženy značnou mírou nejistoty, která se pak při predikcích projeví velkou mírou nejistoty výstupů. Proto je potřeba, aby byly modely využívány pro regionální predikce kalibrovány a ověřovány na výsledcích přesných polních pokusů nebo pomocí jiných místně specifických statistických údajů (např. regionálních výnosových výsledků apod.).

**Vybrané lokality byly pokusy:** Trutnov (50°34'N, 15°53'E, 427 m n.m., průměrná roční teplota 7,5 °C, roční srážky 750 mm, písčito-hlinitá kambizem modální); Hněvčeves (50°19'N, 15°43'E, 275 m n.m., průměrná roční teplota 8,1 °C, roční srážky 600 mm, jílovito-hlinitá hnědozem luvická); Praha-Ruzyně (50°5'N, 14°18'E, 360 m n.m., průměrná roční teplota 7,9 °C, roční srážky 472 mm, jílovito-hlinitá hnědozem modální) a Uherský Ostroh (48°59'N, 17°25'E, 196 m n.m., průměrná roční teplota 9,1 °C, roční srážky 521 mm, hlinitá kambizem modální). Dalším krokem postupu bylo využití parametrů nastavených při validaci pro rastrové regionální modelování v rastru 1x1 km, přičemž potřebné vstupní parametry byly získány z celoevropských datových souborů a regionálních statistik využívání půdy.

## Výsledky

### Studie Madaras et al. (2017)

Trutnovský polní experiment probíhal v letech 1965 až 2009. Jeho původním cílem bylo porovnat účinek hnojení buď formou chlévského hnoje nebo ekvivalentním množstvím obilné slámy s dohnojením minerálním N na výnosy plodin a úrodnost půdy (Lipavský et al. 2008). V roce 1965 již existovaly farmy, které prošly postupným ukončením chovu hospodářských zvířat, takže od samého začátku byla tato problematika považována za důležitou. V polním pokusu byl hnůj aplikován každý 4. rok v dávce 30 t.ha<sup>-1</sup>. Ve stejných letech jako hnůj byla po sklizni obilovin aplikována sláma s přidavkem N v množství 1 kg N na 100 kg slámy. Průměrné vstupy C ve variantách s aplikací hnoje a slámy byly podobné a činily 1,51 a 1,24 t C.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>. Experiment navíc zahrnoval použití minerálních hnojiv N, P a K v různých kombinacích, což vedlo k celkem osmnácti variantám hnojení, čtyřikrát opakovaným.



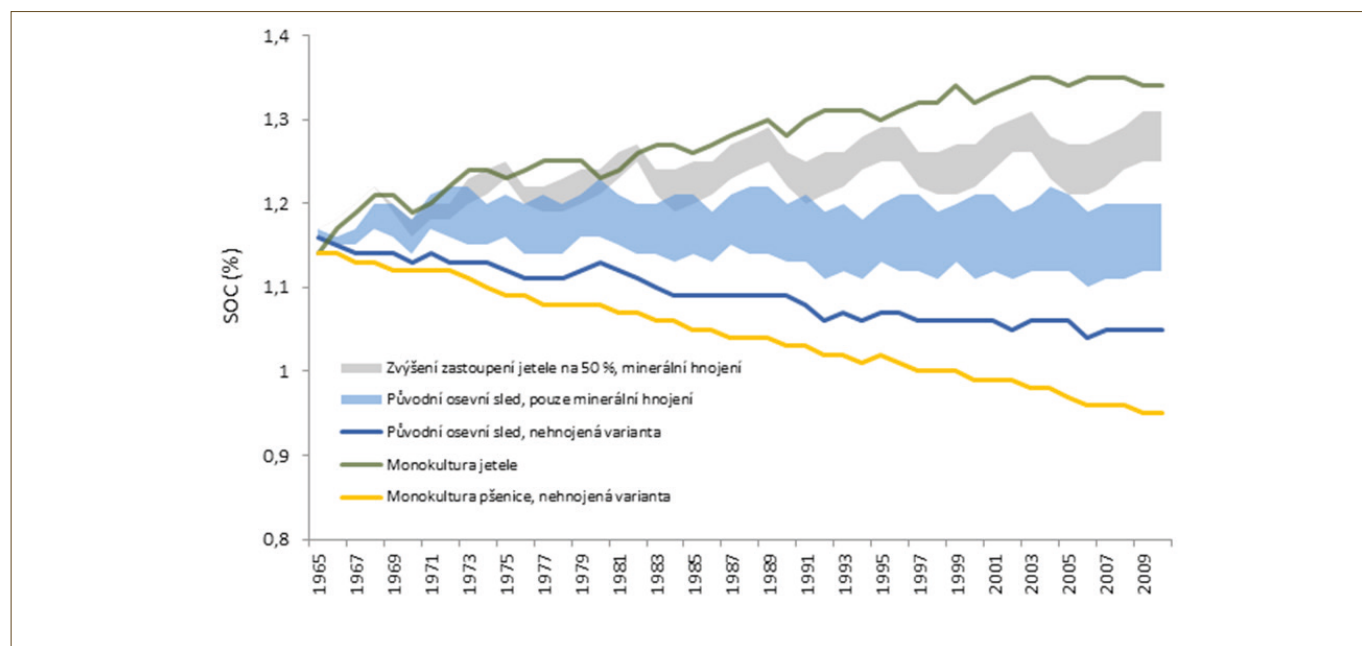
Obr. 4.6.1: Skutečné a simulované obsahy SOC ve variantách dlouhodobého pokusu v Trutnově (FYM - hnůj, StrawN - aplikace slámy s dusíkem, control - nehnojeno). U měřených hodnot označuje šířka pásů rozptyl mezi opakováními příslušné varianty.

Osmiletý osevní sled sestávala z obilovin (50 %), brambor (25 %) a píce (jetel; 25 %). Kultivace půdy byla konvenční (orba do hloubky 25–30 cm). Na začátku experimentu byl obsah SOC asi 1,15 %. Po 40 letech obsah SOC ve variantách byl 1,03 % (nehnojeno), 1,14 % (NPK), 1,17 % (pouze Sláma + N), 1,19 % (NPK + Sláma + N), 1,17 % (pouze hnůj) a 1,38 % (NPK + hnůj). Výsledky polního pokusu jasně ukázaly, že hnoje-

ní hnojem nelze plně nahradit aplikacemi slámy, ani když jsou vstupy C ekvivalentní (Lipavský et al. 2008). Validovaný model uspokojivě popsal trendy SOC na nehnojené variantě a variantě hnojené pouze minerálními hnojivy. U variant s aplikací hnoje docházelo v modelu k určitému podhodnocení obsahů SOC, u variant s aplikací slámy naopak k nadhodnocení (obr. 4.6.1).

Cílem simulační studie bylo určit, jakých obsahů SOC lze dosáhnout agrotechnickými opatřeními při absenci aplikace hnoje. Výsledky simulací (obr. 4.6.2) ukazují, že pěstování jetele má pozitivní vliv na obsah SOC, zatímco pěstování pšenice negativní. Pěstování (hypotetické) kontinuální monokultu-

ry jetele je spojeno s nejvyššími předpokládanými hodnotami SOC ve všech simulacích. Dále jsme simulovali 6-letý osevní sled s 50% podílem jetele (3 roky jetel - pšenice - brambory - oves s podsevem jetele). Konečný obsah SOC byl blízký obsahu vyplývajícímu z původního střídání plodin v kombinaci hnojení NPK s chlévským hnojem ( $40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  jednou za 4 roky). Simulace ukázaly, že po snížení hloubky zpracování půdy a celkovém snížení intenzity kultivace lze očekávat zvýšení SOC. Předpokládaný obsah SOC negativně souvisel s počtem operací kultivace půdy. Toto je další pozitivní účinek vkládání jetele do osevních sledů, protože během pěstování jetele půda není kultivována.



Obr. 4.6.2: Simulace vývoje obsahu SOC při různých scénářích sledu plodin a intenzity kultivace půdy. Pásky zobrazují rozsahy, které závisí na intenzitě kultivace půdy – dolní hranice pásu představuje konvenční zpracování půdy a horní hranice minimalizaci (žádná kultivace).

Z testovaných možností změn managementu zaměřených na zvýšení obsahu půdní organické hmoty se jako nejúčinnější opatření ukázalo zajištění dostatečného vstupu stabilizované organické hmoty (hnůj) a zvýšení podílu víceletých píceňin v osevním sledu. Obě opatření předpokládají pokračující chov zvířat na farmách, což je vzhledem k celkové recesi tohoto odvětví obtížně dosažitelné. Stabilizaci obsahu SOC lze pak dosáhnout při minimalizovaném zpracování půdy v kombinaci s vyššími dávkami minerálních hnojiv. Z hlediska celkového obsahu půdní organické hmoty se ve všech případech jedná o poměrně málo výrazné zvýšení a v řádu několika desetiletí vývoj SOC směřuje k dosažení nové rovnováhy, kde k dalšímu zvýšení obsahu SOC již nedochází.

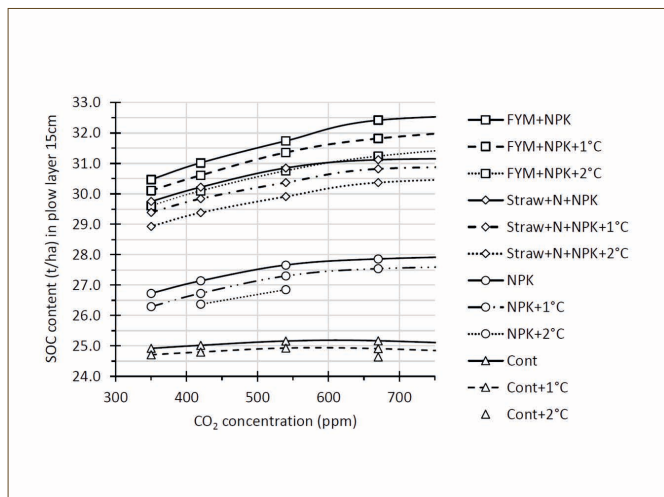
#### Studie Stehlík et al. (2020)

Změna množství srážek v rozmezí  $\pm 30 \%$  měla na obsah SOC pouze malý vliv, změny se ke konci simulovaného 45-letého

období pohybovaly v rozmezí jednotek procent počátečního stavu. Důvodem je zřejmě to, že stanoviště leží v regionu s dostatkem srážek (750 mm) a simulovaná úroveň snížení srážek neměla na výnosy pěstovaných plodin (a tím ani na SOC) zásadní vliv. Jako důležitější se prokázal vliv zvýšení koncentrace  $\text{CO}_2$  v ovzduší, které podpořilo tvorbu biomasy, čímž došlo také ke zvýšení zabudování C do půdní organické hmoty (obr. 4.6.3). Efekt se projevil zejména u variant bez limitace živin (nejvýrazněji NPK + hnůj), u nehnojených variant se efekt zvyšování koncentrace  $\text{CO}_2$  neprojevil.

Zvýšení teploty vzduchu o jeden a dva stupně způsobilo u všech variant hnojení pokles obsahu SOC, což lze vysvětlit nárůstem intenzity mikrobiálního rozkladu organické hmoty s teplotou. Pokles byl vyšší u variant s vyšším obsahem SOC. Zvyšování koncentrace  $\text{CO}_2$  a zvyšování teploty měly tedy v simulacích pro dané stanoviště a způsob hospodaření protichůdný efekt.



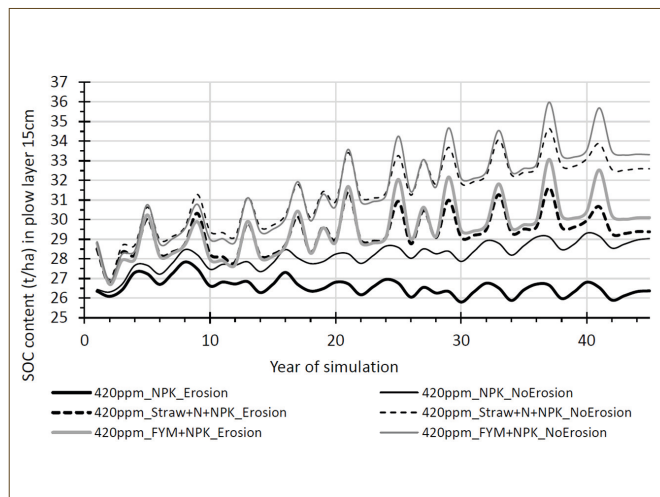


Obr. 4.6.3: Simulace vlivu zvýšení koncentrace  $\text{CO}_2$  a zvýšení průměrné teploty na obsahy SOC po 45 letech trvání pokusu.

Hospodaření se zamezením eroze (obr. 4.6.4.) přineslo nejvýznamnější nárůst obsahu SOC u varianty s pouze minerálním hnojením, kde změnilo klesající trend SOC na rostoucí. Dané stanoviště se však nachází na velmi mírném svahu (3–5 stupňů) a erozní procesy nejsou příliš intenzivní. Je předpoklad, že na svažitéjším stanovišti by zamezení eroze mělo na obsah SOC mnohem větší vliv.

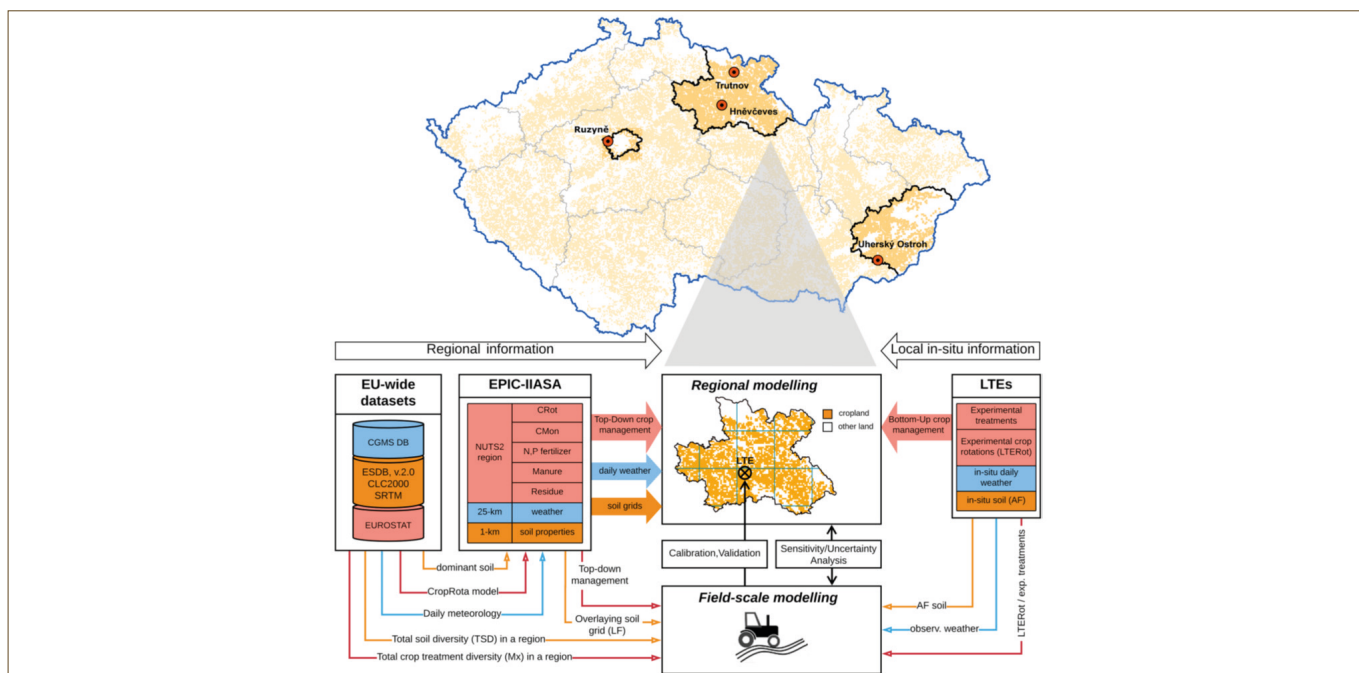
Studie Balkovič et al. (2020)

Schéma simulací pro tři české regiony je uvedeno na obr.



Obr. 4.6.4: Vliv inaktivace erozního modulu modelu EPIC na vývoj SOC při minerálním hnojení bez statkových hnojiv, s aplikací hnoje a se zaorávkou slámy (simulováno při 540 ppm  $\text{CO}_2$ ).

4.6.5. Oproti lokálním simulacím na stanovištích dlouhodobých pokusů, kde jsou známy všechny podstatné skutečnosti je pro simulace v rastru 1x1 km nutno vyřešit nedostatek lokálních informací. Každá buňka rastru tvoří samostatnou simulační jednotku, pro kterou je nutné získat průměrné nebo nejpravděpodobnější vstupní údaje o stanovištních, půdních a klimatických podmínkách, pěstované plodině, hnojení, agrotechnice atd.



Obr. 4.6.5: Simulované regiony s lokalizací dlouhodobých pokusů a schématem struktury regionálního rastrového modelu (oranžová barva – informace o orné půdě, modrá barva – meteorologické vstupy, červená barva – vstupy o hospodaření na půdě).

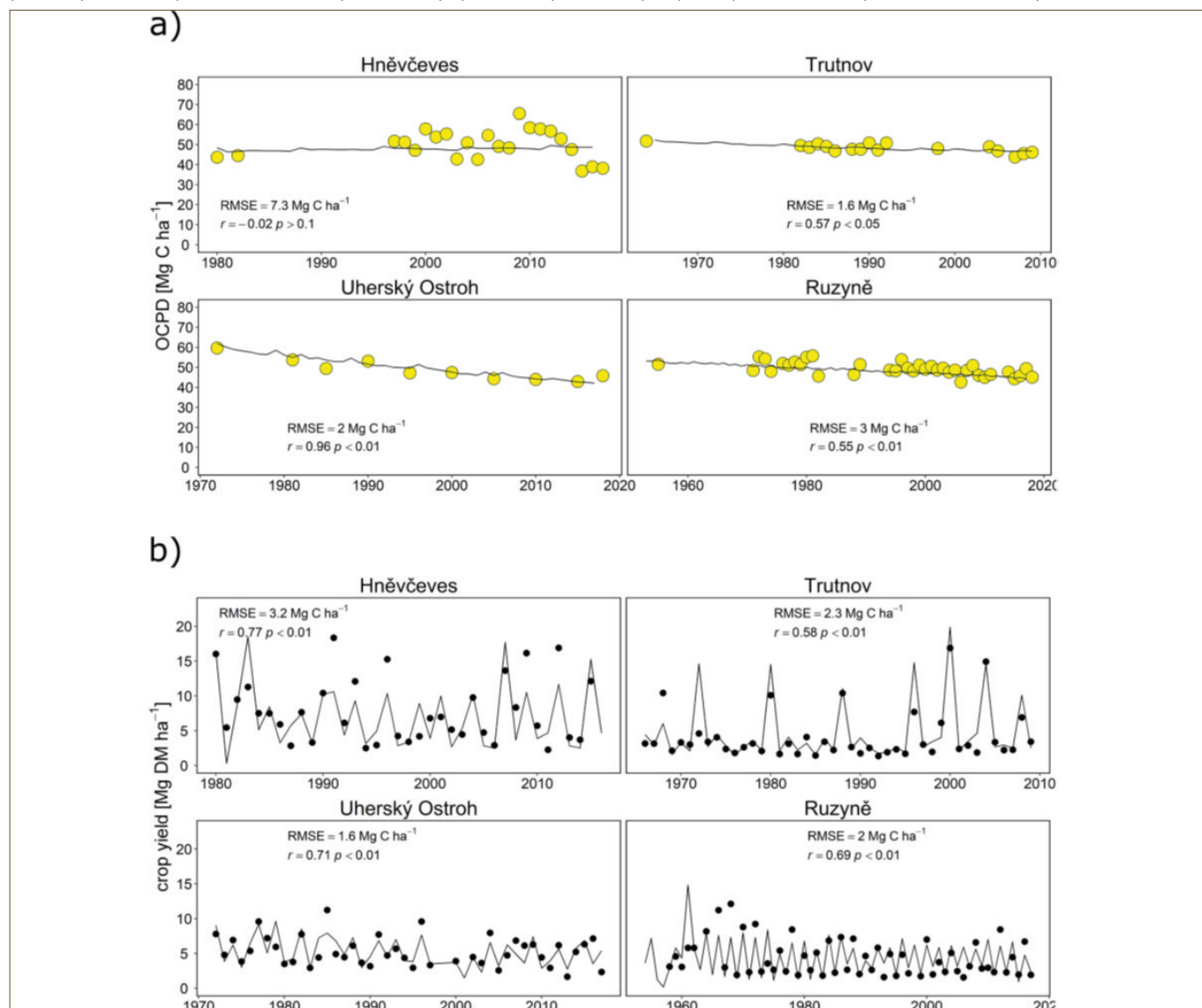
V naší práci k tomuto sloužily zejména evropské databáze (počasí, půda) a regionální statistiky (struktura plodin). Testovali jsme tři různé přístupy k získání vstupů a zjištění, jak by se SOC vyvíjel: (1) v každé simulační buňce byl aplikován osevní sled, hnojení a agrotechnika tak, jak v příslušném dlouhodobém pokusu, (2) pomocí CropRota modelu byly vygenerovány nejpravděpodob-

nější osevní sledy pomocí regionálních statistik o osevních plochách, (3) byly uvažovány pouze monokultury plodin.

Pro každý region byl nejprve model parametrizován na základě dat dlouhodobých pokusů přítomných v těchto regionech. Parametrizace byla provedena tak, aby byla dosažena co nejlepší

shoda mezi simulovanými a měřenými údaji o SOC a výnosech plodin (obr. 4.6.6). Takto nastavený model byl posléze využit

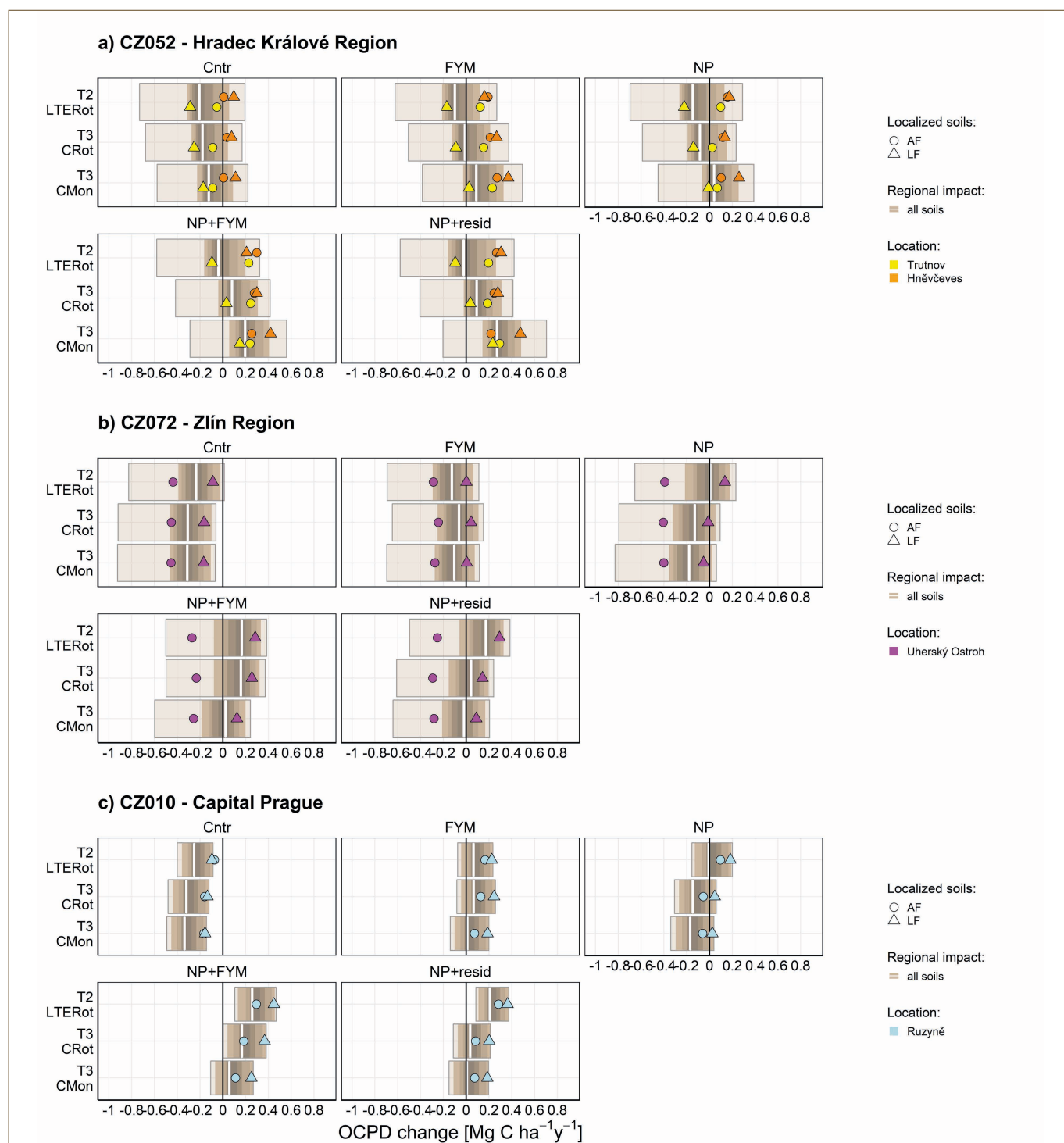
pro simulace v jednotlivých buňkách pomocí třech výše uvede-  
ných přístupů. Vliv eroze při simulacích nebyl uvažován.



Obr. 4.6.6: Simulované (čára) a měřené (body) hodnoty pro a) obsah půdního organického uhlíku ve vrstvě 0–25 cm, b) výnosy sušiny na nehnojených parcelách dlouhodobých polních pokusů.

Regionální vliv hnojení na změnu obsahu SOC v půdách prezentuje obr. 4.6.7. Ze simulací pravděpodobných osevních postupů (sledů) je patrné, že při absenci hnojení vede pěstování plodin k úbytku

zásoby půdního uhlíku nejčastěji v rozmezí 0,1 až 0,3 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>. Pouze u malé části půd královéhradeckého regionu je při nehnojení simulován mírný nárůst SOC, což je zřejmě vázáno na vlhčí oblasti.



Obr. 4.6.7: Výsledky simulací změn obsahu SOC (v t C.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>) pro půdy třech regionů a pět scénářů hnojení. Výsledky jsou prezentovány pro vyvážený osevní sled odvozený od dlouhodobých pokusů (LTERot), pro (pravděpodobné) aktuální osevní sledy v regionech (CRot) a pro monokultury hlavních plodin (CMon). Hnědé pruhy vyjadřují distribuci četnosti ve výpočetních buňkách 1x1 km (bílý proužek – průměr), značka pozici dlouhodobého pokusu v rámci variability půd regionu.

Hnojení pouze hnojem ve velké části případů zaručuje zachování aktuálního stavu obsahu půdního uhlíku, i když v Zlínském regionu i v tomto případě SOC ve většině půd ubýval. Z distribuce četnosti je patrné, že při hnojení bez aplikace statkových hnojiv nebo zaorávky slámy u většiny půd dochází k úbytku SOC na úrovni 0,1–0,2 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>, v ojedinělých případech až 0,6–0,8 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>.

Pozitivní bilance SOC byla v simulacích dosažena pouze pro kombinované hnojení (NP+FYM), kdy ve většině půd docházelo ke zvy-

šování SOC v průměru o 0,1 až 0,2 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>. Navyšování SOC je patrné i při minerálním hospodaření se zaorávkou slámy, zde je však nutné uvědomit si, že model EPIC má v tomto případě tendenci SOC nadhodnocovat oproti skutečnosti.

Studie měla za cíl poukázat na jeden z možných přístupů k predikci změn půdního uhlíku při různých scénářích využití půdy a změn klimatu. Z výsledků vyplývá, že bez aplikace statkových hnojiv, současné struktury pěstovaných plodin a převládající agrotechnice je

aktuální stav SOC u více než poloviny orných půd sledovaných regionů neudržitelný.

#### Dílčí závěr

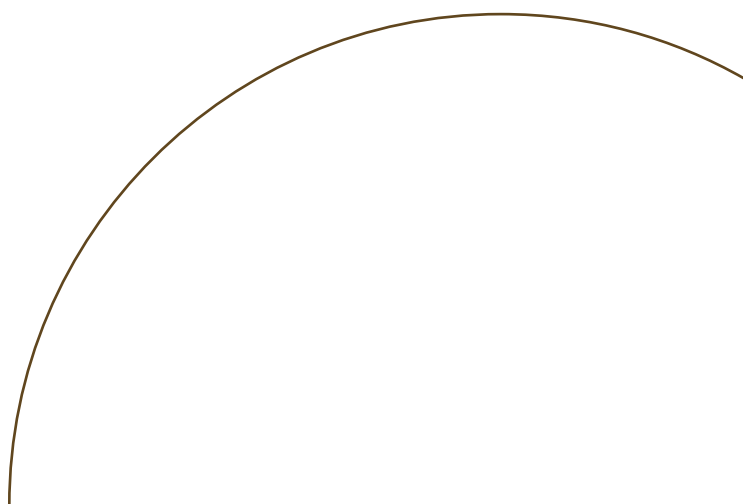
Regionální model EPIC predikoval ve srovnání s výchozí úrovní bez vstupu hnojiv změny uhlíku v půdě v rozmezí 0,1–0,5 t C.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>, což bylo v souladu s empirickými studiemi pro všechny dlouhodobé pokusy v těchto regionech. Nepřesné informace o půdních podmínkách, absence informací o vstupech hnojiv nebo nevhodná kalibrace modelu však mohou regionální modelování vlivu hospodaření na půdní uhlík značně narušit, protože každá z těchto tří složek přináší nejistotu odhadů na úrovni 0,5–1,5 t C.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>, což je podstatně vyšší než skutečný účinek hnojení nebo struk-

tury plodin. I přes svou citlivost na vstupní parametry jsme zjistili robustní škálovatelnost modelu pro různé klimatické oblasti a typy půd. Navržený postup přinesl lepší výsledky než metodika Tier 1/IPCC, což naznačuje velký potenciál pro zlepšení modelování změn uhlíku ve větších politických regionech.

V současné době je ve VÚRV v.v.i. vytvářena výpočetní infrastruktura, umožňující rozšíření modelu EPIC-IIASA pro všechny regiony ČR i pro simulace různých scénářů klimatického a agromického vývoje.

Rozšířené výsledky studií byly publikovány viz Madaras et al. (2017), Stehlík et al. (2020), Balkovič et al. (2020).





## 5 DISKUSE

V současných systémech hospodaření na zemědělské půdě je mnohdy negativním příznakem skutečnost, že i přes zabezpečení dostatku živin formou minerálních, popř. organických hnojiv dochází ke stagnaci výnosů a zhoršování půdních vlastností. Přitom se bohužel často zapomíná na generacemi zemědělců ověřené postupy, založené na pravidelné návratnosti dostatečného množství organických látek do půdy zejména ve formě kvalitních statkových hnojiv (hnůj, kejda), která přispívají k udržení půdní úrodnosti. Vyrovnaná půdní úrodnost je základním předpokladem pro zajištění trvale udržitelného zemědělství, resp. naplňování celosvětového konceptu „Soil Health – kvalita a zdraví půdy“ (koncept popisuje biologické, chemické a fyzikální funkce půdy, včetně jejich úlohy v udržitelné produkci plodin a dále potravin, kde zdravá půda je základním kamenem pro dosažení potravinové bezpečnosti a podporu environmentální udržitelnosti v současném zemědělství), jehož stěžejními znaky jsou vyvážený výživný režim (dostupnost vody a živin pro rostliny) a bilance organických látek v půdě.

V důsledku současných měnících se podmínek prostředí (probíhající změna klimatu) může dojít k významné změně v agroekosystémech a tyto změny se následně projeví v lidské společnosti i v krajině /přírodním prostředí včetně půdy, resp. v obsahu (zásobě) půdní organické hmoty /SOM/, ale i její kvalitě /humusové látky apod./ (IPCC 2014, Steenwerth et al. 2014, Srivastava et al. 2016, Naikwade 2019, Tiwari et al. 2023 aj.). Měníci se podmínky prostředí v různých částech světa (včetně Evropy) v současnosti vnášejí značnou neurčitost do variability prostředí v systému půda – rostlina – atmosféra (Olesen et al. 2011, Trnka et al. 2011, 2014, Blanco et al. 2017, Hasegawa et al. 2018, Wiebe et al. 2019, Malhi et al. 2021, Sünnemann et al. 2023). Proto musí být kladen velký důraz na zvyšování obsahu organické hmoty v půdě (Banwart et al. 2015, Gross and Glaser 2021, Begum et al. 2022, Tadiello et al. 2023), protože u většiny zemědělských půd dochází ke ztrátám zásob půdní organické hmoty (SOM). Ztráty obsahu SOM mají zásadní vliv na správné fungování půdy včetně kvality a zdraví půdy, pro zajišťování základních ekosystémových služeb (Lal 2004a, 2004b, 2020a, 2020b).

Výsledky dílčí studie (viz kap. 4.1) z dlouhodobých polních výživářských pokusů (RFE, VÚRV, v.v.i.) prokázaly, že aplikace sa-

motných minerálních hnojiv (varianta NPK) do půdy způsobuje pokles obsahu SOC v půdě /snížení o 0,1 % z období 1994–2003 do období 2014–2016/ (Menšík et al. 2018), naopak na Kontrole došlo ke zvýšení obsahu SOC (aplikací pouze minerálních hnojiv bez doplnění organických látek dochází k destabilizaci půdního prostředí, doprovázené významným snížením půdní úrodnosti /pokles pH i obsahů přístupných živin/. Dále tento trend byl zaznamenán v dlouhodobých pokusech v TTP v oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané), kde nejnižší obsah SOC byl stanoven ve variantách NPK, Digestát a zároveň byly zaznamenány i nejnižší hodnoty pH (KCl) ve variantě minerálního hnojení (NPK) statisticky významný rozdíl oproti Kontrole i variantám statkového /Hnůj, Kejda/ i organického /Digestát/ hnojení ve všech třech intenzitách využívání /4, 3, 2sečné/ viz kap. 4.3. Dále se tento jev projevil i v provozních pokusech v oblasti Malé Hané i Dražanské vrchoviny viz kap. 4.4 (ve shluhu polí P8,9 se významně vyčleňuje P8 /dlouhodobé hnojení hnojem/ od P9 /dlouhodobé hnojení pouze minerálními hnojivy se zapravením slámy a posklizňových zbytků/ v oblasti Dražanské vrchoviny, ke P8 má vyšší pH, vyšší obsah SOC, humusových látek, huminových kyselin, nižší barevný index a dále vyšší obsah přístupných živin oproti poli P9; a dále i ve shluhu polí P4,5 již je patrný významný rozdíl mezi P4 a P5 - projevil se vliv hnojení /hnůj – NPK/, objekty dále od sebe) viz kap. 4.4., obr. 4.4.3–4.4.6. Obdobné výsledky uvádí studie (Yang et al. 2003, Chen et al. 2010, Wang et al. 2018, Liang et al. 2023, Oelbermann et al. 2023, Balík et al. 2023), které poukazují na to, že hnojení pouze NPK je nedostatečné pro udržení obsahu SOC v podmínkách konvenčního hospodaření, protože se do půdy nevrací žádné posklizňové zbytky plodin, ale i kvalitních statkových hnojiv. Aplikací kombinací NPK a statkových hnojiv /hnůj, kejda/ (optimální hospodaření s organickými látkami) dochází ke zvyšování obsahu SOC v půdě. Tato skutečnost byla prokázána v pokusech RFE, VÚRV, v.v.i. ale i ve studii v dlouhodobých výživářských osevních pokusech VÚRV, v.v.i. v různých půdně klimatických podmínkách (stanoviště Ivanovice na Hané /ICRFE/, Čáslav /CCRFE/ a Lukavec /LCRFE/) založených v roce 1956 viz kap. 4.2. Tyto výsledky potvrzuje studie (Zhao et al. 2013) z obdobných přírodních podmínek (průměrná roční teplota vzduchu a srážky se pohybují v rozmezí 8–15 °C a 500–950 mm), kde modely i měření SOC ukázaly, že optimální zavlažování, redukováné hnojení minerálními hnojivy

a návrat posklizňových zbytků s aplikací statkových hnojiv je účinná strategie pro zlepšení obsahu a ukládání SOC v půdě. Velmi pozitivní vliv dlouhodobé aplikace statkových a organických hnojiv na sekvestraci SOC v půdě potvrzují i studie (Edmeades 2003, Liu et al. 2013, Chaudhary et al. 2017, Maltas et al. 2018, Vidyasagar 2018). Aplikací hnoje, resp. kejdy do půdy se zvyšuje úrodnost půdy, což přispívá k zajištění stabilní produkce a zabezpečení dostatku potravinových surovin pro budoucí generace i za současných měnících se podmínek prostředí (klimatická změna). Se zvyšujícím se obsahem SOC ( $C_{org}$ ) roste i obsah  $N_{tot}$ , což potvrzuje i lineární závislost mezi obsahy  $N_{tot}$  na  $C_{org}/SOC/$  (viz kap. 4.2, obr. 4.2.3). Dále je možné tuto závislost potvrdit i v dílčích studiích viz kap. 4.1 a 4.3, kde pomocí vícerozměrných metod PCA a FA byly zaznamenány vysoké korelace SOC ( $C_{org}$ ),  $N_{tot}$  s osou PC1, resp. Faktorem 1 viz obr. 4.1.2, 4.3.5 a 4.3.6. Obdobné výsledky zvyšování obsahu  $N_{tot}$  při dodávání kvalitní hovězí kejdy v kombinaci s NPK uvádí studie Maltas et al. (2018) ze Švýcarska z dlouhodobého experimentu založeného v roce 1976 na kambizemi, s dávkou hnoje  $35 \text{ t.ha}^{-1} + N \text{ } 125 \text{ kg.ha}^{-1}$ ,  $P \text{ } 22 \text{ kg.ha}^{-1}$ ,  $66 \text{ K kg.ha}^{-1}$ . Výsledky studie Maltas et al. (2018) také ukazují, že hnojení N významně snižuje dostupný obsah Mg v půdě, kde hnojení dusíkem pravděpodobně zvýšilo odběr Mg z půdy v důsledku vyššího výnosu plodin (Sinaj et al. 2009). Toto v naší studii z VOP pokusů (Čáslav, Lukavec, Ivanovice na Hané) ale prokázáno nebylo, naopak, obsah hořčíku se vlivem N hnojení v půdě zvyšoval (viz kap. 4.2, obr. 4.2.7).

Ve variantách hnojených minerálními a organickými hnojivy (FYM, CS, CS+St) v dlouhodobých polních výživářských pokusech (RFE, VÚRV, v.v.i.) je vyšší zastoupení HK a tím i příznivější poměr HK/FK (vyšší než 1) oproti variantám NPK a Kontrola (viz kap. 4.1). To bylo dále potvrzeno pomocí faktorové analýzy /FA/ i v provozních podmínkách v oblasti Malé Hané i Drahanické vrchoviny na experimentálních polích, na kterých se aplikoval hnůj (viz obr. 4.4.4 a tab. 4.4.2, kde Faktor 2 popisuje jednoznačně stav půdy z pohledu HK, HL a vyšší obsah byl vždy na polích, kde se aplikoval hnůj). Tyto výsledky potvrzuje i studie (Song et al. 2014), kde vyšší zastoupení HK bylo právě v hnojených variantách kombinací organických a minerálních hnojiv. Naše výsledky jsou plně v souladu s tvrzením, že dlouhodobé hnojení s hnojem zvyšuje sekvestraci uhlíku v HL, resp. HK (Song et al. 2014). Stupeň humifikace (SH) charakterizuje relativní podíl obsahu HL na SOC, a tento index umožňuje charakterizovat vznik SOM (Orlov et al. 2004). Nižší SH byl zjištěn ve variantách hnojených FYM, CS, CS+St. Humifikace probíhá pomaleji a rozkladné produkty jsou více zabudovávány do stabilních HL, resp. HK (Swift 1999, 2001, Wang et al. 2015a, 2015b, Hayes and Swift 2020). Podobné výsledky uvádí Pospíšilová et al. (2012) na orné půdě a pod travním porostem (SH od 16 do 21 %) na kambizemi modální, resp. na orné půdě s černozemí modální 42 % SH. Poměr  $Q_{4/6}$  je standardně používán pro hodnocení kvality HL v půdě (Chen et al. 1977). Vyšší hodnoty než 4 indikují vyšší množství alifatických skupin v molekule HK, nižší počet aromatických skupin a nižší SH (Senesi et al. 2007). To potvrzují i výsledky poměru  $Q_{4/6}$ . Vyšší SH a vyšší poměr  $Q_{4/6}$  byl prokázán ve variantě NPK, což na základě výsledků multikriteriálního hodnocení pomocí PCA (výrazné vyčlenění varianty NPK v rozptylovém diagramu komponentního skóre PC1xPC2, resp. PC1xPC3) a dále dle analýzy FA i CLU signalizuje, že začíná

probíhat i proces mineralizace viz kap. 4.1, obr. 4.1.2, 4.1.3. Ve variantě NPK došlo k výraznému snížení půdní reakce (vyšší acidita půdy) i snížení obsahu přístupných živin P, K, Mg oproti variantám s minerálními a organickými hnojivy.

Výsledky získané v období 2008–2018 v provozních podmínkách zemědělských podniků (farem) na 68 lokalitách (experimentálních polích) v České republice viz kap. 4.5. na půdních typech černozem, hnědozem, luvizem, kambizem, fluvizem a dalších prokázaly, že aplikací statkových hnojiv (hnůj /FYM/) udržujeme, resp. zvyšujeme obsah SOC i CHWS (labilní forma uhlíku) viz modely Rozdíl obsahu HVEC (období 2016–2018) a Závislost rozdílu SOC mezi roky 2018 a 2008. Naše výsledky jsou v souladu s obdobnými studiemi zaměřenými na vliv statkových hnojiv na kvalitu půdy (obsah SOC, resp. SOM), prováděnými v rámci řady zemí celého světa (Liu et al. 2013, Meena and Sharma 2016, Maltas et al. 2018, Naikwade 2019 aj.). Několik dlouhodobých experimentů v Evropě ukázalo, že rychlost sekvestrace SOC je vyšší při aplikaci statkových hnojiv /hnůj/ (Körschens and Müller 1996, Körschens et al. 2013, 2014). Nárůst cca 10 % SOC (v hloubce 0–30 cm) vlivem dlouhodobé aplikace hnoje ve srovnání s minerálními hnojivy byl zaznamenán v horizontu více než 100 let v Dánsku (Christensen 1996), o 22 % za 90 let v Německu (Körschens and Müller 1996) a o 100 % za 144 let ve Rothamstedu ve Velké Británii (Jenkinson et al. 1991). Autoři Smith et al. (1997) odhadují, že aplikací hnoje ve výši cca  $10 \text{ t.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$  na ornou půdu by se v Evropě zvýšila zásoba SOC o 5,5 % za 100 let. V modelech bilance organické hmoty je v současnosti rovněž řešena problematika aplikace organického hnojiva digestát do půdy (v ČR je digestát považován za organické hnojivo) ve vztahu k obsahu SOM. Výsledkem s dosažením jeho pozitivního vlivu je docílen pouze za předpokladu, že se dále aplikuje dostatečné množství statkových hnojiv (hnůj). V případě, že se digestát aplikuje bez současného zapravení dalších organických hnojiv a látek v posklizňových zbytcích nebo jen ve velmi malých dávkách, pak obsah humusu v půdě výrazně klesá (viz kap. 4.5, obr. 4.5.8, Závislost rozdílu SOC mezi roky 2018 a 2008), kdy digestát byl z modelu odebrán v předposledním kroku – nesignifikantní proměnná, a následně tento výsledek potvrdil i zpřesněný model viz tab. 4.5.3. Digestáty obsahují méně organického C než statková a organická hnojiva (Möller and Müller 2012, Möller 2015). Tyto výsledky prokazuje i dílčí studie v TTP (viz kap. 4.4), kde byl prokázán pokles obsahu SOC (TTP mají obecně vyšší obsahy SOC, resp. SOM v porovnání s ornou půdou), celkového dusíku i přístupných živin v půdě ve variantě organického hnojení Digestát (3, 2sečná intenzita využívání) viz kap. 4.4. Dlouhodobé polní experimenty zatím neprokázaly žádný negativní dopad aplikace digestátu na obsah SOC ve srovnání s aplikací statkových hnojiv /hnůj, kejda/ (Thomsen et al. 2013, Barlóg et al. 2020) a jeho dlouhodobé působení v půdě a dopady na životní prostředí, resp. lidské zdraví je třeba ještě důkladně prozkoumat (Nkoa 2014, Barlóg et al. 2020). Udržení příznivě vysoké úrovně obsahu SOC při dlouhotrvající aplikaci digestátu vyžaduje dodání dalších zdrojů organického C, který by měl pocházet z posklizňových zbytků včetně slámy (Tiwari et al. 2000).

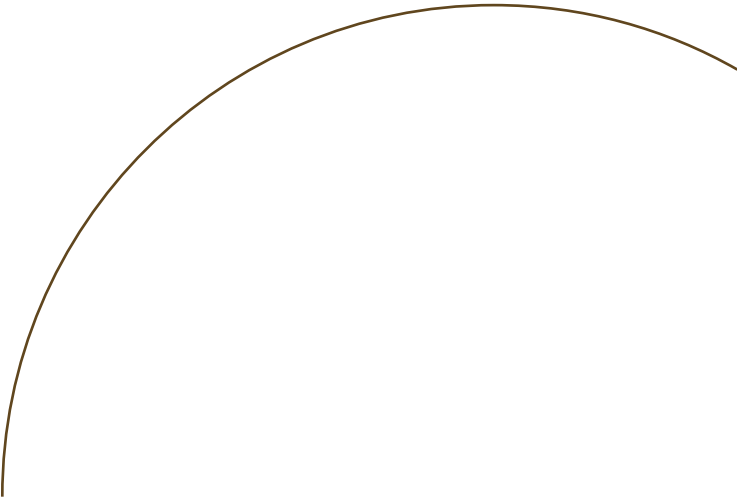
Zpracované vícerozměrné regresní modely závislosti vývoje obsahu stabilních a labilních forem uhlíku (SOC, HVEC) polních podmínkách objasňují základní vlastnosti prostředí půdy s vli-

vem na vývoj obsahu SOM. Přínos studie spočívá ve vyhodnocení provozních podmínek zemědělských podniků v reálném prostředí, s vyhodnocením půdního prostředí i agrotechnických procesů (postupů). Důležitost hnojení hnojiv s vysokým podílem organické hmoty, a to především statkovými hnojivy živočišného původu (hnůj), se ukázala jako velmi významná (Voltr et al. 2021). Pro kalkulaci pohybu humusu v půdě je možno zohlednit i podmínky fyzikálních vlastností půdy, jako je obsah zrnitosti do 0,01mm, resp. do 2 mm a pH půdy, spolu s hloubkou půdy. Podobné výsledky modelů pro regionální podmínky ČR jsou uvedeny v kap. 4.6. Z predikcí uvedených v těchto modelech je možné poukázat na to, že za pomoci dostatečně velkého přísunu živin lze i v podmínkách měnícího se klimatu postupně dosáhnout sekvestrace C v řádu max. do 40 % původního obsahu, přičemž se již po několika dekádách ustanoví nový rovnovážný stav. Simulace dále ukazují, že uhlík lze v půdě zvyšovat i bez statkových/organických hnojiv, avšak při nepříznivých podmínkách může dojít k jeho poměrně rychlému uvolnění (ztrátě). Úroveň obsahu půdní organické hmoty je při hospodaření s aplikací kvalitních statkových hnojiv (hnůj, kejda) jednoznačně méně ovlivněna klimatickými změnami a agroekosystém je tedy výrazně stabilnější. Obdobné výsledky zaměřené na modelování SOM, resp. SOC uvádí i řada jiných studií (Brock et al. 2012, Campbell and Paustian 2015, Hábová et al. 2019, Begum et al. 2022, Oelbermann et al. 2023 aj.), kde

je jednoznačně konstatováno, že zvyšování obsahu SOM (sekvestrace C) v půdě je možné jen za použití kvalitních statkových hnojiv /hnůj/ (Gross and Glaser 2021).

Význam modelů spočívá především v zohlednění možného vývoje obsahu SOM v půdních podmínkách jednotlivých oblastí ČR i v závislosti na managementu (obhospodařování) půdy /hnojení půdy, přívod organického hnojiva, zpracování půdy, osevní postupy apod./ (Madaras et al. 2017, Hábová et al. 2019, Stehlík et al. 2020, Balkovič et al. 2020, Voltr et al. 2021 aj.).

Na základě výsledků viz kap. 4 můžeme konstatovat, že pro budoucnost je naprosto rozhodující udržet, resp. zvyšovat obsah SOM v zemědělských půdách (udržení, resp. zvýšení úrodnosti půdy), protože SOM má rozsáhlý pozitivní účinek na široké množství půdních vlastností. Půdu jako nedílnou součást ekosystému musíme chránit a zároveň monitorovat její kvalitu (kvalita a zdraví půdy "*Soil Health*" je rozhodující pro zajištění potravinové bezpečnosti, dále je na ní závislé lidské zdraví a udržitelnost celých ekosystémů), protože hraje klíčovou roli v produkci plodin a potravin (Rojas et al. 2016, Lal 2016a, 2016b, 2020b, 2020a, Lorenz and Lal 2018, Chiranjeeb et al. 2020, Lehmann et al. 2020, Rayne and Aula 2020, Toor et al. 2021, Cárceles Rodríguez et al. 2022, Ampong et al. 2022, Li et al. 2023, Vanlauwe et al. 2023, Mahmood et al. 2023).



## 6 DOPORUČENÍ PRO PRAXI

Dostatečné množství a kvalita půdní organické hmoty (SOM) mají zásadní význam v suchozemských ekosystémech, a především v agroekosystémech. SOM plní důležité produkční i mimo-produkční funkce. Je velmi důležitá při udržování a zlepšování fyzikálních, chemických, biochemických a biologických vlastností půdy. Proto je udržení, resp. zvýšení obsahu SOM zvláště významné pro udržení produktivity agroekosystémů a pro budoucí udržení potravinové bezpečnosti a soběstačnosti. Na základě uvedených a popsáných skutečností a výsledků výzkumu spojených s péčí o obsah a kvalitu půdní organické hmoty (zvyšování adaptačního potenciálu půdy v současných měnících se podmínkách prostředí) lze jednoznačně doporučit:

- na orných půdách zajistit trvalý přísun organických látek (potřeba cca 4,0–4,5 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>, z toho cca 60 % je uhrazeno posklizňovými zbytky, cca 40 % je vhodné dodat statkovými hnojivy /hnůj, kejda/ pocházejícími ze živočišné výroby, popř. organickými hnojivy /kompost, resp. lze uvést i organické hnojivo digestát, byť zatím není exaktně doložen dlouhodobý vliv na obsah a kvalitu SOM/) pro dosažení vyrovnané, resp. kladné bilance organických látek v půdě;
- pravidelně hnojit statkovými hnojivy (hnůj, kejda), organickými hnojivy (kompost) a posklizňovými zbytky v dostatečných dávkách, druhy hnojiv dle možností diverzifikovat, hnojiva rovnoměrně zapravovat do profilu ornice;
- **hnojení statkovými hnojivy** (hnůj, kejda /prasat, skotu/ i v kombinaci s NPK): při dlouhodobé aplikaci je **vždy potvrzena vyšší kvalita humusu** (nižší kyselost půdy, vyšší obsah organického uhlíku a humusových látek, převládají huminové kyseliny, příznivý poměr HK/FK- vyšší než 1, střední až vyšší stupeň humifikace, vysoký obsah přístupných živin- fosfor, draslík, hořčík v půdě) viz studie Menšík et al. (2018, 2019); Menšík, Nerušil 2019; Menšík et al. (2020a,c); Menšík et al. (2022a,b); Menšík et al. (2023a,b);
- na základě výsledků dlouhodobých polních pokusů VÚRV, v.v.i. (Ružyně, Čáslav, Lukavec, Ivanovice na Hané, Trunov, Hněvčevy a další), **ověřovacích provozních pokusů se zemědělskou praxí** (Malá Haná, Dražanská vrchovina apod.) a dostupných literárních zdrojů jednoznačně vyplývá, že **pro udržení současné půdní úrodnosti je nezbytné aplikovat cca 35–40 t.ha<sup>-1</sup> statkových hnojiv (chlévkový hnůj, popř. kejda) jednou za 4 roky;**
- zvýšit zastoupení víceletých pícnin (zejména jetelovin /

vojtěška, jetel apod.) v osevních postupech Menšík et al. (2020a);

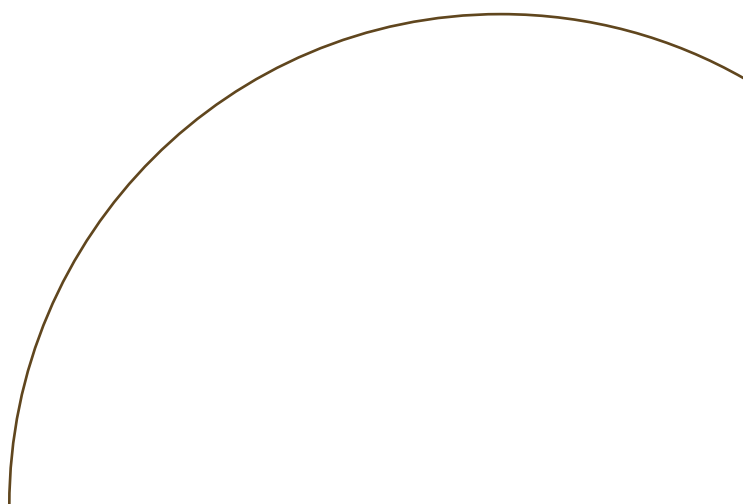
- **zařazovat meziplodiny do osevního postupu, a to jako dalšího zdroje organické hmoty (biomasy) do půdy, tak i pro jejich půdoochrannou funkci;**
- dodržovat vyvážený osevní postup a agronomické technologie;
- sledovat celkový obsah uhlíku a dusíku, kvality humusových látek (HL, HK, FK apod.) a půdní reakce;
- omezit dlouhodobou aplikaci minerálních hnojiv NPK bez vstupů organických látek, která urychluje mineralizaci humusu a degradaci kvality půdy se všemi negativními důsledky /vyplavování dusíku, vyšší dostupnost toxických prvků pro rostliny, nedostatečný přísun látek pro půdní mikroorganismy apod./, ale i hnojení minerálními hnojivy NPK v kombinaci se zaorávkou slámy (Sláma+NPK), u které se vždy potvrzuje nižší kvalita humusu /vyšší kyselost půdy, nižší obsah organického uhlíku a humusových látek, převládají fulvokyseliny, nepříznivý poměr HK/FK- nižší než 1, vyšší stupeň humifikace, nižší obsah přístupných živin- fosfor, draslík, hořčík apod./- viz studie Menšík et al. (2018); Menšík et al. (2023b);
- využívat modely a vícerozměrné statistické metody pro komplexní hodnocení a interpretaci dat o fyzikálně-chemických vlastnostech půdy (pH, SOM /SOC, frakcionace humusových látek/, živiny, rizikové prvky apod.) ve vztahu k hospodaření (hnojení, management apod.) jako např. analýza hlavních komponent /PCA/, faktorová analýza /FA/, ale i jedno a vícerozměrné lineární regrese (výstavba regresního modelu regresním tripletem) a dále i doplňkově aplikovat analýzu shluků /CLU/.

V současné době, i přes probíhající výzkum, nejsou k dispozici exaktní predikce budoucího vývoje obsahu organického uhlíku (C) v půdě. Publikované práce (např. Madaras et al. 2017; Stehlík et al. 2020; Balkovič et al. 2020) poukazují na to, že za pomoci dostatečně velkého přísunu živin lze i v podmínkách měnícího se klimatu postupně dosáhnout sekvestrace C v řádu max. do 40 % původního obsahu, avšak již po několika dekádách se ustaví nový rovnovážný stav. Simulace ukazují, že uhlík lze v půdě zvyšovat i bez statkových/organických hnojiv, avšak při nepříznivých podmínkách může dojít k jeho poměrně rych-



lému uvolnění (ztrátě). Úroveň obsahu půdní organické hmoty je při hospodaření s aplikací kvalitních statkových hnojiv (hnůj, kejda) jednoznačně méně ovlivněna klimatickými změnami a agroekosystém je tedy významně stabilnější. Nárůst teplot

během klimatické změny bude znamenat vyšší intenzitu mikrobiální činnosti ve vlhkých periodách počasí, tím i rychlejší mineralizaci, snížení sekvestrační kapacity půd s nižším obsahem C a mineralizaci zásob C u půd s vyšším obsahem C.



## SOUHRN

Monografie předkládá dílčí výsledky výzkumného záměru „Kvalita půdy a biodiverzita půdních mikroorganismů v kontextu měnícího se klimatu“, řešeného na pracovišti VÚRV, v.v.i. v letech 2023–2027. Výzkumný záměr je finančně podpořen MZe ČR.

V moderním zemědělství je úrodnost půdy důležitým faktorem významně ovlivňujícím přírodní podmínky růstu rostlin (např. dostupnost vody, vzduchu a živin v průběhu vegetačního období) a zabezpečuje jejich úrodu (produkci). V současném vědeckém pojetí je úrodnost půdy určena celým komplexem fyzikálních, biologických a chemických charakteristik půdy v návaznosti na půdní typ, přírodní podmínky a způsob hospodaření. Zejména obsah půdní organické hmoty (SOM), resp. obsah půdního organického uhlíku (SOC), jsou klíčovými atributy kvality/zdraví půdy úrodnosti půdy v agroekosystémech. Významný vliv na obsah a kvalitu SOM má způsob hospodaření, hnojení, struktura plodin, oseední postupy, zpracování půdy, zavlažování apod. Pokud uvedené postupy nejsou správně v zemědělské praxi nastaveny (viz kap. 1. Úvod, odst. zhoršení kvality přírodních zdrojů v České republice), pak hospodaření není trvale udržitelné a představuje rizika jak půdy, tak pro výši produkce plodin, které je dále umocněno změnou klimatu. Dopady těchto negativních jevů (postupů hospodaření) se projevují postupným snižováním obsahu SOM, resp. SOC včetně snížení kvality SOM, což následně vede ke zhoršování fyzikálních, chemických i biologických vlastností půdy, poklesu produkční schopnosti a k degradaci i devastaci půdy a krajiny.

Cílem zpracované souhrnné monografie, která je členěna do jednotlivých příkladových studií (angl. „case study“) řešených v různých půdně-klimatických podmínkách ČR, je vyhodnotit vliv hnojení statkovými hnojivy (hnůj, kejda) a ostatními hnojivy (minerální a organické hnojení) na kvantitativní a kvalitativní parametry zemědělských půd v současných měnících se podmínkách prostředí zemědělské výroby v České republice.

V každé příkladové studii je kladen důraz na hodnocení výsledků pomocí moderních statistických metod zaměřených na vícerozměrné statistické analýzy (analýza hlavních komponent, faktorová analýza aj.), ale i techniky regresního modelování (jednorozměrné a vícerozměrné lineární regresní modely apod.).

Výsledky dílčích studií (např. dlouhodobé polní experimenty, poloprovozní a provozní výzkumné plochy, modelování dlouhodobých časových řad apod.) z různých půdně-klimatických podmínek ČR (Praha, Čáslav, Lukavec, Ivanovice na Hané, Jevíčko apod.) jednoznačně potvrdily, že:

- aplikace pouze minerálních hnojiv (NPK) výrazně urychluje mineralizaci humusu a způsobuje degradaci půdy se všemi negativními důsledky: okyselování, vyplavování dusíku, vyšší dostupnost toxických prvků pro rostliny, pomalá energie pro půdní mikroorganismy apod.;
- dlouhodobá aplikace statkových hnojiv (hnůj, kejda) samotných nebo v kombinaci s minerálními hnojivy (NPK, resp. N) doplňuje zásoby SOM a udržuje půdu v optimální kvalitě, přispívá k zachování úrodnosti půdy a stabilizuje produkci z pohledu kvantity a kvality, zároveň zvyšuje adaptační potenciál současné půdy s ohledem na měnící se podmínky prostředí (předpokládané účinky probíhající globální klimatické změny);
- aplikací statkových hnojiv (hnůj /FYM/) udržujeme, resp. zvyšujeme obsah SOC i HWEK /uhlík rozpuštěný v horké vodě, labilní forma C/ (digestát má na obsah SOC pozitivní vliv pouze v případě aplikace dostatečného množství organické hmoty ve formě statkových hnojiv /FYM/), v případě, že se organické hmoty ve formě statkových hnojiv /FYM/ aplikuje málo, obsah humusu výrazně klesá viz kap. 4.5 (Tvorba organické hmoty v půdě v závislosti na vlastnostech půdy a aplikaci různých hnojiv v 10letém provozním pokusu);
- simulace SOM pomocí validovaných modelů naznačují, že uhlík lze v půdě zvyšovat i bez statkových/organických hnojiv, avšak při nepříznivých podmínkách může dojít k jeho poměrně rychlému uvolnění (ztrátě), úroveň obsahu SOM je při hospodaření s aplikací kvalitních statkových hnojiv (hnůj, kejda) jednoznačně méně ovlivněna klimatickými změnami, je tedy významně stabilnější;
- nárůst teplot během klimatické změny bude znamenat vyšší intenzitu mikrobiální činnosti ve vlhkých periodách počasí, tím i rychlejší mineralizaci, snížení sekvestrační kapacity půd s nižším obsahem C a mineralizaci zásob C u půd s vyšším obsahem C;
- vícerozměrné statistické metody – analýza hlavních komponent /PCA/, faktorová analýza /FA/, ale i jedno a vícerozměrné lineární regrese (výstavba regresního modelu regresním

tripletem) jsou užitečné a významné metody pro modelování, zobrazení, hodnocení a interpretaci dat o fyzikálně-chemických vlastnostech půdy.

Potvrdily se předpoklady o pozitivním vlivu hnojení statkovými hnojivy (hnůj, kejda) na stav a kvalitu půdy (udržení, resp. zvýšení půdní úrodnosti) při současném zemědělském hospodaření v zájmových oblastech, ale i na ostatních územích s podobnými přírodními poměry ve smyslu udržitelného obhospodařování zemědělské půdy v podmínkách ČR, potažmo střední a východní Evropy, jako předpokladu udržitelnosti a hospodářské jistoty současné zemědělské výroby v důsledku GKZ.

Přínos monografie je dán obsáhlým souborem dlouhodobých naměřených dat a jejich statistickým vyhodnocením a modelováním. Dále jsou na základě získaných poznatků dána doporučení pro zemědělské hospodaření v ČR ve smyslu udržitelného obhospodařování zemědělské půdy s organickou hmotou v zemědělské krajině se zaměřením na vliv hnojení v dlouhodobém horizontu ve vztahu ke kvalitě a zdraví půdy („Soil Health“) podrobně (viz kap. 6. Doporučení pro praxi), ale i ve vztahu k potravinovému zabezpečení (výnosy, kvalita potravin) a zvyšování adaptačního potenciálu půdy na předpokládané účinky klimatické změny.

Budoucím cílem trvale udržitelných systémů obhospodařování musí být soustavné zvyšování obsahu SOM v zemědělských půdách vedoucí ke zlepšení úrodnosti půdy, nebo alespoň agronomická opatření vedoucí ke stabilizaci současného stavu, protože SOM příznivě ovlivňuje řadu vlastností půdy, včetně jejich schopnosti zadržovat vodu a živiny, zlepšuje strukturu, podporuje účinné provzdušňování a minimalizuje ztráty ornice erozí (Reeves 1997; Robertson et al. 2014). V komplexně pojatém výzkumu bylo v souladu s dalšími vědeckými studiemi prokázáno, že biogeochemie půdní organické hmoty (SOM) /studium dynamických procesů apod./ má zásadní význam pro správné fungování ekosystémů /přirozených, polopřirozených, umělých/ (Lorenz and Lal 2018; Ondrasek et al. 2019; Wang et al. 2019; Rayne and Aula 2020; Lin et al. 2021; Masoudi et al. 2023) v současném měnícím se klimatu.

## SUMMARY

The monograph presents partial results of the research project „Soil Quality and Biodiversity of Soil Microorganisms in the Context of Climate Change“ conducted at CRI in the years 2023-2027. The research project is financially supported by the Ministry of Agriculture of the Czech Republic.

In modern agriculture, soil fertility is a crucial factor that significantly influences plant growth conditions, such as the availability of water, air, and nutrients during the growing season, and ensures their yield (production). According to current scientific understanding (knowledge), soil fertility is determined by the complex interplay of physical, biological, and chemical soil properties such as soil type, natural and climatic conditions, and management practices. In particular, soil organic matter (SOM) and soil organic carbon (SOC) content are crucial indicators of soil fertility and health in agroecosystems. Management practices, fertilization, cropping patterns, tillage, and

irrigation significantly influence the content and quality of soil organic matter (SOM). If these practices are not properly implemented in agricultural operations (Chapter 1, Introduction, paragraph on Deterioration of the quality of natural resources in the Czech Republic), then agriculture is not sustainable and poses a risk to both the soil and the level of crop production, which is further worsened by climate change. The negative effects of these agricultural practices are evident in the gradual decrease in soil organic matter (SOM) or soil organic carbon (SOC) content, as well as a decline in SOM quality. This, in turn, results in the deterioration of the soil's physical, chemical, and biological properties, a decrease in its productivity, and the degradation and destruction of the soil and landscape.

This comprehensive monograph is divided into individual case studies in various soil-climatic conditions of the Czech Republic. Its aim was to assess the impact of fertilization with manure and other fertilizers (both mineral and organic) on the quantitative and qualitative parameters of agricultural soils in the evolving environmental conditions of agricultural production in the Czech Republic.

In each case study, emphasis is placed on evaluating results using modern statistical methods, with a focus on multivariate statistical analysis (such as principal component analysis, factor analysis) and regression modelling techniques (including univariate and multivariate linear regression models).

The results of partial studies (e.g., long-term field experiments, semi-operational and operational research plots, long-term time series modelling, etc.) from various soil-climatic conditions in the Czech Republic (such as Prague, Čáslav, Lukavec, Ivanovice na Hané, Jevíčko, etc.) showed the following conclusions:

- the single long-term application of mineral fertilizers (NPK) significantly accelerates the mineralization processes and leads to soil degradation with all its negative consequences: acidification, leaching of nitrogen, increased availability of toxic elements for plants, and slow energy for soil microorganisms, etc;
- the single long-term application of manure (dung, slurry) or its combination with mineral fertilizers (NPK or N) replenishes soil organic matter (SOM) stocks and maintains soil quality at optimum levels. This practice contributes to sustaining soil fertility, stabilizing production in terms of quantity and quality, and increasing the adaptive potential of the soil to changing environmental conditions, including the expected effects of ongoing global climate change);
- the application of farmyard manure (FYM) helps maintain or increase the soil organic carbon (SOC) and hot water extractable carbon (HWEC) content of the soil. The application of digestate only affects the soil organic carbon (SOC) content if a sufficient amount of organic matter in the form of farmyard manure (FYM) is applied to the soil. If an insufficient amount of soil organic carbon (SOC) in the form of farmyard manure (FYM) is applied to the soil, the organic carbon content decreases significantly. This is discussed in section 4.5, „Formation of soil organic matter in relation to soil properties and application of different fertilisers in a 10-year field trial).

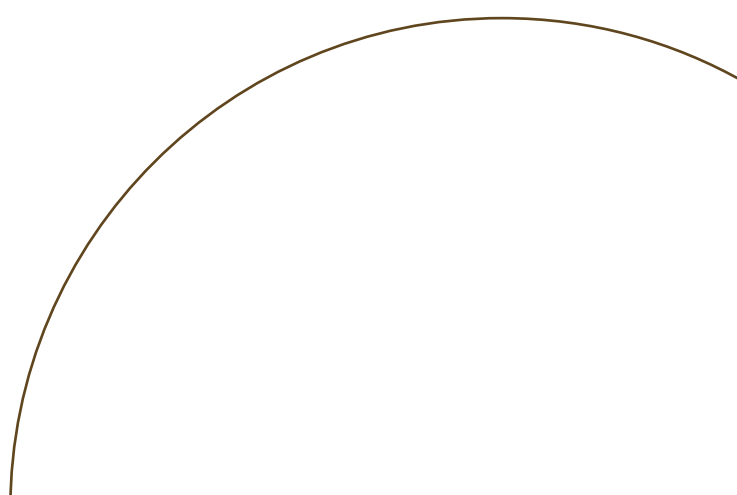
- SOM simulations using validated models demonstrate that soil carbon levels can increase even without the use of manure or organic fertilizers. However, under unfavourable conditions, the carbon can be released (lost) relatively quickly. The level of SOM is significantly less affected by climate change when managed with high-quality fertilizers such as manure and slurry, making it significantly more stable.
- an increase in temperature during climate change will result in higher microbial activity during wet weather periods, leading to faster mineralization. This will reduce the carbon sequestration capacity of low-carbon soils and result in the mineralization of carbon stocks in high-carbon soils.
- multivariate statistical methods such as Principal Component Analysis (PCA), Factor Analysis (FA), and univariate and multivariate linear regression (building a regression model by regression triplet) are valuable and essential for modelling, presenting, evaluating, and interpreting data on soil physico-chemical properties.

The study confirmed the assumptions about the positive impact of fertilization with manure (solid or liquid) on soil condition and quality, leading to the maintenance or enhancement of soil fertility. This finding applies not only to the study areas but also to other regions with similar natural conditions, emphasizing the importance of sustainable agricultural land management in the Czech Republic and Central and Eastern Europe. This is crucial for ensuring the sustainability and economic stability of current agricultural production as indicated by global climate change.

The significance of the monograph lies in its comprehensive collection of long-term measured data, as well as their statistical evaluation and modelling. Furthermore, based on the results, recommendations are provided for agricultural management in the Czech Republic to promote sustainable management of agricultural land with a focus on organic matter in agricultural landscapes. The recommendations emphasize the long-term effects of fertilization on soil quality and soil health (see Chapter 6, Recommendations for practice), but also on enhancing the soil's adaptive capacity to anticipated climate change impacts, thereby contributing to food security.

The ultimate objective of sustainable management systems should be to continually enhance the SOM content of agricultural soils, thereby improving soil fertility. Alternatively, agonomic measures can be implemented to stabilize the current situation. The SOM has a positive impact on various soil properties, such as water and nutrient retention, structural improvement, efficient aeration promotion, and reduction of topsoil loss through erosion (Reeves 1997; Robertson et al. 2014). Consistent with other scientific studies, comprehensive research has demonstrated the essential role of soil organic matter (SOM) biogeochemistry in the dynamic processes and proper functioning of natural, semi-natural, and artificial ecosystems (Lorenz and Lal 2018; Ondrasek et al. 2019; Wang et al. 2019; Rayne and Aula 2020; Lin et al. 2021; Masoudi et al. 2023) in the face of the current changing climate.





## POUŽITÁ LITERATURA

### Kapitola 1

- Agovino, M., M. Casaccia, M. Ciommi, M. Ferrara, and K. Marchesano. 2019. Agriculture, climate change and sustainability: The case of EU-28. *Ecological Indicators* 105 (October 1, 2019):525–543.
- Approaches, A. 2019. Agroecological Approaches to Sustainable Intensification. *Sustainable Food and Agriculture* (2019):179–184.
- Balasundram, S. K., R. R. Shamshiri, S. Sridhara, and N. Rizan. 2023. The Role of Digital Agriculture in Mitigating Climate Change and Ensuring Food Security: An Overview. *Sustainability* 15(6):5325.
- Balík, J., P. Suran, O. Sedlář, J. Černý, M. Kulhánek, S. Procházková, D. A. Asrade, and M. Smatanová. 2023. Long-Term Application of Manure and Different Mineral Fertilization in Relation to the Soil Organic Matter Quality of Luvisols. *Agronomy* 13(11):2678.
- Bispo, D. F. A., M. L. N. Silva, L. M. H. Pontes, D. V. Guimarães, J. J. G. De Sá E Melo Marques, and N. Curi. 2017. Soil, water, nutrients and soil organic matter losses by water erosion as a function of soil management in the Poses sub-watershed, Extrema, Minas Gerais, Brazil. *Semina: Ciências Agrárias* 38(4):1813–1824.
- Cárceles Rodríguez, B., V. H. Durán-Zuazo, M. Soriano Rodríguez, I. F. García-Tejero, B. Gálvez Ruiz, and S. Cuadros Tavira. 2022. Conservation Agriculture as a Sustainable System for Soil Health: A Review. *Soil Systems* 6(4):1–37.
- Chang, J., P. Havlík, D. Leclère, W. de Vries, H. Valin, A. Deppermann, T. Hasegawa, and M. Obersteiner. 2021. Reconciling regional nitrogen boundaries with global food security. *Nature Food* 2(9):700–711.
- Chen, X., H. Y. H. Chen, C. Chen, Z. Ma, E. B. Searle, Z. Yu, and Z. Huang. 2020. Effects of plant diversity on soil carbon in diverse ecosystems: a global meta-analysis. *Biological Reviews* 95(1):167–183.
- Chiranjeeb, K., N. Mahawar, S. Dhegavath, J. S. Bamboriya, G. R. Mali, T. Rupesh, S. S. Siddhartha Naik, and V. K. Meena. 2020. Soil Health: A Better Sustainable option for Nation's Food Security. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 2020(Special Issue 11):3380–3392.
- CZSO. 2023. *Statistická ročenka České republiky 2023* /Statistical Yearbook of the Czech Republic/. Praha: Český statistický úřad /Czech Statistical Office/.
- Doran, J. W. 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88(2):119–127.
- Duchoň, F. 1948. *Výživa a hnojení kulturních rostlin zemědělských*. Praha: Československá akademie zemědělská.
- FAO. 2017. *The future of food and agriculture*. Rome: Trends and Changes. <https://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf> (2017).
- Fears, R., V. ter Meulen, and J. von Braun. 2019, December 13. Global food and nutrition security needs more and new science. *American Association for the Advancement of Science*.
- Garnett, T., B. Burlingame, S. J. Vermeulen, I. J. Bateman, D. Fraser, M. Dawkins, P. Smith, T. Garnett, H. C. J. J. Godfray, C. Toulmin, P. Bloomer, I. Hoffmann, M. C. Appleby, M. Herrero, P. K. Thornton, A. Balmford, T. G. Benton, L. Dolan, I. J. Bateman, T. G. Benton, P. Bloomer, B. Burlingame, M. Dawkins, L. Dolan, D. Fraser, M. Herrero, I. Hoffmann, P. Smith, P. K. Thornton, C. Toulmin, S. J. Vermeulen, and H. C. J. J. Godfray. 2013. Sustainable Intensification in Agriculture: Premises and Policies. *Science* 341(6141):33–34.
- Godfray, H. C. J., J. R. Beddington, I. R. Crute, L. Haddad, D. Lawrence, J. F. Muir, J. Pretty, S. Robinson, S. M. Thomas, and C. Toulmin. 2010. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science* 327(5967):812–818.
- Hadley, K., S. Wheat, H. H. Rogers, A. Balakumar, D. Gonzales-Pacheco, S. S. Davis, H. Linstadt, T. Cushing, L. H. Ziska, C. Piper, and C. Sorensen. 2023. Mechanisms underlying food insecurity in the aftermath of climate-related shocks: a systematic review. *The Lancet Planetary Health* 7(3):e242–e250.
- Hu, Q., B. W. Thomas, D. Powlson, Y. Hu, Y. Zhang, X. Jun, X. Shi, and Y. Zhang. 2023. Soil organic carbon fractions in response to soil, environmental and agronomic factors under cover cropping systems: A global meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 355(April):108591.
- Javadi, S. H., M. A. Munna, and A. M. Mouazen. 2021. Fusion of Vis-NIR and XRF spectra for estimation of key soil attributes. *Geoderma* 385(December 2020):114851.
- Kopecký, M., L. Kolář, K. Perná, R. Váchalová, P. Mráz, P. Konva-

- lina, Y. T. Murindangabo, M. Ghorbani, L. Menšík, and M. Dumbrovský. 2022. Fractionation of Soil Organic Matter into Labile and Stable Fractions. *Agronomy* 12(1):73.
- Lal, R. 2016. Soil health and carbon management. *Food and Energy Security* 5(4):212–222.
- Lal, R. 2020a. Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. *Soil Science and Plant Nutrition* 66(1):1–9.
- Lal, R. 2020b. Soil Erosion and Gaseous Emissions. *Applied Sciences* 10(8):2784.
- Lal, R. 2021. Soil management for carbon sequestration. *South African Journal of Plant and Soil* 38(3):231–237.
- Malhi, G. S., M. Kaur, and P. Kaushik. 2021, February 1. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. MDPI.
- Menšík, L., L. Hlisnikovský, and E. Kunzová. 2019. The State of the Soil Organic Matter and Nutrients in the Long-Term Field Experiments with Application of Organic and Mineral Fertilizers in Different Soil-Climate Conditions in the View of Expecting Climate Change. In *Organic Fertilizers-History, Production and Applications*, ed. M. L. Larramendy and S. Soloneski, 23–42. IntechOpen.
- Menšík, L., L. Hlisnikovský, L. Pospíšilová, and E. Kunzová. 2018. The effect of application of organic manures and mineral fertilizers on the state of soil organic matter and nutrients in the long-term field experiment. *Journal of Soils and Sediments* 18(8):2813–2822.
- Munawar, A. A., Y. Yunus, D. Devianti, and P. Satriyo. 2021. Agriculture environment monitoring: Rapid soil fertility evaluation by means of near infrared spectroscopy. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing Ltd.
- Munawar, A. A., Y. Yunus, Devianti, and P. Satriyo. 2020. Calibration models database of near infrared spectroscopy to predict agricultural soil fertility properties. *Data in Brief* 30 (June 1, 2020).
- NOAA. 2019. National Oceanic and Atmospheric Administration. Report: climate change is making specific weather events more extreme. 2019. <https://www.noaa.gov/news/report-climate-change-is-making-specific-weather-events-more-extreme> (2019).
- Oldfield, E. E., M. A. Bradford, and S. A. Wood. 2019. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. *SOIL* 5(1):15–32.
- Oliver, M. A., and P. J. Gregory. 2015. Soil, food security and human health: A review. *European Journal of Soil Science* 66(2):257–276.
- Pariente, S., and H. Lavee. 1996. Soil organic matter and degradation. *Soil Conservation And Protection for Europe* (1996):83–88.
- Penuelas, J., F. Coello, and J. Sardans. 2023. A better use of fertilizers is needed for global food security and environmental sustainability. *Agriculture and Food Security* 12(1):1–9.
- Rayne, N., and L. Aula. 2020, December 1. Livestock manure and the impacts on soil health: A review. MDPI AG.
- Rehman, N. Z., and M. Maqbool. 2017. Soil Biology Management for Sustainable Soil Health: A Review. *Research Journal of Agricultural Sciences* 7(3):473–481.
- Rockström, J., J. Williams, G. Daily, A. Noble, N. Matthews, L. Gordon, H. Wetterstrand, F. DeClerck, M. Shah, P. Steduto, C. de Fraiture, N. Hatibu, O. Unver, J. Bird, L. Sibanda, and J. Smith. 2017. Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio* 46(1):4–17.
- Rojas, R. V., M. Achouri, J. Maroulis, and L. Caon. 2016. Healthy soils: a prerequisite for sustainable food security. *Environmental Earth Sciences* 75(3).
- Rutkowska, A., and D. Pikula. 2018. Effect of Crop Rotation and Nitrogen Fertilization on the Quality and Quantity of Soil Organic Matter i(tourism):13.
- Shi, Z., W. Ji, R. A. Viscarra Rossel, S. Chen, and Y. Zhou. 2015. Prediction of soil organic matter using a spatially constrained local partial least squares regression and the Chinese vis-NIR spectral library. *European Journal of Soil Science* 66(4):679–687.
- Stevenson, F. J. 1994. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. 2nd ed. John Wiley and Sons.
- Terry, R. L., and J. Ryan. 2015. Soil and Food Security. *Better Crops* 99(1):4–6.
- Tilman, D., C. Balzer, J. Hill, and B. L. Befort. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(50):20260–20264.
- Tilman, D., K. G. Cassman, P. A. Matson, R. Naylor, and S. Polasky. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418(6898):671–677.
- UN. 2022. United Nations. Population prospects 2022. <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/> (2022).
- Urruty, N., D. Tailliez-lefebvre, C. Huyghe, and D. Tailliez-lefebvre. 2016. Stability , robustness , vulnerability and resilience of agricultural systems . A review. *Agronomy for Sustainable Development* (2016).
- Voltr, V., L. Menšík, L. Hlisnikovský, M. Hruška, E. Pokorný, and L. Pospíšilová. 2021. The Soil Organic Matter in Connection with Soil Properties and Soil Inputs. *Agronomy* 11(4):779.
- WMO. 2021. World Meteorological Organization. Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970–2019). 2021. [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=10989](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10989). (2021).
- Xie, H., Y. Huang, Q. Chen, Y. Zhang, and Q. Wu. 2019. Prospects for agricultural sustainable intensification: A review of research. *Land* 8(11):1–27.

## Kapitola 2

- Achard, F. K. 1786. Chemische Untersuchung des Torfs (Chemical investigation of peats). *Crell's Chem Ann* (in German) 2 (1786):391–403.
- Aiken, G. R., D. M. Mcknight, R. L. Wershaw, and P. Maccarthy. 1985. Humic substances in soil, sediment, and water. *Soil Science* 142(5):323.
- Alvarez, R. 2005. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. *Soil Use and Management* 21(1):38–52.
- Amin, I., F. Fikrat, E. Mammadov, and M. Babayev. 2020. Soil Organic Carbon Prediction by Vis-NIR Spectroscopy: Case Study the Kur-Aras Plain, Azerbaijan. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 51(6):726–734.
- Approaches, A. 2019. Agroecological Approaches to Sustai-

- nable Intensification. *Sustainable Food and Agriculture* (2019):179–184.
- Balík, J., P. Suran, O. Sedlář, J. Černý, M. Kulhánek, S. Procházková, D. A. Asrade, and M. Smatanová. 2023. Long-Term Application of Manure and Different Mineral Fertilization in Relation to the Soil Organic Matter Quality of Luvisols. *Agronomy* 13(11):2678.
- Ball, B. C., I. Bingham, R. M. Rees, C. A. Watson, and A. Litterick. 2005. The role of crop rotations in determining soil structure and crop growth conditions. *Canadian Journal of Soil Science* 85(5):557–577.
- Baveye, P. C., and M. Wander. 2019. The (bio)chemistry of soil humus and humic substances: Why is the “new view” still considered novel after more than 80 years? *Frontiers in Environmental Science* 7(MAR):1–6.
- Birkeland, Kr. 1906. On the oxidation of atmospheric nitrogen in electric arcs. *Transactions of the Faraday Society* 2(December):98.
- Bogunovic, I., I. Dugan, P. Pereira, V. Filipovic, L. Filipovic, V. Krevh, J. Defterdarovic, M. Maticic, and I. Kisic. 2023. Effects of Biochar and Cattle Manure under Different Tillage Management on Soil Properties and Crop Growth in Croatia. *Agriculture* 13(11):2128.
- Bolin, B., R. Sukumar, P. Ciais, W. Cramer, P. Jarvis, H. Kheshgi, C. Nobre, S. Semenov, and W. Steffen. 2000. Global perspective. In *Special report on land use, land-use change and forestry*, ed. R. T. Watson, B. Bolin, N. H. Ravindranath, J. V. David, and D. J. Dokken, 23–51. Cambridge University Press.
- Brady, N. C., and R. R. Weil. 2008. *The Nature and Properties of Soil*. 14th ed. Upper River, New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Brar, B. S., J. Singh, G. Singh, and G. Kaur. 2015. Effects of long term application of inorganic and organic fertilizers on soil organic carbon and physical properties in maize-wheat rotation. *Agronomy* 5(2):220–238.
- Čermák, P. 2007. *Bilance živin v ekologicky hospodařícím podniku: metodická pomůcka. Náměšť nad Oslavou: ZERA - Zemědělská a ekologická regionální agentura.*
- Černý, J., J. Balík, M. Kulhánek, K. Časová K, and V. Nedvěd. 2010. Mineral and organic fertilization efficiency in long-term stationary experiments. *Plant, Soil and Environment* 56(No. 1):28–36.
- Conant, R. T., C. E. P. Cerri, B. B. Osborne, and K. Paustian. 2017. Grassland management impacts on soil carbon stocks: A new synthesis: A. *Ecological Applications* 27(2):662–668.
- De Corato, U. 2020. Agricultural waste recycling in horticultural intensive farming systems by on-farm composting and compost-based tea application improves soil quality and plant health: A review under the perspective of a circular economy. *Science of the Total Environment* 738 (2020):139840.
- Czarnecki, S., and R.-A. Düring. 2015. Influence of long-term mineral fertilization on metal contents and properties of soil samples taken from different locations in Hesse, Germany. *SOIL* 1(1):23–33.
- Das, A. C., and D. Mukherjee. 2000. Soil application of insecticides influences microorganisms and plant nutrients. *Applied Soil Ecology* 14(1):55–62.
- Deng, L., G. Zhu, Z. Tang, and Z. Shanguan. 2016. Global patterns of the effects of land-use changes on soil carbon stocks. *Global Ecology and Conservation* 5 (January 2016):127–138.
- De Rosa, D., C. Ballabio, E. Lugato, M. Fasiolo, A. Jones, and P. Panagos. 2024. Soil organic carbon stocks in European croplands and grasslands: How much have we lost in the past decade? *Global Change Biology* 30(1).
- Dharumarajan, S., B. Kalaiselvi, A. Suputhra, M. Lalitha, R. Vamsundhara, K. S. A. Kumar, K. M. Nair, R. Hegde, S. K. Singh, and P. Lagacherie. 2021. Digital soil mapping of soil organic carbon stocks in Western Ghats, South India. *Geoderma Regional* 25 (June 2021):e00387.
- Diaz, L. F., De Bertoldi, M., & Bidlingmaier, W. (Eds. ). 2007. *Compost Science and Technology, Volume 8 (Waste Management)*. Elsevier Science.
- Dillard, H. R. 2019. Global food and nutrition security: from challenges to solutions: Report of the international congress of plant pathology 2018, Boston, USA, 29th July – 3rd August 2018 with the title plant health in a global economy. In *Food Security*, 249–252. Springer Netherlands.
- Du, Z., Y. Xie, L. Hu, L. Hu, S. Xu, D. Li, G. Wang, and J. Fu. 2014. Effects of fertilization and clipping on carbon, nitrogen storage, and soil microbial activity in a natural grassland in southern China. *PLoS ONE* 9(6).
- van Eekeren, N., D. van Liere, F. de Vries, M. Rutgers, R. de Gode, and L. Brussaard. 2009. A mixture of grass and clover combines the positive effects of both plant species on selected soil biota. *Applied Soil Ecology* 42(3):254–263.
- Eo, J., and K. C. Park. 2016. Long-term effects of imbalanced fertilization on the composition and diversity of soil bacterial community. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 231 (2016):176–182.
- Eurostat. 2018. Agri-environmental indicator- soil erosion. *Statistics Explained*(November):1–25.
- Garten, C. 2002. Soil carbon storage beneath recently established tree plantations in Tennessee and South Carolina, USA,. *Biomass and Bioenergy* 23(2):93–102.
- Global Soil Partnership. 2017. *Global Soil Partnership*. FAO.
- Gong, W., X. Yan, J. Wang, T. Hu, and Y. Gong. 2009. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China. *Geoderma* 149(3–4):318–324.
- Goydaragh, M. G., R. Taghizadeh-Mehrjardi, A. A. Jafarzadeh, J. Triantafilis, and M. Lado. 2021. Using environmental variables and Fourier Transform Infrared Spectroscopy to predict soil organic carbon. *CATENA* 202(March 2020):105280.
- Grego, S., and A. Lagomarsino. 2008. Soil organic matter in the sustainable agriculture: Source or sink of carbon? *Soil Carbon Sequestration Under Organic Farming in the Mediterranean Environment* 661(2):39–51.
- Guo, L., P. Fu, T. Shi, Y. Chen, C. Zeng, H. Zhang, and S. Wang. 2021. Exploring influence factors in mapping soil organic carbon on low-relief agricultural lands using time series of remote sensing data. *Soil and Tillage Research* 210(February):104982.
- Guo, P.-T., M.-F. Li, W. Luo, Q.-F. Tang, Z.-W. Liu, and Z.-M. Lin. 2015. Digital mapping of soil organic matter for rubber

- plantation at regional scale: An application of random forest plus residuals kriging approach. *Geoderma* 237–238 (January 2015):49–59.
- Guo, X., H. Liu, and S. Wu. 2019. Humic substances developed during organic waste composting: Formation mechanisms, structural properties, and agronomic functions. *Science of The Total Environment* 662 (April 2019):501–510.
- Haddaway, N. R., K. Hedlund, L. E. Jackson, T. Kätterer, E. Lugato, I. K. Thomsen, H. B. Jørgensen, and P. E. Isberg. 2017. How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review. *Environmental Evidence*. BioMed Central.
- Hakl, J., E. Kunzová, Š. Tocauerová, L. Menšík, M. Mrázková, and J. Pozdíšek. 2021. Impact of long-term manure and mineral fertilization on yield and nutritive value of lucerne (*Medicago sativa*) in relation to changes in canopy structure. *European Journal of Agronomy* 123(February 2020):126219.
- Harden, J. W., G. Hugelius, A. Ahlström, J. C. Blankinship, B. Bond-Lamberty, C. R. Lawrence, J. Loisel, A. Malhotra, R. B. Jackson, S. Ogle, C. Phillips, R. Ryals, K. Todd-Brown, R. Vargas, S. E. Vergara, M. F. Cotrufo, M. Keiluweit, K. A. Heckman, S. E. Crow, W. L. Silver, M. DeLonge, and L. E. Nave. 2018. Networking our science to characterize the state, vulnerabilities, and management opportunities of soil organic matter. *Global Change Biology* 24(2):e705–e718.
- Havlin, J. L., D. E. Kissel, L. D. Maddux, M. M. Claassen, and J. H. Long. 1990. Crop Rotation and Tillage Effects on Soil Organic Carbon and Nitrogen. *Soil Science Society of America Journal* 54(2):448–452.
- Hlisnikovský, L., L. Menšík, and E. Kunzová. 2021. The Effect of Soil-Climate Conditions, Farmyard Manure and Mineral Fertilizers on Potato Yield and Soil Chemical Parameters. *Plants* 10(11):2473.
- Hlušek, J., and R. Ríhtr. 2010. Bilance živin v rostlinné výrobě ČR a potřeba hnojení. *Racionální použití hnojiv - sborník z konference*. .
- Jansen, S. A., M. Malaty, S. Nwabara, E. Johnson, E. Ghabbour, G. Davies, and J. M. Varum. 1996. Structural modeling in humic acids. *ELSEVIER Materials Science and Engineering C*.
- Jobbagy, E. G., and R. B. Jackson. 2000. The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its Relation to Climate and Vegetation. *Ecological Applications* 10(2):423–436.
- Johnson, J. M. F., A. J. Franzluebbers, S. L. Weyers, and D. C. Reicosky. 2007. Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions. *Environmental Pollution* 150(1):107–124.
- Jones, R. J. a., R. Hiederer, E. Rusco, and L. Montanarella. 2005. Estimating organic carbon in the soils of Europe for policy support. *European Journal of Soil Science* 56(5):655–671.
- Karlen, D. L., M. J. Mausbach, J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris, and G. E. Schuman. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Science Society of America Journal* 61(1):4–10.
- Kleber, M., and J. Lehmann. 2019. Humic Substances Extracted by Alkali Are Invalid Proxies for the Dynamics and Functions of Organic Matter in Terrestrial and Aquatic Ecosystems. *Journal of Environmental Quality* 48(2):207–216.
- Klíř, J. 2008. *Rámcová metodika výživy rostlin a hnojení*. Prague: VÚRV (CRI).
- Klíř, J. 2017. Klíř J (2017) Akční program nitratové směrnice.
- Klíř, J. 2021. Bilance organických látek v rostlinné výrobě. In 1–8. Praha.
- Kononova, M. M. 1963. *Organičeskoje veščestvo počvy: jeho priroda, svojstva i metody izučenija*. Moskva: AN SSSR.
- Kopeć, M., K. Gondek, M. Mierzwa-Hersztek, and R. Jarosz. 2021. Changes in the soil content of organic carbon nitrogen and sulphur in a long-term fertilisation experiment in czarny potok (Poland). *Journal of Elementology* 26(1):33–46.
- Křen, J. 2012. Osevní sledy a jejich vliv na stabilitu ornice a omezování splachování povrchových vrstev půdy do povrchových vod. In: *Pesticidy a ochrana vod. Česká společnost rostlinolékařská*.
- Kronstad, W. E. 1997. Agricultural development and wheat breeding in the 20th Century. In 1–10.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123(1–2):1–22.
- Lal, R. 2008a. Review article Soils and sustainable agriculture . A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28 (2008):57–64.
- Lal, R. 2008b. Soil carbon stocks under present and future climate with specific reference to European ecoregions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 81(2):113–127.
- Lal, R. 2017. Soil Carbon Impacts on Functionality and Environmental Sustainability. In 1–11.
- Lal, R. 2020. Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal* 112(5):3265–3277.
- Lal, R. 2021. Soil management for carbon sequestration. *South African Journal of Plant and Soil* 38(3):231–237.
- Lehmann, J., D. A. Bossio, I. Kögel-Knabner, and M. C. Rillig. 2020, October 1. The concept and future prospects of soil health. Springer Nature.
- Lehmann, J., and M. Kleber. 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature* 528(7580):60–8.
- Leifeld, J., S. Meyer, K. Budge, M. T. Sebastia, M. Zimmermann, and J. Fuhrer. 2015. Turnover of grassland roots in mountain ecosystems revealed by their radiocarbon signature: Role of temperature and management. *PLoS ONE* 10(3):1–13.
- Li, J., Y. Wen, X. Li, Y. Li, X. Yang, Z. Lin, Z. Song, J. M. Cooper, and B. Zhao. 2018a. Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain. *Soil and Tillage Research* 175(December 2016):281–290.
- Li, T., J. Gao, J. Hong, Y. Xie, Z. Gao, H. Meng, L. Li, and L. Meng. 2018b. Variation of nutrients and selected soil properties in reclaimed soil of different ages at a coal-mining subsidence area on the Loess Plateau, China. *Ekoloji* 27(106):547–554.
- Lorenz, K., and R. Lal. 2018. *Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems*. Cham: Springer International Publishing.
- Lozano-García, B., L. Parras-Alcántara, and M. del Toro Carrillo de Albornoz. 2011. Effects of oil mill wastes on surface soil properties, runoff and soil losses in traditional olive groves in southern Spain. *CATENA* 85(3):187–193.



- Lugato, E., P. Panagos, F. Bampa, A. Jones, and L. Montanarella. 2014. A new baseline of organic carbon stock in European agricultural soils using a modelling approach. *Global change biology* 20(1):313–26.
- Mahmood, S., M. R. Nunes, D. A. Kane, and Y. Lin. 2023. Soil health explains the yield-stabilizing effects of soil organic matter under drought. *Soil & Environmental Health* 1(4):100048.
- Maltas, A., H. Kebli, H. R. Oberholzer, P. Weisskopf, and S. Sinaj. 2018. The effects of organic and mineral fertilizers on carbon sequestration, soil properties, and crop yields from a long-term field experiment under a Swiss conventional farming system. *Land Degradation and Development* 29(4):926–938.
- Malý, S., and G. Siebielec. 2015. Testování exogenní organické hmoty pro bezpečnou aplikaci na půdu. Brno: Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský.
- Meena, R. S., and R. Lal. 2018. Legumes and Sustainable Use of Soils. In *Legumes for Soil Health and Sustainable Management*, 1–31. Singapore: Springer Singapore.
- Meersmans, J., M. P. Martin, E. Lacarce, T. G. Orton, S. De Baets, M. Gourrat, N. P. A. Saby, J. Wetterlind, A. Bispo, T. A. Quine, and D. Arrouays. 2013. Estimation of Soil Carbon Input in France: An Inverse Modelling Approach. *Pedosphere* 23(4):422–436.
- Melillo, J. M., P. A. Steudler, J. D. Aber, K. Newkirk, H. Lux, F. P. Bowles, C. Catricala, A. Magill, T. Ahrens, and S. Morri-seau. 2002. Soil Warming and Carbon-Cycle Feedbacks to the Climate System. *Science* 298(5601):2173–2176.
- De Melo, B. A. G., F. L. Motta, and M. H. A. Santana. 2016, May 1. Humic acids: Structural properties and multiple functionalities for novel technological developments. Elsevier Ltd.
- Menšík, L. 2010. Frakcionace humusových látek lesních půd. Mendelova univerzita v Brně.
- Menšík, L., L. Hlisenkovský, and E. Kunzová. 2019a. The State of the Soil Organic Matter and Nutrients in the Long-Term Field Experiments with Application of Organic and Mineral Fertilizers in Different Soil-Climate Conditions in the View of Expecting Climate Change. In *Organic Fertilizers-History, Production and Applications*, ed. M. L. Larramendy and S. Soloneski, 23–42. IntechOpen.
- Menšík, L., L. Hlisenkovský, L. Pospíšilová, and E. Kunzová. 2018. The effect of application of organic manures and mineral fertilizers on the state of soil organic matter and nutrients in the long-term field experiment. *Journal of Soils and Sediments* 18(8):2813–2822.
- Menšík, L., P. Nerušil, V. Míka, R. Loučka, and V. Jambor. 2019b. History and Current use of Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) for the Analysis of Forage and Preserved Feed at Grassland Research Station Jevíčko in the Czech Republic. In *18th International Symposium Forage Conservation. Conference proceedings.*, 190–197. Brno: Mendel University in Brno.
- Mi, W., Y. Sun, S. Xia, H. Zhao, W. Mi, P. C. Brookes, Y. Liu, and L. Wu. 2018. Effect of inorganic fertilizers with organic amendments on soil chemical properties and rice yield in a low-productivity paddy soil. *Geoderma* 320(January):23–29.
- MZe. 2021. Situační a výhledová zpráva – Půda. Praha: 978-80-7434-598-2.
- MZe. 2018. Situační a výhledová zpráva – Půda. Praha: Ministerstvo zemědělství České republiky.
- Ondrasek, G., H. Bakić Begić, M. Zovko, L. Filipović, C. Meriño-Gergichevich, R. Savić, and Z. Rengel. 2019. Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications. *Science of The Total Environment* 658 (March 2019):1559–1573.
- Ouni, Y., T. Ghnaya, F. Montemurro, C. Abdelly, and A. Lakhdar. 2014. The role of humic substances in mitigating the harmful effects of soil salinity and improve plant productivity. *International Journal of Plant Production* 8(3):353–374.
- Paustian, K., O. Andrén, H. H. Janzen, R. Lal, P. Smith, G. Tian, H. Tiessen, M. Noordwijk, and P. L. Woomer. 1997. Agricultural soils as a sink to mitigate CO<sub>2</sub> emissions. *Soil Use and Management* 13(s4):230–244.
- Piccolo, A. 1996. Humus and Soil Conservation. In *Humic Substances in Terrestrial Ecosystems*, ed. A. Piccolo, 225–264. Amsterdam: Elsevier Science B.V.
- Piccolo, A., G. Celano, and P. Conte. 2002. Methods of isolation and characterization of humic substances to study their interactions with pesticides. In *Proceedings of conference Pesticide/Soil Interactions*, ed. J. Cornejo and P. Jamet, 103–116. Paris: INRA.
- Poeplau, C. 2021. Grassland soil organic carbon stocks along management intensity and warming gradients. *Grass and Forage Science* 76(2):186–195.
- Poeplau, C., A. Don, L. Vesterdal, J. Leifeld, B. Van Wesemael, J. Schumacher, and A. Gensior. 2011. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone- carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology* 17(7):2415–2427.
- Pospíšilová, L., and M. Tesařová. 2009. Organický uhlík obhospodařovaných půd. *Folia Univ. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně*.
- Pouladi, N., A. B. Møller, S. Tabatabai, and M. H. Greve. 2019. Mapping soil organic matter contents at field level with Cubist, Random Forest and kriging. *Geoderma* 342(October 2018):85–92.
- Rahut, D. B., J. P. Aryal, N. Manchanda, and T. Sonobe. 2022. Expectations for household food security in the coming decades: A global scenario. In *Future Foods*, 107–131. Elsevier.
- Rao, C. S., A. K. Indoria, and K. L. Sharma. 2017. Effective management practices for improving soil organic matter for increasing crop productivity in rainfed agroecology of India. *Current Science* 112(7):1497–1504.
- Rayne, N., and L. Aula. 2020, December 1. Livestock manure and the impacts on soil health: A review. MDPI AG.
- Reddy, S. B., M. S. Nagaraja, T. S. P. Raj, P. Dhumgond, and N. S. Vignesh. 2012. Soil Humic and Fulvic Acid Fractions Under Different Land Use Systems 99(September):507–510.
- Rees, R. M., I. J. Bingham, J. A. Baddeley, and C. A. Watson. 2005. The role of plants and land management in sequestering soil carbon in temperate arable and grassland ecosystems. *Geoderma* 128(1–2):130–154.
- Reeves, D. W. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research* 43(1–2):131–167.
- Robertson, G. P., K. L. Gross, S. K. Hamilton, D. A. Landis, T. M. Schmidt, S. S. Snapp, and S. M. Swinton. 2014. Farming for ecosystem services: An ecological approach to production agriculture. *BioScience* 64(5):404–415.
- Rochette, P., D. A. Angers, and L. B. Flanagan. 1999. Maize Resi-

- due Decomposition Measurement Using Soil Surface Carbon Dioxide Fluxes and Natural Abundance of Carbon-13. *Soil Science Society of America Journal* 63(5):1385–1396.
- Rockström, J., J. Williams, G. Daily, A. Noble, N. Matthews, L. Gordon, H. Wetterstrand, F. DeClerck, M. Shah, P. Steduto, C. de Fraiture, N. Hatibu, O. Unver, J. Bird, L. Sibanda, and J. Smith. 2017. Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio* 46(1):4–17.
- Russel, D. A., and G. G. Williams. 1977. History of Chemical Fertilizer Development. *Soil Science Society of America Journal* 41(2):260–265.
- Sáňka, M., J. Hofman, R. Vácha, P. Čupr, J. Čechmánková, O. Sáňka, O. Mikeš, J. Skála, L. Horváthová, V., Šindelářová, J. Vašíčková, and A. Nečasová. 2015. Metodické postupy k omezení vstupu rizikových látek do rostlinné produkce v oblastech postižených periodickými povodněmi. [Certifikovaná metodika]. Praha: VÚMOP, v.v.i., Praha.
- Scarlat, N., J. F. Dallemand, and F. Fahl. 2018. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy* 129 (2018):457–472.
- Schellekens, J., P. Buurman, K. Kalbitz, A. Van Zomeren, P. Vidal-Torrado, C. Cerli, and R. N. J. Comans. 2017. Molecular Features of Humic Acids and Fulvic Acids from Contrasting Environments. *Environmental Science and Technology* 51(3):1330–1339.
- Schipper, L. A., W. T. Baisden, R. L. Parfitt, C. Ross, J. J. Claydon, and G. Arnold. 2007. Large losses of soil C and N from soil profiles under pasture in New Zealand during the past 20 years. *Global Change Biology* 13(6):1138–1144.
- Shi, R. yong, Z. dong Liu, Y. Li, T. Jiang, M. Xu, J. yu Li, and R. kou Xu. 2019. Mechanisms for increasing soil resistance to acidification by long-term manure application. *Soil and Tillage Research* 185(November 2017):77–84.
- Shiwakoti, S., V. D. Zheljazkov, H. T. Gollany, M. Kleber, and B. Xing. 2019. Macronutrients in soil and wheat as affected by a long-term tillage and nitrogen fertilization in winter wheat–fallow rotation. *Agronomy* 9(4):1–11.
- Simpson, A. J., D. J. McNally, and M. J. Simpson. 2011. NMR spectroscopy in environmental research: From molecular interactions to global processes. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy* 58(3–4):97–175.
- Škarpa, P. 2013. Organická hnojiva a jejich vliv na bilanci organických látek v půdě. In *Ochrana půdy*, 31–41. Náměšť nad Oslavou: ZERA - Zemědělská a ekologická regionální agentura, o.s.
- Skokanová, M., and K. Dercová. 2008. Humínové kyseliny. Původ a struktúra. *Chemické listy* 102 (2008):262–268.
- Skybová, M. 2006. Humínové kyseliny- prínos pre environmentálny výskum. *Acta Montanistica Slovaca* 11(2):362–366.
- Snyder, C. S., T. W. Bruulsema, T. L. Jensen, and P. E. Fixen. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133(3–4):247–266.
- Sotáková, S. 1982. Organická hnota a úrodnost půdy. Bratislava: Príroda Bratislava.
- Soussana, J.-F., P. Loiseau, N. Vuichard, E. Ceschia, J. Balesdent, T. Chevallier, and D. Arrouays. 2006. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management* 20(2):219–230.
- Sparks, D. L. 2003. *Environmental Soil Chemistry*. 2nd ed. San Diego, California, USA: Elsevier Science (USA).
- Steffens, M., L. Zeh, D. M. Rogge, and H. Buddenbaum. 2021. Quantitative mapping and spectroscopic characterization of particulate organic matter fractions in soil profiles with imaging VisNIR spectroscopy. *Scientific Reports* 11(1):16725.
- Stevenson, F. J. 1994. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. 2nd ed. John Wiley and Sons.
- Studdert, G. A., and H. E. Echeverría. 2000. Crop Rotations and Nitrogen Fertilization to Manage Soil Organic Carbon Dynamics. *Soil Science Society of America Journal* 64(4):1496–1503.
- Sutton, R., and G. Sposito. 2005. Critical Review Molecular Structure in Soil Humic Substances : The New View. *Environmental Science & Technology* 39(510):9009–9015.
- Tajik, S., S. Ayoubi, and M. Zeraatpisheh. 2020. Digital mapping of soil organic carbon using ensemble learning model in Mollisols of Hyrcanian forests, northern Iran. *Geoderma Regional* 20 (March 2020):e00256.
- Timsina, J. 2018. Can Organic Sources of Nutrients Increase Crop Yields to Meet Global Food Demand? *Agronomy* 8(10):214.
- Tiwari, J., A. L. RAMANATHAN, K. BAUDDH, and J. KORSTAD. 2023. Humic substances: Structure, function and benefits for agroecosystems—a review. *Pedosphere* 33(2):237–249.
- Todd-Brown, K. E. O., J. T. Randerson, F. Hopkins, V. Arora, T. Hajima, C. Jones, E. Shevliakova, J. Tjiputra, E. Volodin, T. Wu, Q. Zhang, and S. D. Allison. 2014. Changes in soil organic carbon storage predicted by Earth system models during the 21st century. *Biogeosciences* 11(8):2341–2356.
- Todd-Brown, K. E. O., J. T. Randerson, W. M. Post, F. M. Hoffman, C. Tarnocai, E. A. G. Schuur, and S. D. Allison. 2013. Causes of variation in soil carbon simulations from CMIP5 Earth system models and comparison with observations. *Biogeosciences* 10(3):1717–1736.
- Vance, E. D. 1996. Land Application of Wood-Fired and Combination Boiler Ashes: An Overview. *Journal of Environmental Quality* 25(5):937–944.
- Vaněk, V., L. Kolář, and D. Pavlíková. 2010. Úloha organické hmoty v půdě. Racionální použití hnojiv - sborník z konference.
- Vašák, F., J. Černý, Š. Buráňová, M. Kulhánek, and J. Balík. 2015. Soil pH changes in long-term field experiments with different fertilizing systems. *Soil and Water Research* 10(1):19–23.
- Vlachová, K. 2007. Vliv huminových látek na toxicitu komplexní vzorků ze životního prostředí. Masarykova Univerzita. Brno.
- Voltr, V., L. Menšík, L. Hlisnikovský, M. Hruška, E. Pokorný, and L. Pospíšilová. 2021. The Soil Organic Matter in Connection with Soil Properties and Soil Inputs. *Agronomy* 11(4):779.
- Waksman, S. A. 1938. *Humus: origin, chemical composition, and importance in nature*. Baltimore: The Williams & Wilkins company.
- Walter Stinner, P., A. Deuker, T. Schmalfuß, C. Brock, N. Rensberg, V. Denysenko, P. Trainer, K. Möller, J. Zang, L. Janke, W. M. Leandro, K. Oehmichen, D. Popp, and J. Daniel-Gromke. 2018. Perennial and Intercrop Legumes as Ener-

- gy Crops for Biogas Production. In *Legumes for Soil Health and Sustainable Management*, 139–171. Singapore: Springer Singapore.
- Wang, J., T. Liu, J. Zhang, H. Yuan, and G. E. Acquah. 2022a. Spectral variable selection for estimation of soil organic carbon content using mid-infrared spectroscopy. *European Journal of Soil Science* 73(4).
- Wang, L.-J., H. Cheng, L.-C. Yang, and Y.-G. Zhao. 2021. Soil organic carbon mapping in cultivated land using model ensemble methods. *Archives of Agronomy and Soil Science* (May 25, 2021):1–15.
- Wang, X., L. Li, H. Liu, K. Song, L. Wang, and X. Meng. 2022b. Prediction of soil organic matter using VNIR spectral parameters extracted from shape characteristics. *Soil and Tillage Research* 216 (February 1, 2022):105241.
- West, T. O., and W. M. Post. 2002. Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation. *Soil Science Society of America Journal* 66(6):1930–1946.
- Wiesmeier, M., L. Urbanski, E. Hobbey, B. Lang, M. von Lützw, E. Marin-Spiotta, B. van Wesemael, E. Rabot, M. Ließ, N. Garcia-Franco, U. Wollschläger, H. J. Vogel, and I. Kögel-Knabner. 2019. Soil organic carbon storage as a key function of soils- A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma* 333(July 2018):149–162.
- Wood, S. A., and J. C. Blankinship. 2022. Making soil health science practical: guiding research for agronomic and environmental benefits. *Soil Biology and Biochemistry* 172 (September 2022):108776.
- Yang, F., J. Tian, H. Fang, Y. Gao, M. Xu, Y. Lou, B. Zhou, and Y. Kuzyakov. 2019. Functional Soil Organic Matter Fractions, Microbial Community, and Enzyme Activities in a Mollisol Under 35 Years Manure and Mineral Fertilization Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture (2019).
- Yang, X., W. Ren, B. Sun, and S. Zhang. 2012. Effects of contrasting soil management regimes on total and labile soil organic carbon fractions in a loess soil in China. *Geoderma* 177–178 (2012):49–56.
- Yousaf, B., G. Liu, R. Wang, Q. Abbas, M. Imtiaz, and R. Liu. 2017. Investigating the biochar effects on C-mineralization and sequestration of carbon in soil compared with conventional amendments using the stable isotope ( $\delta^{13}\text{C}$ ) approach. *GCB Bioenergy* 9(6):1085–1099.
- Zeng, C., L. Yang, A.-X. Zhu, D. G. Rossiter, J. Liu, J. Liu, C. Qin, and D. Wang. 2016. Mapping soil organic matter concentration at different scales using a mixed geographically weighted regression method. *Geoderma* 281 (2016):69–82.
- Žížala, D., R. Minařík, A. Juřicová, T. Zádorová, H. Beitlerová, and V. Penížek. 2020. Soubor detailních map půdních vlastností ČR. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.
- Žížala, D., R. Minařík, J. Skála, H. Beitlerová, A. Juřicová, J. Reyes Rojas, V. Penížek, and T. Zádorová. 2022. High-resolution agriculture soil property maps from digital soil mapping methods, Czech Republic. *CATENA* 212 (May 2022):106024.
- Zobeck, T. M., D. W. Fryrear, and R. D. Pettit. 1989. Management effects on wind-eroded sediment and plant nutrients. *Journal of Soil and Water Conservation* 44(2):160 LP – 163.
- Zomer, R. J., D. A. Bossio, R. Sommer, and L. V. Verchot. 2017. Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils. *Scientific Reports* 7(1):15554.

#### Kapitola 4

- Balkovič, J., M. Madaras, R. Skalský, C. Folberth, M. Smatanová, E. Schmid, M. van der Velde, F. Kraxner, and M. Obersteiner. 2020. Verifiable soil organic carbon modelling to facilitate regional reporting of cropland carbon change: A test case in the Czech Republic. *Journal of Environmental Management* 274 (November 15, 2020).
- Hlisnikovský, L., E. Kunzová, and L. Menšík. 2016. Winter wheat: results of long-term fertilizer experiment&nbsp;in Prague-Ruzyně over the last 60 years. *Plant, Soil and Environment* 62(No. 3):105–113.
- IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports No. 106*. FAO, Rome.
- Jurka, M., A. Kohoutek and P. Nerušil. 2014. Konverze vsázky z TTP bioplynovou stanicí s prizmatickými fermentory. In *Reintenzifikace travních porostů - základ výroby kvalitní píče pro živočišnou výrobu a vsázku do BPS*. Výzkumný ústav pro chov skotu, s.r.o. Rapotín, s. 70–74.
- Kappen, H. 1929. *Die Bodenazidität*. 363p. Berlin: Springer Verlag. Berlin: Springer Verlag.
- Kirk, P. L. 1950. Kjeldahl Method for Total Nitrogen. *Analytical Chemistry* 22(2):354–358.
- Kjeldahl, J. 1883. Neue Methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Körpern. *Zeitschrift für analytische Chemie* 22(1):366–383.
- Klíř, J. 2008. *Rámcová metodika výživy rostlin a hnojení*. Prague: VÚRV (CRI).
- Komárek, P., A. Kohoutek, J. Fiala, V. Odstrčilová and P. Nerušil. 2005. Produkce a kvality píče travních porostů v závislosti na zatížení skotem a frekvenci sečení. In *Kvalita píče z travních porostů*. VÚRV Praha, s. 175–182.
- Kononova, M. M. 1963. *Organičeskoje veščestvo počvy: jeho priroda, svojstva i metody izučeniya*. Moskva: AN SSSR.
- Körschens, M., E. Schulz, and R. Behm. 1990. Heißwasserlöslicher C und N im boden als kriterium für das N-Nachlieferungsvermögen. *Zentralblatt für Mikrobiologie* 145(4):305–311.
- Lipavský J, J. Kubát, J. Zobač. 2008. Long-term effects of straw and farmyard manure on crop yields and soil properties. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 54: 369–379.
- Madaras, M., J. Balkovič, R. Skalský. 2017. EPIC model based search of agronomic strategies for increasing SOC (case study). Dostupné online: <https://jahnresearchgroup.cals.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/223/2017/08/9.-Madaras-et-al..pdf>
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 15(12):1409–1416.
- Meloun, M., and J. Milítký. 2011. *Statistical Data Analysis, A Practical Guide with 1250 Exercises and Answer key on CD*. 1. vydání. New Delhi: Woodhead Publishing India.
- Meloun, M., and J. Milítký. 2012. *Interaktivní statistická analýza dat*. 1. vydání. Praha: Nakladatelství Karolinum.
- Meloun, M., J. Milítký, and M. Hill. 2018. *Statistická analýza*

- vícerozměrných dat v příkladech. 1. vydání. Praha: Nakladatelství Karolinum.
- Menšík, L., and P. Nerušil. 2019. Produkční, kvalitativní a porostové změny trvalého lučního společenstva ve vztahu k intenzitě využívání a úrovni hnojení v oblasti Malé Hané. 1. vydání. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.
- Menšík, L., L. Hlisenkovský, and E. Kunzová. 2019. The State of the Soil Organic Matter and Nutrients in the Long-Term Field Experiments with Application of Organic and Mineral Fertilizers in Different Soil-Climate Conditions in the View of Expecting Climate Change. In *Organic Fertilizers-History, Production and Applications*, ed. M. L. Larramendy and S. Soloneski, 23–42. IntechOpen.
- Menšík, L., L. Hlisenkovský, L. Pospíšilová, and E. Kunzová. 2018. The effect of application of organic manures and mineral fertilizers on the state of soil organic matter and nutrients in the long-term field experiment. *Journal of Soils and Sediments* 18(8):2813–2822.
- Nelson, D. W., and L. E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In *Methods of Soil Analysis*. Part 3, ed. D. L. et al. Sparks, 961–1010.
- Němeček, J., M. Mühlhanslová, J. Macků, D. Vavříček, and P. Novák. 2011. Taxonomický klasifikační systém půd. Taxonomický Klasifikační Systém Půd České Republiky 2. upraven. Praha: ČZU v Praze.
- Nerušil, P. 2008. Produkční, kvalitativní a porostové změny trvalého lučního společenstva ve vztahu k intenzitě využívání a úrovni hnojení. Disertační práce. Mendelova univerzita v Brně, 141 s.
- Pospíšilová, L., and V. Vlček. 2015. Chemické, biologické a fyzikální ukazatele kvality/zdraví půdy (Chemical, biological and physical indicators of soil quality / health). Brno: Mendelova univerzita v Brně (Mendel University).
- Pospíšilová, L., V. Vlček, V. Hybler, M. Hábová, and J. Jandák. 2016. Standard analytical methods and evaluation criteria of soil physical, agrochemical, biological and hygienic parameters. Brno: Mendel University in Brno: Folia Universitatis Agriculturae at Silviculturae Mendelianae Brunensis.
- Pytela O. 2017. Program OPstat. Dostupné na: <http://bures.upce.cz/OPgm/>
- Sims, J. R., and V. A. Haby. 1971. Simplified colorimetric determination of soil organic matter. *Soil Science* 112 (1971):137–141.
- Stehlík, M., M. Madaras, M. Kroulík. 2020. Modelling of soil organic carbon in a long-term experiment Trutnov: climate scenarios with shifted precipitation, temperature and CO<sub>2</sub> concentration. International Conference of Young Scientists ICYS 2020, 14-15th September 2020, Prague.
- Šarapatka, B., and M. Bednář. 2015. Assessment of Potential Soil Degradation on Agricultural Land in the Czech Republic. *Journal of Environment Quality* 44(1):154.
- Šrek, P., M. Hejman, and E. Kunzová. 2010. Multivariate analysis of relationship between potato (*Solanum tuberosum* L.) yield, amount of applied elements, their concentrations in tubers and uptake in a long-term fertilizer experiment. *Field Crops Research* 118(2):183–193.
- Voltr, V. 2012. Concept of soil fertility and soil productivity: Evaluation of agricultural sites in the Czech Republic. *Archives of Agronomy and Soil Science* 58(SUPPL.):37–41.
- Voltr, V., L. Menšík, L. Hlisenkovský, M. Hruška, E. Pokorný, and L. Pospíšilová. 2021. The Soil Organic Matter in Connection with Soil Properties and Soil Inputs. *Agronomy* 11(4):779.
- Voltr, V., M. Hruška, and F. Havelka. 2020. Comparison of the energy and economic balance of crop production. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 22(3):138–150.
- Vyhláška č. 227/2018 Sb. Vyhláška o charakteristice bonitovaných půdně ekologických jednotek a postupu pro jejich vedení a aktualizaci. Částka 113/2018. <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2018-227/zneni-20190101>
- Williams J.R. 1995. The EPIC model. In: Singh, V.P. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water resources publisher, Colorado, pp. 909–1000.
- Zbírál, J., I. Honsa, and S. Malý. 1997. Analýza půd III. Jednotné pracovní postupy (Soil analysis III.). Brno: ÚKZÚZ (Brno, ÚKZÚZ (Central Institute for Supervising and Testing in Agriculture)).

## Kapitola 5

- Ampong, K., M. S. Thilakarathna, and L. Y. Gorim. 2022, March 2. Understanding the Role of Humic Acids on Crop Performance and Soil Health. *Frontiers Media S.A.*
- Balík, J., P. Suran, O. Sedlář, J. Černý, M. Kulhánek, S. Procházková, D. A. Asrade, and M. Smatanová. 2023. Long-Term Application of Manure and Different Mineral Fertilization in Relation to the Soil Organic Matter Quality of Luvisols. *Agronomy* 13(11):2678.
- Banwart, S., H. Black, Z. Cai, P. Gicheru, H. Joosten, R. Victoria, E. Milne, E. Noellemeyer, and U. Pasual. 2015. The global challenge for soil carbon. In *Soil carbon: Science, Management and Policy for multiple benefits*, SCOPE Seri. ed. S. Banwart, E. Noellemeyer, and E. Milne, 1–9. Oxfordshire: CAB International.
- Barlóg, P., L. Hlisenkovský, and E. Kunzová. 2020. Effect of digestate on soil organic carbon and plant-available nutrient content compared to cattle slurry and mineral fertilization. *Agronomy* 10(3).
- Begum, K., R. Zornoza, R. Farina, R. Lemola, J. Álvaro-Fuentes, and M. Cerasuolo. 2022. Modeling Soil Carbon Under Diverse Cropping Systems and Farming Management in Contrasting Climatic Regions in Europe. *Frontiers in Environmental Science* 10 (April 8, 2022).
- Blanco, M., F. Ramos, B. Van Doorslaer, P. Martínez, D. Fumagalli, A. Ceglar, and F. J. Fernández. 2017. Climate change impacts on EU agriculture: A regionalized perspective taking into account market-driven adjustments. *Agricultural Systems* 156(May):52–66.
- Brock, C., U. Hoyer, G. Leithold, and K. J. Hülsbergen. 2012. The humus balance model (HU-MOD): A simple tool for the assessment of management change impact on soil organic matter levels in arable soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 92(3):239–254.
- Campbell, E. E., and K. Paustian. 2015. Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: A review. *Environmental Research Letters* 10(12).
- Cárceles Rodríguez, B., V. H. Durán-Zuazo, M. Soriano Rodríguez, I. F. García-Tejero, B. Gálvez Ruiz, and S. Cuadros Tavira. 2022. Conservation Agriculture as a Sustainable System for Soil Health: A Review. *Soil Systems* 6(4):1–37.



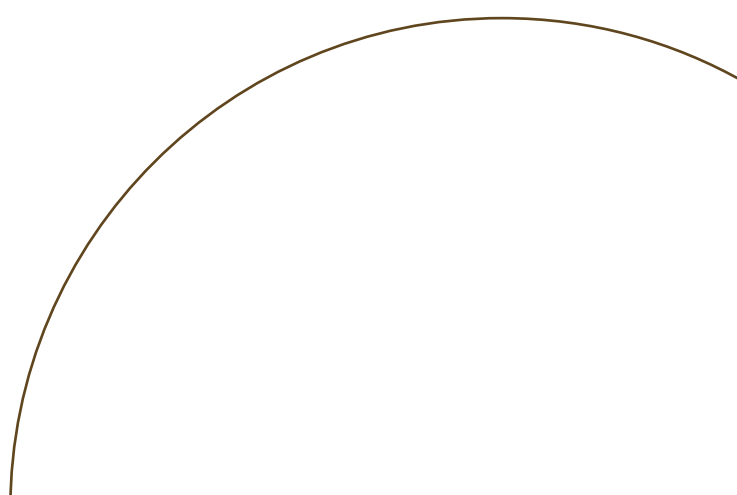
- Chaudhary, S., G. S. Dheri, and B. S. Brar. 2017. Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on carbon stabilization and management index under rice-wheat cropping system. *Soil and Tillage Research* 166 (2017):59–66.
- Chen, Y., N. Senesi, and M. Schnitzer. 1977. Information Provided on Humic Substances by E4/E6 Ratios. *Soil Science Society of America Journal* 41(2):352.
- Chen, Y., X. Zhang, H. He, H. Xie, Y. Yan, P. Zhu, J. Ren, and L. Wang. 2010. Carbon and nitrogen pools in different aggregates of a Chinese Mollisol as influenced by long-term fertilization. *Journal of Soils and Sediments* 10(6):1018–1026.
- Chiranjeev, K., N. Mahawar, S. Dhegavath, J. S. Bamboriya, G. R. Mali, T. Rupesh, S. S. Siddhartha Naik, and V. K. Meena. 2020. Soil Health: A Better Sustainable option for Nation's Food Security. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 2020(Special Issue 11):3380–3392.
- Christensen, B. T. 1996. The Askov Long-Term Experiments on Animal Manure and Mineral Fertilizers. In *Evaluation of Soil Organic Matter Models*, 301–312. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Edmeades, D. C. 2003. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 66(2):165–180.
- Gross, A., and B. Glaser. 2021. Meta-analysis on how manure application changes soil organic carbon storage. *Scientific Reports* 11(1).
- Hábová, M., L. Pospíšilová, P. Hlavinka, M. Trnka, G. Barančíková, Z. Tarasovičová, J. Takáč, Š. Koco, L. Menšík, and P. Nerušil. 2019. Carbon pool in soil under organic and conventional farming systems. *Soil and Water Research* 2019(1):1–8.
- Hasegawa, T., S. Fujimori, P. Havlík, H. Valin, B. L. Bodirsky, J. C. Doelman, T. Fellmann, P. Kyle, J. F. L. Koopman, H. Lotze-Campen, D. Mason-D'Croz, Y. Ochi, I. Pérez Domínguez, E. Stehfest, T. B. Sulser, A. Tabeau, K. Takahashi, J. Takakura, H. van Meijl, W. J. van Zeist, K. Wiebe, and P. Witzke. 2018. Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy. *Nature Climate Change* 8(8):699–703.
- Hayes, M. H. B., and R. S. Swift. 2020. Vindication of humic substances as a key component of organic matter in soil and water. In *Advances in Agronomy*, 1–37. Academic Press Inc.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jenkinson, D. S., D. E. Adams, and A. Wild. 1991. Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming. *Nature* 351(6324):304–306.
- Körschens, M., E. Albert, M. Armbruster, D. Barkusky, M. Baumecker, L. Behle-Schalk, R. Bischoff, Z. Čergan, F. Ellmer, F. Herbst, S. Hoffmann, B. Hofmann, T. Kismanyoky, J. Kubat, E. Kunzova, C. Lopez-Fando, I. Merbach, W. Merbach, M. T. Pardor, J. Rogasik, J. Rühlmann, H. Spiegel, E. Schulz, A. Tajnsek, Z. Toth, H. Wegener, and W. Zorn. 2013. Effect of mineral and organic fertilization on crop yield, nitrogen uptake, carbon and nitrogen balances, as well as soil organic carbon content and dynamics: results from 20 European long-term field experiments of the twenty-first century. *Archives of Agronomy and Soil Science* 59(8):1017–1040.
- Körschens, M., E. Albert, M. Baumecker, F. Ellmer, M. Grunert, S. Hoffmann, T. Kismanyoky, J. Kubat, E. Kunzova, M. Marx, J. Rogasik, J. Rinklebe, J. Rühlmann, C. Schilli, H. Schröter, S. Schroetter, K. Schweizer, Z. Toth, J. Zimmer, and W. Zorn. 2014. Humus und Klimaänderung- Ergebnisse aus 15 langjährigen Dauerfeldversuchen. *Archives of Agronomy and Soil Science* 60(11):1485–1517.
- Körschens, M., and A. Müller. 1996. The Static Experiment Bad Lauchstädt, Germany. In *Evaluation of Soil Organic Matter Models*. NATO ASI Series (Series I: Global Environmental Change), vol 38., ed. D. S. Powlson, P. Smith, and J. U. Smith, 369–376. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Lal, R. 2004a. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 304(5677):1623–1627.
- Lal, R. 2004b. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123(1–2):1–22.
- Lal, R. 2016a, November 1. Soil health and carbon management. Wiley-Blackwell Publishing Ltd.
- Lal, R. 2016b. Soil health and carbon management. *Food and Energy Security* 5(4):212–222.
- Lal, R. 2020a. Soil organic matter content and crop yield. *Journal of Soil and Water Conservation* 75(2):27A LP-32A.
- Lal, R. 2020b. Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. *Soil Science and Plant Nutrition* 66(1):1–9.
- Lehmann, J., D. A. Bossio, I. Kögel-Knabner, and M. C. Rillig. 2020, October 1. The concept and future prospects of soil health. Springer Nature.
- Li, X., L. Qiao, Y. Huang, D. Li, M. Xu, T. Ge, J. Meersmans, and W. Zhang. 2023. Manuring improves soil health by sustaining multifunction at relatively high levels in subtropical area. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 353(April):108539.
- Liang, S., N. Sun, S. Wang, G. Colinet, B. Longdoz, J. Meersmans, L. Wu, and M. Xu. 2023. Manure amendment acts as a recommended fertilization for improving carbon sequestration efficiency in soils of typical drylands of China. *Frontiers in Environmental Science* 11(May).
- Liu, E., C. Yan, X. Mei, Y. Zhang, and T. Fan. 2013. Long-Term Effect of Manure and Fertilizer on Soil Organic Carbon Pools in Dryland Farming in Northwest China. *PLoS ONE* 8(2).
- Lorenz, K., and R. Lal. 2018. Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems. Cham: Springer International Publishing.
- Mahmood, S., M. R. Nunes, D. A. Kane, and Y. Lin. 2023. Soil health explains the yield-stabilizing effects of soil organic matter under drought. *Soil & Environmental Health* 1(4):100048.
- Malhi, G. S., M. Kaur, and P. Kaushik. 2021, February 1. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. MDPI.
- Maltas, A., H. Kebli, H. R. Oberholzer, P. Weisskopf, and S. Sinaj. 2018. The effects of organic and mineral fertilizers on car-

- bon sequestration, soil properties, and crop yields from a long-term field experiment under a Swiss conventional farming system. *Land Degradation and Development* 29(4):926–938.
- Meena, H. M., and R. P. Sharma. 2016. Long-Term Effect of Fertilizers and Amendments on Different Fractions of Organic Matter in an Acid Alfisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 47(11):1430–1440.
- Menšík, L., L. Hliseníkovský, L. Pospíšilová, and E. Kunzová. 2018. The effect of application of organic manures and mineral fertilizers on the state of soil organic matter and nutrients in the long-term field experiment. *Journal of Soils and Sediments* 18(8):2813–2822.
- Möller, K. 2015. Effects of anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions, and soil biological activity. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 35(3):1021–1041.
- Möller, K., and T. Müller. 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences* 12(3):242–257.
- Naikwade, P. V. 2019. Soil Organic Carbon Sequestration by Long-Term Application of Manures Prepared from *Trianthema portulacastrum* Linn. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 50(20):2579–2592.
- Nkoa, R. 2014. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34(2):473–492.
- Oelbermann, M., R. W. Jiang, and M. A. Mechler. 2023. Predicting changes in soil organic carbon after a low dosage and one-time addition of biochar blended with manure and nitrogen fertilizer. *Frontiers in Soil Science* 3 (2023).
- Olesen, J. E., M. Trnka, K. C. Kersebaum, A. O. Skjelvåg, B. Seguin, P. Peltonen-Sainio, F. Rossi, J. Kozyra, and F. Micale. 2011. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy* 34(2):96–112.
- Orlov, D. S., O. N. Biryukova, and M. S. Rozanova. 2004. Revised system of the humus status parameters of soils and their genetic horizons. *Eurasian Soil Science* 37 (2004):798–805.
- Pospíšilová, L., A. Žigová, M. Šťastný, and T. Liptaj. 2012. Humic acids quality of cambisols developed on gneiss and amphibolite. *Acta Geodyn. Geomater.* 9(4):503–510.
- Rayne, N., and L. Aula. 2020, December 1. Livestock manure and the impacts on soil health: A review. MDPI AG.
- Rojas, R. V., M. Achouri, J. Maroulis, and L. Caon. 2016. Healthy soils: a prerequisite for sustainable food security. *Environmental Earth Sciences* 75(3).
- Senesi, N., C. Plaza, G. Brunetti, and A. Polo. 2007. A comparative survey of recent results on humic-like fractions in organic amendments and effects on native soil humic substances. *Soil Biology and Biochemistry* 39(6):1244–1262.
- Sinaj, S., W. Richner, R. Flisch, and R. Charles. 2009. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages (DBF-GCH). *Revue suisse d'agriculture* 41 (2009):1–98.
- Smith, P., D. Powlson, M. Glendinning, and J. Smith. 1997. Potential for carbon sequestration in European soils: preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments. *Global Change Biology* 3(1):67–79.
- Song, X., S. Liu, Q. Liu, W. Zhang, and C. Hu. 2014. Carbon Sequestration in Soil Humic Substances Under Long-Term Fertilization in a Wheat-Maize System from North China. *Journal of Integrative Agriculture* 13(3):562–569.
- Srivastava, P., R. Singh, S. Tripathi, H. Singh, and A. S. Raghubanshi. 2016. Soil carbon dynamics and climate change: current agro-environmental perspectives and future dimensions. *Energy, Ecology and Environment* 1(5):315–322.
- Steenwerth, K. L., M. P. Reynolds, S. Sandoval Solis, W. M. Sisco, M. N. Lubell, S. Msangi, R. Prabhu, M. Springborn, E. K. Wollenberg, L. S. Jarvis, L. E. Jackson, P. Tittone, S. M. Wheeler, S. J. Vermeulen, A. Cattaneo, C. J. Chartres, J. L. Hatfield, A. K. Hodson, A. J. Bloom, M. R. Carter, K. Henry, E. Kebreab, R. Leemans, L. Lipper, J. W. Hopmans, W. R. Horwath, and B. M. Jenkins. 2014. Climate-smart agriculture global research agenda: scientific basis for action [electronic resource]. *Agriculture and food security* 3(1):56.
- Sünnemann, M., R. Beugnon, C. Breitzkreuz, F. Buscot, S. Cesarz, A. Jones, A. Lehmann, A. Lochner, A. Orgiazzi, T. Reitz, M. C. Rillig, M. Schädler, L. C. Smith, A. Zeuner, C. A. Guerra, and N. Eisenhauer. 2023. Climate change and cropland management compromise soil integrity and multifunctionality. *Communications Earth and Environment* 4(1).
- Swift, R. S. 1999. Macromolecular properties of soil humic substances: Fact, fiction, and opinion. *Soil Science* 164(11):790–802.
- Swift, R. S. 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil Science* 166(11):858–871.
- Tadiello, T., M. Acutis, A. Perego, C. Schillaci, and E. Valkama. 2023. Soil organic carbon under conservation agriculture in Mediterranean and humid subtropical climates: Global meta-analysis. *European Journal of Soil Science* 74(1):1–22.
- Thomsen, I. K., J. E. Olesen, H. B. Møller, P. Sørensen, and B. T. Christensen. 2013. Carbon dynamics and retention in soil after anaerobic digestion of dairy cattle feed and faeces. *Soil Biology and Biochemistry* 58 (March 2013):82–87.
- Tiwari, J., A. L. RAMANATHAN, K. BAUDDH, and J. KORSTAD. 2023. Humic substances: Structure, function and benefits for agroecosystems—a review. *Pedosphere* 33(2):237–249.
- Tiwari, V. N., K. N. Tiwari, and R. M. Upadhyay. 2000. Effect of Crop Residues and Biogas Slurry Incorporation in Wheat on Yield and Soil Fertility. *Journal of the Indian Society of Soil Science* 48 (2000):515–520.
- Toor, G. S., Y. Y. Yang, S. Das, S. Dorsey, and G. Felton. 2021. Soil health in agricultural ecosystems: Current status and future perspectives. In *Advances in Agronomy*, 157–201. Academic Press Inc.
- Trnka, M., R. Brázdil, M. Dubrovský, D. Semerádová, P. Štěpánek, P. Dobrovolný, M. Možný, J. Eitzinger, J. Málek, H. Formayer, J. Balek, and Z. Žalud. 2011. A 200-year climate record in Central Europe: implications for agriculture. *Agronomy for Sustainable Development* 31(4):631–641.
- Trnka, M., R. P. Rötter, M. Ruiz-ramos, K. C. Kersebaum, J. E. Olesen, Z. Žalud, and M. A. Semenov. 2014. Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nature Climate Change* 4(May):637–643.
- Vanlauwe, B., T. Amede, A. Bationo, P. Bindraban, H. Breman, R. Cardinael, A. Couédel, P. Chivenge, M. Corbeels, A. Do-

- bermann, F. Gatién, W. Fatunbi, K. Giller, R. Harawa, M. Kamau, R. Merckx, C. Palm, D. Powlson, L. Rusinamhodzi, J. Six, U. Singh, Z. Stewart, M. van Ittersum, C. Witt, S. Zingore, and R. Groot. 2023. Fertilizer and Soil Health in Africa: The Role of Fertilizer in Building Soil Health to Sustain Farming and Address Climate Change (January):81.
- Vidyasagar, G. 2018. Influence of Organic Manures Integrated with Inorganic Fertilizer on Soil Properties After Harvest of Crops in Maize-Groundnut Crop Sequence Influence of Organic Manures Integrated with Inorganic Fertilizer on Soil Properties After Harvest of Crops in Maize. *Environment and Ecology* (July 2017).
- Voltr, V., L. Menšík, L. Hlisnikovský, M. Hruška, E. Pokorný, and L. Pospíšilová. 2021. The Soil Organic Matter in Connection with Soil Properties and Soil Inputs. *Agronomy* 11(4):779.
- Wang, C., N. He, J. Zhang, Y. Lv, and L. Wang. 2015a. Long-term grazing exclusion improves the composition and stability of soil organic matter in Inner Mongolian grasslands. *PLoS ONE* 10(6):1–12.
- Wang, J., K. Wang, X. Wang, Y. Ai, Y. Zhang, and J. Yu. 2018. Carbon sequestration and yields with long-term use of inorganic fertilizers and organic manure in a six-crop rotation system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 111(1):87–98.
- Wang, Y., N. Hu, M. Xu, Z. Li, Y. Lou, Y. Chen, C. Wu, and Z. L. Wang. 2015b. 23-Year Manure and Fertilizer Application Increases Soil Organic Carbon Sequestration of a Rice–Barley Cropping System. *Biology and Fertility of Soils* 51(5):583–591.
- Wiebe, K., S. Robinson, and A. Cattaneo. 2019. Climate Change, Agriculture and Food Security. In *Sustainable Food and Agriculture*, ed. C. Campanhola and S. Pande, 55–74. Elsevier Inc.
- Yang, X., X. Zhang, H. Fang, P. Zhu, J. Ren, and L. Wang. 2003. Long-term effects of fertilization on soil organic carbon changes in continuous corn of northeast China: RothC model simulations. *Environmental Management* 32 (2003):459–465.
- Zhao, X., K. Hu, and K. Stahr. 2013. Simulation of SOC content and storage under different irrigation, fertilization and tillage conditions using EPIC model in the North China Plain. *Soil and Tillage Research* 130 (2013):128–135.
- Kapitola 6**
- Balkovič, J., M. Madaras, R. Skalský, C. Folberth, M. Smatanová, E. Schmid, M. van der Velde, F. Kraxner, and M. Obersteiner. 2020. Verifiable soil organic carbon modelling to facilitate regional reporting of cropland carbon change: A test case in the Czech Republic. *Journal of Environmental Management* 274 (November 15, 2020).
- Madaras, M., J. Balkovič, R. Skalský. 2017. EPIC model based search of agronomic strategies for increasing SOC (case study). Dostupné online: <https://jahnresearchgroup.cals.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/223/2017/08/9.-Madaras-et-al..pdf>
- Menšík L., L. Hlisnikovský, L. Pospíšilová, T. Šimon and E. Kunzová. 2023b. The effect of organic and mineral fertilizers on soil organic carbon content, humus fractions, nutrients, and yields: evaluation of the long-term conventional field experiment in the view of expecting climate change. (nepublikováno).
- Menšík L., E. Kunzová, M. Madaras, P. Nerušil and L. Pospíšilová L. 2020b. Zpracování významu hnojení statkovými hnojivami na ornou půdu „Význam hnojení statkovými hnojivami na ornou půdu na základě provozních pokusů zhotovitele a dalších zjištění na základě porovnání působení hnojiv živočišného původu s ostatními hnojivami“. Studie. Zakázka ÚZEI, č. j. SML0084/2020. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha. 68 s.
- Menšík L., J. Hakl, P. Nerušil, E. Kunzová, M. Madaras and V. Smutný. 2020a. Stanovení půdně klimatických podmínek pro rozšíření vojtěšky- Doporučené technologické postupy, odhad výnosů vojtěšky, počet sklizní v daných podmínkách, lokální doporučení v konkrétních podmínkách půdního bloku s předpokladem doporučení pěstování na souvratích. Přílohy. Zakázka ÚZEI, č. j. SML0043/2020. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha. 30 s.
- Menšík L., L. Hlisnikovský, E. Kunzová, L. Pospíšilová, J. Kulhavý 2020c. Půdní organická hmota (SOM)- klíčová součást agroekosystémů a lesních ekosystémů při adaptaci na změnu klimatu. Přednáška na odborné konferenci: Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnících se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota) /online/. 12. 12. 2020, Praha (CZ).
- Menšík L., L. Hlisnikovský, E. Kunzová, P. Nerušil and L. Pospíšilová. 2022b. Monitoring stavu půdní organické hmoty v zemědělských podnicích v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny. In Menšík, L., Kunzová, E., Madaras, M. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnících se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota), 2. ročník. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha – Ruzyně, 2022, s. 18–19. ISBN 978-80-7427-401-5
- Menšík L., L. Pospíšilová, E. Kunzová, L. Hlisnikovský, T. Šimon, J. Plisková, P. Nerušil, J. Klír and M. Madaras. 2022a. Frakcionace humusových látek zemědělských půd – Kvantita a kvalita organické hmoty v agroekosystémech. WORKSHOP 2022 - Organická hmota „Budoucnost organické hmoty pro půdy v ČR – kompost, statková hnojiva, digestát, kaly“, 10–11.11.2022, Náměšť nad Oslavou (CZ).
- Menšík L., Pospíšilová L., Kunzová E., Hlisnikovský L., Šimon T., Nerušil P., Klír J. and Madaras M. 2023a. Význam půdní organické hmoty „Kvantita a kvalita organické hmoty v agroekosystémech – výzkum ve VÚRV, v.v.i. Přednáška. Workshop „Kategorizace zemědělské půdy“ 19.10.2023, ÚZEI, Praha, CZ
- Menšík, L., and P. Nerušil. 2019. Produkční, kvalitativní a porostové změny trvalého lučního společenstva ve vztahu k intenzitě využívání a úrovni hnojení v oblasti Malé Hané. 1. vydání. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.
- Menšík, L., L. Hlisnikovský, and E. Kunzová. 2019. The State of the Soil Organic Matter and Nutrients in the Long-Term Field Experiments with Application of Organic and Mineral Fertilizers in Different Soil-Climate Conditions in the View of Expecting Climate Change. In *Organic Fertilizers-History, Production and Applications*, ed. M. L. Larramendy and S. Soloneski, 23–42. IntechOpen.
- Menšík, L., L. Hlisnikovský, L. Pospíšilová, and E. Kunzová. 2018. The effect of application of organic manures and mineral fertilizers on the state of soil organic matter and nutrients in the long-term field experiment. *Journal of Soils and Sediments* 18(8):2813–2822.

- Stehlík, M., M. Madaras, M. Kroulík. 2020. Modelling of soil organic carbon in a long-term experiment Trutnov: climate scenarios with shifted precipitation, temperature and CO<sub>2</sub> concentration. International Conference of Young Scientists ICYS 2020, 14-15th September 2020, Prague.
- Souhrn / Summary**
- Lin, Y., G. Ye, Y. Kuzyakov, D. Liu, J. Fan, and W. Ding. 2019. Long-term manure application increases soil organic matter and aggregation, and alters microbial community structure and keystone taxa. *Soil Biology and Biochemistry* 134(November 2018):187–196.
- Lorenz, K., and R. Lal. 2018. *Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems*. Cham: Springer International Publishing.
- Masoudi, M., C. Centeri, M. Karlik, and G. Jakab. 2023. Extracted samples and in situ soil investigations to assess the effects of different land use and tillage management practices on soil organic matter composition. *Land Degradation & Development* 34(9):2560–2572.
- Ondrasek, G., H. Bakić Begić, M. Zovko, L. Filipović, C. Meriño-Gergichevich, R. Savić, and Z. Rengel. 2019. Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications. *Science of The Total Environment* 658 (March 2019):1559–1573.
- Rayne, N., and L. Aula. 2020, December 1. Livestock manure and the impacts on soil health: A review. MDPI AG.
- Reeves, D. W. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research* 43(1–2):131–167.
- Robertson, G. P., K. L. Gross, S. K. Hamilton, D. A. Landis, T. M. Schmidt, S. S. Snapp, and S. M. Swinton. 2014. Farming for ecosystem services: An ecological approach to production agriculture. *BioScience* 64(5):404–415.
- Wang, H., J. Xu, X. Liu, D. Zhang, L. Li, W. Li, and L. Sheng. 2019. Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China. *Soil and Tillage Research* 195(July):104382.





## SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A ZKRATEK

### Obrázky

- Obr. 2.1: Globální změny v současném zemědělství (upraveno dle Meena, Lal 2018).
- Obr. 2.2: Různé typy degradace půdy s nepříznivými dopady na obsah organické hmoty v půdě /SOM/ (upraveno dle Lal 2020).
- Obr. 2.3: Schéma tvorby humusových látek v půdě (upraveno dle Kononova 1963; Sotáková 1982; Stevenson 1994; Ouni et al. 2014; Guo et al. 2019; Tiwari et al. 2023).
- Obr. 2.4: Rozdělení organických látek v půdě a klasifikace humusových látek (Brady, Weil 2008, vlevo) a frakcionace půdní organické hmoty /SOM/ (Stevenson 1994; Sparks 2003, vpravo).
- Obr. 2.5: Mapa rozložení obsahu skutečného organického uhlíku (SOC, %) v povrchových vrstvách zemědělské půdy (0–30 cm) v evropských zemích, Grid 1 x 1 km, European Soil Database (Jones et al. 2005, vlevo) a mapa předpokládaných zásob organického uhlíku (SOC, %) v povrchových vrstvách zemědělské půdy (0–30 cm) v evropských zemích, Grid 1 x 1 km, European Soil Database (Lugato et al. 2014, vpravo).
- Obr. 2.6: Mapa koncentrace SOC v povrchových vrstvách zemědělské půdy (0–30 cm) v ČR (Žižala et al. 2020).
- Obr. 2.7: Celková změna SOC ( $\Delta$  SOC v období 2009–2018) v hloubce 0–20 cm v EU a Spojeném království stanovená pomocí qGAM v období 2009–2018 pro (a) q0,5, (b) q0,25 a (c) q0,75. (d) Průměrná změna obsahu SOC ( $\Delta$  SOC) podle šířky u modelu qGAM a DayCent. Linie v mapě vymezují studované oblasti a nemusí nutně znázorňovat státní hranice. qGAM - kvantilový zobecněný aditivní model; SOC- půdní organický uhlík, q- kvantil (De Rosa et al. 2024).
- Obr. 4.1.1: Letecký snímek RFE v Praze-Ruzyni s experimentálními hony I–V (Šrek et al. 2010, Hlisenkovský et al. 2016). Latinská čísla (I–V) označují experimentální hony. Pět experimentálních honů bylo opuštěno z důvodu záboru pozemků pro výstavbu silnic v devadesátých letech.
- Obr. 4.1.2: Analýza PCA půdních vlastností (pH,  $C_{org}$ , HL, HK, FK, poměr HK/FK, SH, poměr  $Q_{4/6}$ , obsah Nt, P, K a Mg) v hloubce 0–30 cm, v období 2014–2016 ve variantách hnojení.
- Obr. 4.1.3: Faktorová analýza (graf faktorových vah a rozptylový diagram komponentního skóre) půdních vlastností v hloubce 0–30 cm v období 2014–2016 ve variantách hnojení (zdrojové matice dat: metoda bez rotace /nahore/, metoda Varimax normalizovaný /dole/).
- Obr. 4.1.4: Dendrogram objektů půdních vlastností a variant hnojení zdrojové matice dat (Wardova metoda /nahore/, Vážený průměr skupiny dvojic /dole/).
- Obr. 4.1.5: Grafický abstrakt k dílčímu závěru.
- Obr. 4.2.1: Přehledová mapa VOP pokusů Výzkumného ústavu rostlinné výroby, v.v.i. v ČR.
- Obr. 4.2.2: Obsah uhlíku ( $C_{org}$ ), dusíku ( $N_{tot}$ ) a poměr C/N v období 2012–2015.
- Obr. 4.2.3: Regresní lineární závislost obsahu  $N_{tot}$  na  $C_{org}$  v období 2012–2015.
- Obr. 4.2.4: Půdní reakce (pH KCl) v období (2012–2015).
- Obr. 4.2.5: Přístupné živiny (fosfor, draslík) v období 2012–2015.
- Obr. 4.2.6: Regresní lineární závislost obsahu K ( $mg \cdot kg^{-1}$ ) na P ( $mg \cdot kg^{-1}$ ) v období 2012–2015.
- Obr. 4.2.7: Přístupné živiny (vápník, hořčík) v období 2012–2015.
- Obr. 4.2.8: Analýza PCA půdních vlastností – organická hmota ( $C_{org}$ ,  $N_{tot}$ ), přístupné živiny (P, K, Ca, Mg) a půdní reakce (pH) v období 2012–2015.
- Obr. 4.2.9: Faktorová analýza (FA) půdních vlastností – organická hmota ( $C_{org}$ ,  $N_{tot}$ ), přístupné živiny (P, K, Ca, Mg) a půdní reakce (pH) v období 2012–2015.
- Obr. 4.2.10: CLU analýza půdních vlastností – organická hmota ( $C_{org}$ ,  $N_{tot}$ ), přístupné živiny (P, K, Ca, Mg) a půdní reakce (pH) v období 2012–2015.
- Obr. 4.3.1: Dlouhodobý pokus se statkovým a organickým hnojením na VS Jevíčko, VÚRV, v.v.i. (foto. L. Menšík).
- Obr. 4.3.2: Průměrné hodnoty pH a přístupných živin (P, K, Ca, Mg) při 4sečném využití TTP ve variantách hnojení za období 2016–2019 (L- osa vlevo, R- osa vpravo).
- Obr. 4.3.3: Průměrné hodnoty pH a přístupných živin (P, K, Ca, Mg) při 3sečném využití TTP ve variantách hnojení za období 2016–2019 (L- osa vlevo, R- osa vpravo).
- Obr. 4.3.4: Průměrné hodnoty pH a přístupných živin (P, K, Ca, Mg) při 2sečném využití TTP ve variantách hnojení za období 2016–2019 (L- osa vlevo, R- osa vpravo).
- Obr. 4.3.5: Vícerozměrná matematicko-statistická analýza (PCA) parametrů půdy (pH, obsah C, N, poměr C/N a obsah přístupných živin P, K, Mg, Ca) v hloubce 0–15 cm při 4, 3

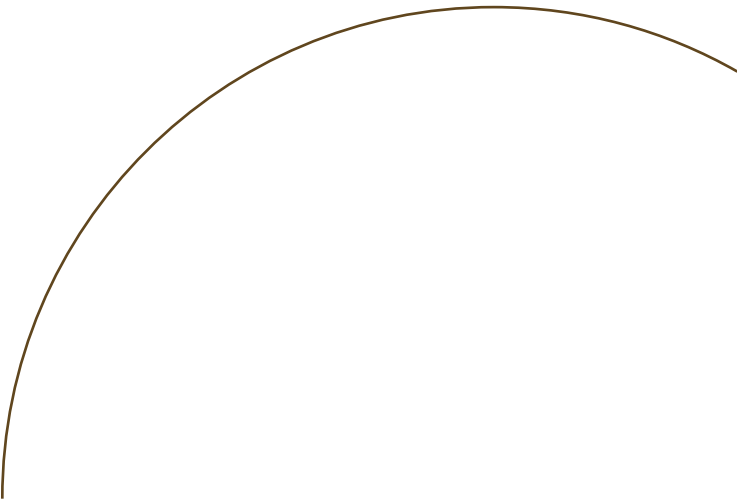
- a 2sečném systému obhospodařování TTP ve variantách hnojení za období 2016–2019.
- Obr. 4.3.6: Vícerozměrná matematicko-statistická analýza (FA) parametrů půdy (pH, obsah C, N, poměr C/N a obsah přístupných živin P, K, Mg, Ca) v hloubce 0–15 cm při 4, 3 a 2sečném obhospodařování TTP ve variantách hnojení za období 2016–2019.
- Obr. 4.3.7: Grafický abstrakt k dílčímu závěru.
- Obr. 4.4.1: Lokalizace poloprovozních pokusů AGROSPOL, a.d. v Boskovické brázdě (Malá Haná).
- Obr. 4.4.2: Lokalizace poloprovozních pokusů ZD Lipová, družstvo a AGROSPOL, a.d. na Dražanské vrchovině.
- Obr. 4.4.3: Analýza PCA půdních vlastností (pH,  $C_{org}$ , HL, HK, FK,  $Q_{4/6}$ , obsah P, K, Mg, Ca, IH, IR) v hloubce 0–30 cm v období 2018–2019 ve variantách poloprovozních pokusů.
- Obr. 4.4.4: Graf faktorových vah a rozptylový diagram komponentního skóre půdních vlastností (zdrojové matice dat- metoda Varimax normalizovaný) v hloubce 0–30 cm v období 2018–2019 ve variantách poloprovozních pokusů.
- Obr. 4.4.5: Dendrogram objektů půdních vlastností v hloubce 0–30 cm v období 2018–2019 ve variantách poloprovozních pokusů zdrojové matice dat zpracovaný Wardovou metodou.
- Obr. 4.4.6: Grafický abstrakt k dílčímu závěru.
- Obr. 4.5.1: Obecné schéma tvorby SOC a HWEK.
- Obr. 4.5.2: Základní charakteristika souboru experimentálních polí (lokalit) pro SOC v období 2008–2018 pro jednotlivé půdní typy.
- Obr. 4.5.3: Základní charakteristika souboru experimentálních polí (lokalit) pro HWEK v období 2008–2018 pro jednotlivé půdní typy.
- Obr. 4.5.4: Průměrný vstup N (celkový a minerální) do půdy v hnojivech za období 2008–2018 pro jednotlivé půdní typy.
- Obr. 4.5.5: Průměrný vstup P a K (minerální) do půdy v hnojivech v období 2008–2018 pro jednotlivé půdní typy.
- Obr. 4.5.6: Vývojové schéma pro model Rozdíl obsahu HWEK (období 2016–2018).
- Obr. 4.5.7: Analýza reziduí pro vícerozměrný lineární regresní model pomocí (a) L-R graf, (b) Pregibonův graf, (c) Jackknife rezidua graf a (d) graf predikovaných reziduí (Rozdíl obsahu HWEK /období 2016–2018/).
- Obr. 4.5.8: Vývojové schéma pro model Závislost rozdílu SOC mezi roky 2018 a 2008.
- Obr. 4.5.9: Analýza reziduí pro vícerozměrný lineární regresní model pomocí (a) L-R graf, (b) Pregibonův graf, (c) Jackknife rezidua graf a (d) graf predikovaných reziduí (Závislost rozdílu SOC mezi roky 2018 a 2008).
- Obr. 4.6.1: Skutečné a simulované obsahy SOC ve variantách dlouhodobého pokusu v Trutnově (FYM- hnůj, StrawN- aplikace slámy s dusíkem, control - nehnojeno). U měřených hodnot označuje šířka pásů rozptyl mezi opakováními příslušné varianty.
- Obr. 4.6.2: Simulace vývoje obsahu SOC při různých scénářích sledu plodin a intenzity kultivace půdy. Pásy zobrazují rozsahy, které závisí na intenzitě kultivace půdy – dolní hranice pásu představuje konvenční zpracování půdy a horní hranice minimalizaci (žádná kultivace).
- Obr. 4.6.3: Simulace vlivu zvýšení koncentrace  $CO_2$  a zvýšení průměrné teploty na obsahy SOC po 45 letech trvání pokusu.
- Obr. 4.6.4: Vliv inaktivace erozního modulu modelu EPIC na vývoj SOC při minerálním hnojení bez statkových hnojiv, s aplikací hnoje a se zaorávkou slámy (simulováno při 540 ppm  $CO_2$ ).
- Obr. 4.6.5: Simulované regiony s lokalizací dlouhodobých pokusů a schématem struktury regionálního rastrového modelu (oranžová barva – informace o orné půdě, modrá barva – meteorologické vstupy, červená barva – vstupy o hospodaření na půdě).
- Obr. 4.6.6: Simulované (čára) a měřené (body) hodnoty pro a) obsah půdního organického uhlíku ve vrstvě 0–25 cm, b) výnosy sušiny na nehnojených parcelách dlouhodobých polních pokusů.
- Obr. 4.6.7: Výsledky simulací změn obsahu SOC (v t C.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>) pro půdy třech regionů a pět scénářů hnojení. Výsledky jsou prezentovány pro vyvážený osevný sled odvozený od dlouhodobých pokusů (LTERot), pro (pravděpodobné) aktuální osevní sledy v regionech (CRot) a pro monokultury hlavních plodin (CMon). Hnědé pruhy vyjadřují distribuci četnosti ve výpočetních buňkách 1x1 km (bílý proužek – průměr), značka pozici dlouhodobého pokusu v rámci variability půd regionu.

## Tabulky

- Tab. 4.1.1: Průměrné dávky živin aplikované do půdy minerálními a statkovými hnojivy (kg.ha<sup>-1</sup>).
- Tab. 4.1.2: Faktorové váhy a příspěvky daného faktoru do komunity pro jednotlivé znaky po rotaci Varimax normalizovaný.
- Tab. 4.2.1: Základní výrobní a klimatické podmínky stanovišť.
- Tab. 4.2.2: Klimatické podmínky (teplota, srážky) ve sledovaném období (2012–2015).
- Tab. 4.2.3: Faktorové váhy a příspěvky daného faktoru do komunity pro jednotlivé znaky v období 2012–2015.
- Tab. 4.3.1: Modelové zatížení, dávky minerálních, statkových a organických hnojiv, termíny aplikací.
- Tab. 4.3.2: Faktorové váhy a příspěvky daného faktoru do komunity pro jednotlivé znaky po rotaci Varimax normalizovaný půdních vlastností (pH, obsah C, N, poměr C/N a obsah přístupných živin P, K, Mg, Ca) v hloubce 0–15 cm při 4, 3 a 2sečném systému obhospodařování TTP ve variantách hnojení za období 2016–2019.
- Tab. 4.4.1: Souhrnný přehled poloprovozních ploch v období 2018–2019 (Agrospol Knínice, a.d., ZD Lipová, družstvo).
- Tab. 4.4.2: Faktorové váhy a příspěvky daného faktoru do komunity pro jednotlivé znaky po rotaci Varimax normalizovaný půdních vlastností v hloubce 0–30 cm v období 2018–2019 ve variantách poloprovozních pokusů.
- Tab. 4.5.1: Charakteristika klimatických regionů v ČR.
- Tab. 4.5.2: Vícerozměrný lineární regresní model pro Rozdíl obsahu HWEK (období 2016–2018).
- Tab. 4.5.3: Zpřesněný vícerozměrný lineární regresní model pro Rozdíl HWEK (období 2016–2018).
- Tab. 4.5.4: Vícerozměrný lineární regresní model pro Závislost rozdílu SOC mezi roky 2018 a 2008.
- Tab. 4.5.5: Zpřesněný vícerozměrný lineární regresní model pro Závislost rozdílu SOC mezi roky 2018 a 2008.

## Zkratky

|                  |                                                                                                 |                               |                                                                              |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| °C               | - stupeň Celsia                                                                                 | Mt                            | - megatuna (1 megatuna = $1,0 \times 10^9$ kg)                               |
| A                | - absorbance                                                                                    | MZe ČR                        | - Ministerstvo zemědělství České republiky                                   |
| AIC              | - Akaikeovo informační kritérium                                                                | N                             | - dusík                                                                      |
| BPEJ             | - bonitovaná půdně ekologická jednotka                                                          | NaOH                          | - hydroxid sodný                                                             |
| C                | - uhlík                                                                                         | NAZV                          | - Národní agentura pro zemědělský výzkum                                     |
| Ca               | - vápník                                                                                        | nm                            | - nanometr                                                                   |
| CCRFE            | - Čáslav                                                                                        | NPK                           | - minerální hnojení                                                          |
| Cd               | - kadmium                                                                                       | Nt ( $N_{\text{tot}}$ )       | - celkový dusík                                                              |
| CEC              | - kationtová výměnná kapacita                                                                   | OL                            | - organická látka                                                            |
| CLU              | - analýza shluků                                                                                | OM                            | - organická hmota                                                            |
| cm               | - centimetr                                                                                     | OSN (UN)                      | - United Nations (Organizace spojených národů)                               |
| CO <sub>2</sub>  | - oxid uhličitý                                                                                 | P                             | - fosfor                                                                     |
| Crot             | - osevní postup                                                                                 | p                             | - statistická významnost                                                     |
| CS               | - kejda skotu                                                                                   | P1-9                          | - experimentální pole                                                        |
| č.ž.             | - čisté živiny                                                                                  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | - oxid fosforečný                                                            |
| ČHMÚ             | - Český hydrometeorologický ústav                                                               | Pb                            | - olovo                                                                      |
| ČR               | - Česká republika                                                                               | PB                            | - půdní blok                                                                 |
| DJ               | - dobytčí jednotka                                                                              | PCA                           | - analýza hlavních komponent                                                 |
| DKRVO            | - dlouhodobé koncepce rozvoje výzkumné organizace                                               | Pg                            | - petagram (1 petagram = $1000000000000$ kg)                                 |
| ESM              | - Earth System Models                                                                           | pH                            | - půdní reakce                                                               |
| EU               | - Evropská unie                                                                                 | ppm                           | - parts per million (dílů či částic na jeden milion)                         |
| FA               | - faktorová analýza                                                                             | PZ                            | - precizním zemědělství                                                      |
| FAO              | - Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organizace pro výživu a zemědělství) | Q <sub>4/6</sub>              | - barevný kvocient                                                           |
| FK               | - fulvokyselina                                                                                 | qGAM                          | - kvantilový zobecněný aditivní model                                        |
| FYM              | - hnůj                                                                                          | r                             | - korelační koeficient                                                       |
| Gt               | - gigatuna (1 gigatuna = $1,0 \times 10^{12}$ kg)                                               | R <sup>2</sup>                | - koeficient determinace                                                     |
| GZK              | - globální změna klimatu                                                                        | RFE                           | - dlouhodobé polní výživářské pokusy VÚRV, v.v.i. (Praha-Ruzyně)             |
| ha               | - hektar                                                                                        | S                             | - obsah bází                                                                 |
| Hg               | - rtuť                                                                                          | SH                            | - stupeň humifikace                                                          |
| HK               | - huminová kyselina                                                                             | SOC (C <sub>org</sub> )       | - půdní organický uhlík                                                      |
| HL               | - humusové látky                                                                                | SOM                           | - půdní organická hmota                                                      |
| HU               | - humin                                                                                         | St                            | - sláma                                                                      |
| HWEC             | - uhlík rozpuštěný v horké vodě                                                                 | T                             | - kationtová výměnná kapacita                                                |
| ICP-OES          | - optické emisní spektrometrie s indukčně vázanou plazmou                                       | t                             | - tuna                                                                       |
| ICRFE            | - Ivanovice na Hané                                                                             | TTP                           | - trvalý travní porost                                                       |
| IH               | - index rozkladu                                                                                | UK                            | - Spojené království (Velká Británie)                                        |
| IR               | - index hydrofobicity                                                                           | UV-VIS                        | - ultrafialovo-viditelná spektroskopie                                       |
| K                | - draslík                                                                                       | V (SEBCT)                     | - nasycení sorpčního komplexu bázemi                                         |
| K <sub>2</sub> O | - oxid draselný                                                                                 | v.v.i.                        | - veřejná výzkumná instituce                                                 |
| KCl              | - chlorid draselný                                                                              | VOP                           | - výživářské osevní pokusy VÚRV, v.v.i. (Čáslav, Lukavec, Ivanovice na Hané) |
| kg               | - kilogram                                                                                      | VS                            | - výzkumná stanice                                                           |
| KPP              | - Komplexní průzkum půd                                                                         | VT                            | - výzkumný tým                                                               |
| LAV              | - ledek amonný s vápencem                                                                       | VÚRV                          | - Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.                                    |
| LCRFE            | - Lukavec                                                                                       | VZ                            | - výzkumný záměr                                                             |
| m                | - metr                                                                                          | ZD                            | - zemědělské družstvo                                                        |
| m n. m.          | - metrů nad mořem                                                                               | Zn                            | - zinek                                                                      |
| MEP              | - střední kvadratická chyba predikce                                                            | Δ                             | - delta (rozdíl)                                                             |
| Mg               | - hořčík                                                                                        |                               |                                                                              |
| mg               | - miligram                                                                                      |                               |                                                                              |
| MLR              | - vícerozměrná lineární regrese                                                                 |                               |                                                                              |
| mm               | - milimetr                                                                                      |                               |                                                                              |



## PODĚKOVÁNÍ

Tato publikace vznikla k 72. výročí založení Výzkumného ústavu rostlinné výroby, v.v.i. (1951) a dále k 65. výročí založení Výzkumné stanice v Jevíčku (1958).

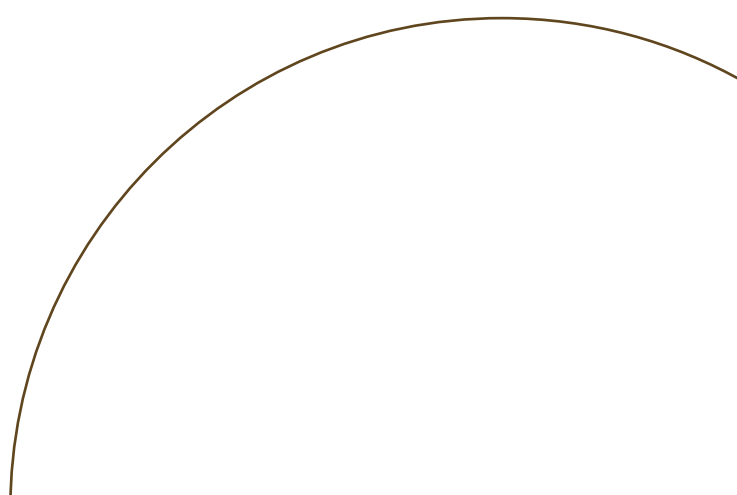
Publikace vznikla díky finanční podpoře Ministerstva zemědělství České republiky v rámci dlouhodobé koncepce rozvoje výzkumné organizace (DKRVO) RO-0423, Výzkumného ústavu rostlinné výroby, v.v.i. v rámci výzkumného záměru (VZ02) „Kvalita půdy a biodiverzita půdních mikroorganismů v kontextu měnícího se klimatu“, která navazuje na předcházející DKRVO RO-0418 řešenou v období 2016–2022 (výzkumné záměry „VZ07 – Pěstování pícnin na orné půdě a obhospodařování TTP pro udržení biodiverzity, půdní úrodnosti, kvality a bezpečnosti krmiv, VZ03 – Hospodaření se živinami v agrosystémech pro udržení kvality a zdraví půdy v měnících se podmínkách prostředí, VZ04 – Půdní úrodnost v agrosystémech a VP SOM – Půdní organická hmota (SOM) - klíčová složka agroekosystémů v adaptaci na změnu klimatu /GZK/“). Dále je publikace součástí projektů NAZV: QK21010124 „Půdní organická hmota – hodnocení vybraných indikátorů kvality“, QK21020155 „Nástroj pro hospodaření se živinami a organickými látkami“ a QK23020056 „Vytvoření a ověření modelových systémů dlouhodobé sekvestrace uhlíku v ČR“.

Tisk monografie byl umožněn za podpory Ministerstva zemědělství ČR při České technologické platformě pro zemědělství.

Poděkování dále patří:

- bývalým vědeckým pracovníkům VÚRV, v.v.i.: Dr. M. Škardovi, Dr. J. Baierovi, Dr. V. Macháčkovi, Dr. J. Kubátovi, Dr. J. Lipavskému;
- současným členům týmů VT03, VT07: Daně Večeřové, Petru Ivičicovi, Vlastimilu Basařovi, Ing. Jaroslavu Málkovi, Ing. Monice Mlčochové, Pavle Zelníčkové a panu Radkovi Musilovi za technickou podporu a zabezpečení terénních prací na výzkumných plochách a provádění laboratorních rozborů;
- bývalým a současným vedoucím a pracovníkům Pokusných stanic VÚRV, v.v.i. (Čáslav, Ivanovice na Hané, Pernolec), dále Soukromé výzkumné stanici v Lukavci u Pacova za zabezpečení terénních prací na dlouhodobých výzkumných plochách;
- zemědělským společností (AGROSPOL a.d. Knínice, ZD Lipová, družstvo) v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny za umožnění výzkumu na jejich plochách;
- panu Jiřímu Menšíkovi, který umožnil pořízení leteckých fotografií v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny.





## PŘÍLOHY

### Příloha 1: Publikované práce

#### Článek v odborném periodiku /Jimp/ (RIV):

- Hlisnikovský L., Menšík L., Kunzová E. 2023. Development and the Effect of Weather and Mineral Fertilization on Grain Yield and Stability of Winter Wheat following Alfalfa—Analysis of Long-Term Field Trial. *Plants*, 12(6):1392. <https://doi.org/10.3390/plants12061392>
- Pospíšilová L., Sedlák L., Boturová K., Prudil J., Plisková J., Menšík L. 2023. Liming effect on soil organic matter quality in grassland. *Soil Science Annual*, 74(2):169271. <https://doi.org/10.37501/soilsa/169271>
- Kopecký M., Kolář L., Perná K., Váchalová R., Mráz P., Konvalina P., Murindangabo Y.T., Ghorbani M., Menšík L., Dumbrovský M. 2022. Fractionation of Soil Organic Matter into Labile and Stable Fractions. *Agronomy*, 12: 73. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010073>
- Hlisnikovský L., Menšík L., Čermák P., Křížová K., Kunzová E. 2022. Long-Term Effect of Pig Slurry and Mineral Fertilizer Additions on Soil Nutrient Content, Field Pea Grain and Straw Yield under Winter Wheat–Spring Barley–Field Pea Crop Rotation on Cambisol and Luvisol. *Land*, 11: 187. <https://doi.org/10.3390/land11020187>
- Hakl J., Kunzová E., Tocauerová Š., Menšík L., Mrázková M., Pozdíšek J. 2021. Impact of long-term manure and mineral fertilization on yield and nutritive value of lucerne (*Medicago sativa*) in relation to changes in canopy structure. *European Journal of Agronomy* 123, February 2021, 126219. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126219>
- Voltr V., Menšík L., Hlisnikovský L., Hruška M., Pokorný E., Pospíšilová L. 2021. The Soil Organic Matter in Connection with Soil Properties and Soil Inputs. *Agronomy* 11(4):779. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040779>
- Hlisnikovský L., Křížová K., Menšík L., Kunzová E. 2021. How Mineral Fertilization and Soil-Climate Conditions Affect Spring Barley Grain Yield and Soil Chemical Properties. *Agronomy* 11(9):1843. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091843>
- Hlisnikovský L., Menšík L., Kunzová E. 2021. The Effect of Soil-Climate Conditions, Farmyard Manure and Mineral Fertilizers on Potato Yield and Soil Chemical Parameters. *Plants*. 2021; 10(11):2473. <https://doi.org/10.3390/plants10112473>

Kopecký M., Kolář L., Váchalová R., Konvalina P., Batt J., Mráz P., Menšík L., Hoang T.N., Dumbrovský M. 2021. Black Carbon and Its Effect on Carbon Sequestration in Soil. *Agronomy* 11(11):2261. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112261>

Pospíšilová L., Horáková E., Fišera M., Jerzykiewicz M., Menšík L. 2020. Effect of selected organic materials on soil humic acids chemical properties. *Environmental Research*, 187(8), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109663>

Menšík L., Hlisnikovský L., Pospíšilová L., Kunzová E. 2018. The effect of application of organic manures and mineral fertilizers on the state of soil organic matter and nutrients in the long-term field experiment. *Journal of Soils and Sediments*, 18(8): 2813–2822. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1933-3>

Horáková E., Pospíšilová L., Vlček V., Menšík L. 2020. Changes in the soil's biological and chemical properties due to the land use. *Soil and Water Research*, 15(4): 228–236. <https://doi.org/10.17221/44/2019-swr>

Hábová M., Pospíšilová L., Hlavinka P., Trnka M., Barančíková G., Tarasovičová Z., Takáč J., Koco Š., Menšík L., Nerušil P. 2019. Carbon pool in soil under organic and conventional farming systems. *Soil and Water Research*, 14(3): 145–152. <https://doi.org/10.17221/71/2018-SWR>

#### Článek v odborném periodiku /J<sub>sc, rec</sub>/ (RIV):

Pospíšilová L., Hábová M., Vlček V., Jandák J., Menšík L., Barančíková G. 2018. Carbon Dynamic after Conversion of Permanent Grassland into Arable Soil. *ACS. Agriculturae conspectus scientificus*, 83(1): 25–30.

Plisková J., Nerušil P., Sedlák L., Pospíšilová L., Menšík L. 2021. Vliv hnojení (NPK, hnůj, kejda, digestát) TTP na výnos, kvalitu píce a půdu. *Úroda*, 69(12 vědecká příloha): 519–528.

Kunzová E., Hlisnikovský L., Menšík L. 2022. Vliv hnojení statkovými a minerálními hnojivy na výnos a kvalitu pšenice ozimé v letech 2015–2018. *Agromanuál*, 17(1): 49–49.

Nerušil P., Křivánková Z., Menšík L. 2018. Vliv hnojení statkovými hnojivy a digestátem na výnos, kvalitu píce a botanické složení tříšečně využívaného TTP v oblasti Malé Hané. *Pícninářské listy*. Agriprint, s.r.o., Olomouc, pp. 26–29.

### **Monografie /B/ a kapitola v monografii /C/ (RIV)**

Menšík L., Kunzová E., Nerušil P., Hlisnikovský L., Čermák P., Schilling B., Hangen E. 2022. Stanovení kvalitativních parametrů půdy pomocí blízké infračervené spektroskopie v česko-bavorském pohraničí. Příkladová studie – uhlík, dusík a rizikové prvky. Monografie. Vydání: první. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., 2022. 102 stran. ISBN 978-80-7427-404-6.

Hlisnikovský L., Menšík L., Holík L., Kunzová E. 2019. The Influence of Long-Term Application of Organic Manures and NPK on Barley Grain and Straw Yields and Soil Properties. In: Krakowiak-Bal, A. & Vaverková, M. (eds.). Infrastructure and Environment. Springer, Cham, pp. 87–93.

Menšík L., Hlisnikovský L., Kunzová E. 2019. The State of the Soil Organic Matter and Nutrients in the Long-Term Field Experiments with Application of Organic and Mineral Fertilizers in Different Soil-Climate Conditions in the View of Expecting Climate Change. In: Larramendy, M. & Soloneski, S. (eds.). Organic Fertilizers: History, Production and Applications. IntechOpen, London, United Kingdom, pp. 23–42.

### **Certifikovaná metodika /Nmet/ (RIV):**

Menšík L., Kunzová E., Hlisnikovský L., Nerušil P., Hangen E., Schilling B. 2022. Vývoj kalibračních rovnic pro stanovení obsahu uhlíku, dusíku a rizikových prvků v půdě v česko-bavorském přístupu pomocí techniky NIRS. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., 23 s. ISBN 978-80-7427-389-6.

### **Ověřená technologie /Ztech/ (RIV):**

Menšík L., Nerušil P. 2021. Vývoj kalibračních rovnic k predikci obsahu uhlíku a dusíku v půdách trvalých travních porostů (TTP) v podmínkách Boskovické brázdy (Malé Hané) pomocí NIR spektroskopie, Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., 21 s.

Menšík L., Kunzová E., Nerušil P., Hlisnikovský L. 2021. Vývoj kalibračních rovnic k predikci obsahu uhlíku a dusíku v půdě v různých půdně-klimatických podmínkách ČR (stanoviště Čáslav, Lukavec, Ivanovice na Hané) na půdních typech černozem, kambizem pomocí blízké infračervené spektroskopie (NIRS), Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., 19 s.

### **Uspořádání konference /M/ (RIV):**

Menšík L., Kunzová E., Madaras M., Hlaváčková V. 2023. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnících se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota), 3. ročník. Webinar, 7.12.2023, Praha (CZ).

Menšík L., Kunzová E., Madaras M., Hlaváčková V. 2022. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnících se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota), 2. ročník. Webinar, 9.6.2022, Praha (CZ).

Kunzová E., Menšík L. 2022. Moderní postupy měření parametrů kvality půdy pomocí spektroskopických a spektrometrických metod v česko-bavorském přístupu. Konference. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Klatovy, 23.11.2022 (CZ).

Menšík L., Kunzová E. 2020. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnících se podmínkách prostředí – SOM

(půdní organická hmota) /online/. 12. 12. 2020, Praha (CZ).

### **Ostatní /O/ (RIV):**

Menšík L., Kunzová E., Madaras M. 2023. Úvod – Současné hospodaření na zemědělské půdě v podmínkách změny klimatu – nejnovější trendy světového výzkumu SOM. In: Menšík, L., Kunzová, E., Madaras, M. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnících se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota), 3. ročník. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha – Ruzyně, s. 7. ISBN 978-80-7427-390-2.

Menšík L., Šimon T., Nerušil P., Hlisnikovský L., Plisková J., Haberle J., Kunzová E., Madaras M. 2023. Moderní spektroskopické a spektrometrické metody v zemědělském výzkumu a praxi se zaměřením na půdu. In: Menšík, L., Kunzová, E., Madaras, M. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnících se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota), 3. ročník. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha – Ruzyně, s. 11. ISBN 978-80-7427-390-2.

Menšík L., Kunzová E., Madaras M. 2022. Současné hospodaření na zemědělské půdě v podmínkách změny klimatu. In: Menšík, L., Kunzová, E., Madaras, M. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnících se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota), 2. ročník. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha – Ruzyně, 2022, s. 7. ISBN 978-80-7427-401-5.

Voltr V., Menšík L., Hlisnikovský L., Hruška M., Pokorný E., Pospíšilová L. 2022. Tvorba organické hmoty v půdě v závislosti na vlastnostech půdy a druzích hnojiv v 10-ti letém provozním pokusu. In: Menšík, L., Kunzová, E., Madaras, M. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnících se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota), 2. ročník. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha – Ruzyně, 2022, s. 16–17. ISBN 978-80-7427-401-5.

Menšík L., Hlisnikovský L., Kunzová E., Nerušil P., Pospíšilová L. 2022. Monitoring stavu půdní organické hmoty v zemědělských podnicích v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny. In: Menšík, L., Kunzová, E., Madaras, M. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnících se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota), 2. ročník. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha – Ruzyně, 2022, s. 18–19. ISBN 978-80-7427-401-5.

Menšík L., Madaras M., Nerušil P., Šimon T., Kunzová E. 2022. Moderní způsoby sledování (měření) kvality organické hmoty v půdě. Monitoring stavu půdní organické hmoty v zemědělských podnicích v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny. In: Menšík, L., Kunzová, E., Madaras, M. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnících se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota), 2. ročník. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha – Ruzyně, 2022, s. 21–22. ISBN 978-80-7427-401-5.

### **Přednášky pro praxi (mimo RIV):**

Menšík L., Pospíšilová L., Kunzová E., Hlisnikovský L., Šimon T., Nerušil P., Klír J., Madaras M. 2023. Význam půdní organické hmoty „Kvantita a kvalita organické hmoty v agroekosystémech – výzkum ve VÚRV, v.v.i. Přednáška.

Workshop „Kategorizace zemědělské půdy“. 19.10.2023, ÚZEI, Praha (CZ).

Menšík L., Pospíšilová L., Kunzová E., Hlisnikovský L., Šimon T., Plisková J., Nerušil P., Klír J., Madaras M. 2022. Frakcionace humusových látek zemědělských půd – Kvantita a kvalita organické hmoty v agroekosystémech. WORKSHOP 2022 - Organická hmota „Budoucnost organické hmoty pro půdy v ČR – kompost, statková hnojiva, digestát, kaly“. 10–11.11.2022, Náměšť nad Oslavou (CZ).

Menšík L., Hlisnikovský L., Kunzová E., Pospíšilová L., Kulhavý J. 2020. Půdní organická hmota (SOM) - klíčová součást agroekosystémů a lesních ekosystémů při adaptaci na změnu klimatu. Přednáška na odborné konferenci: Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnících se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota) /online/. 12. 12. 2020, Praha (CZ).

Menšík L., Madaras M., Nerušil P., Šimon T. 2020. Nové trendy sledování kvality organické hmoty v půdě pomocí NIRS a FTIR (MIRS). Přednáška na odborné konferenci: Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnících se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota) /online/. 12. 12. 2020, Praha (CZ).

Menšík L., Hlisnikovský L., Kunzová E., Pospíšilová L. 2019. Bilance uhlíku – Vliv dlouhodobé aplikace minerálních hnojiv (NPK) a statkových hnojiv (hnůj, kejda) na základní chemické vlastnosti půdy (uhlík, dusík, živiny). ProFarm Blatnice – Bilance humusu a živin. 13.6.2019, Blatnice (CZ).

Menšík L., Hlisnikovský L., Pospíšilová L., Kunzová E. 2019. Frakcionace humusových látek zemědělských půd – Vliv dlou-

hodobé aplikace minerálních hnojiv (NPK) a statkových hnojiv (hnůj, kejda) na základní chemické vlastnosti půdy, ZERA- Jak zlepšit obsah humusu na vlastních pozemcích. 4.3.2019, Náměšť nad Oslavou (CZ).

Menšík L., Kunzová E., Pospíšilová L., Hlisnikovský L. 2018. Frakcionace humusových látek zemědělských půd, Seminář IHSS Czech Chapter. 2.3.2018, Hustopeče (CZ).

#### Sborník (mimo RIV):

Menšík L., Kunzová E., Madaras M. 2023. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnících se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota), 3. ročník. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha – Ruzyně, 2023. ISBN 978-80-7427-390-2.

Menšík L., Kunzová E., Hlisnikovský L. 2022. Moderní postupy měření parametrů kvality půdy pomocí spektroskopických a spektrometrických metod v česko-bavorském příhraničí. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha – Ruzyně. ISBN 978-80-7427-383-4.

Menšík L., Kunzová E., Madaras M. 2022. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnících se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota), 2. ročník. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha – Ruzyně. ISBN 978-80-7427-401-5.

Kunzová E., Madras M., Menšík L. 2022. Význam dlouhodobých pokusů a kvality půdy v podmínkách změny klimatu – využití pro zemědělskou praxi. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha – Ruzyně. ISBN 978-80-7427-400-8.

#### Příloha 2: Fotografie z dlouhodobých výzkumných ploch VÚRV, v.v.i.



Nejstarší dlouhodobý polní pokus v ČR, Praha-Ruzyně, červen 2023 (foto: L. Menšík).





Dlouhodobý polní pokus VOP v Čáslavi, červen 2018 (foto: L. Menšík).



Dlouhodobý polní pokus VOP v Lukavci u Pacova, srpen 2021 (foto: L. Menšík).



Dlouhodobý polní pokus VOP v Ivanovicích na Hané, červenec 2017 (foto: L. Menšík).





Dlouhodobý pokus se statkovými hnojivy v TTP, VS Jevíčko, květen 2023 /vlevo/, říjen 2022 /vpravo/ (foto: L. Menšík).

Příloha 3: Fotografie výzkumných ploch: Boskovická brázda /Malá Haná/, Drahanská vrchovina



Letecký pohled na středisko živočišné výroby v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice), Vanovice, květen 2022 (foto: L. Menšík).



Letecký pohled na zemědělskou krajinu v oblasti Boskovické brázdy se střediskem živočišné výroby HZS Jevíčko, a.s., květen 2022 (foto: L. Menšík).



Letecký pohled na Boskovickou brázdu k Boskovicím, Šebetov, květen 2022 (foto: L. Menšík).



Letecký pohled na dlouhodobé pokusy v TTP (VS Jevíčko) v oblasti Boskovické brázdy, květen 2022 (foto: L. Menšík).





Letecký pohled na zemědělsko-lesnickou krajinu v oblasti Drahan­ské vrchoviny, Benešov u Boskovic, květen 2022 (foto: L. Menšík).



Letecký pohled z Drahan­ské vrchoviny do Boskovické brázdy, Benešov u Boskovic, květen 2022 (foto: L. Menšík).



Hospodaření na zemědělské půdě v oblasti Drahan­ské vrchoviny, Horní Štěpánov /vlevo/, Brodek u Konice /vpravo/, červenec, září 2022 (foto: L. Menšík).



Půdní profil černozemě a hnědozemě v oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané), Vážany /vlevo/, Šebetov /vpravo/, říjen 2022 (foto: L. Menšík).





Aplikace kvalitních statkových hnojiv (hnůj, kejda) v oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané), Velké Opatovice /vlevo/, Jevíčko /vpravo/, září 2023 (foto: L. Menšík).



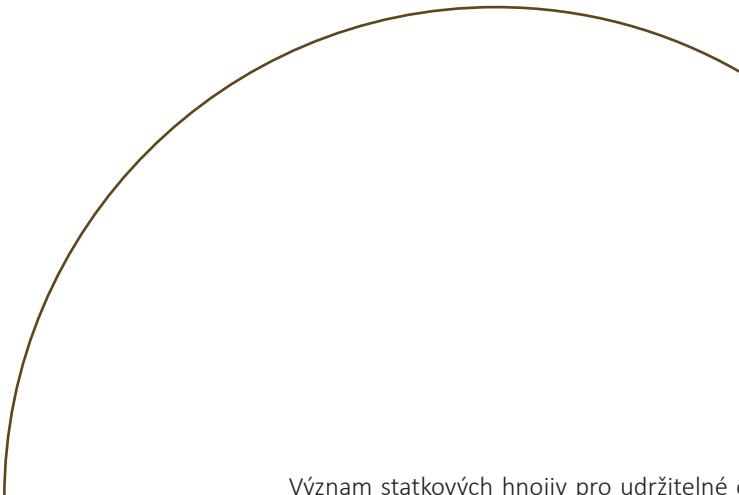
Pěstování víceletých pícnin (vojtěška, travní porosty na orné půdě) v oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané), Vanovice /vlevo/, Paměťice /vpravo/, říjen 2022, září 2023 (foto: L. Menšík).



Krajina a půda v úrodné oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané), Paměťice /vlevo/, Šebetov /vpravo/, říjen 2021, listopad 2023 (foto: L. Menšík).







Význam statkových hnojiv pro udržitelné obhospodařování zemědělské půdy  
v podmínkách změny klimatu (kvalita a zdraví půdy)

Autoři:

Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.

Ing. Eva Kunzová, CSc.

Ing. Lukáš Hlisnikovský, Ph.D.

Ing. Pavel Nerušil, Ph.D.

doc. RNDr. Lubica Pospíšilová, CSc.

Ing. Jana Plisková

Ing. Václav Voltr, CSc.

Ing. Tomáš Šimon, CSc.

RNDr. Mikuláš Madaras, Ph.D.

Vydavatel:

Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Drnovská 507/73, 161 00 Praha 6 -  
Ruzyně

Grafika:

Česká technologická platforma pro zemědělství

Tiskárna:

SYNERGIE: 4U s.r.o., Praha

Vydání: první

Rok vydání: 2023

Náklad: 250 výtisků

ISBN 978-80-7427-428-2 (Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.)

Žádná část této publikace nesmí být kopírována nebo reprodukována bez  
písemného svolení hlavního autora zastupujícího autorský kolektiv.



