

Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i.



Národní centrum zemědělského
a potravinářského výzkumu

Optimalizace agrotechnických opatření pro zvýšení kvality půdní organické hmoty

Schválená/certifikovaná metodika



**Ing. Eva Kunzová, CSc.
Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.
Ing. Lukáš Hlisnikovský, Ph.D.
a kolektiv**

Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i.



Národní centrum zemědělského
a potravinářského výzkumu

Schválená/certifikovaná metodika

Optimalizace agrotechnických opatření pro zvýšení kvality půdní organické hmoty

Ing. Eva Kunzová, CSc.¹
Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.¹
Ing. Lukáš Hlisnikovský, Ph.D.¹
Ing. Veronika Zemanová, Ph.D.¹
Ing. Pavel Nerušil, Ph.D.¹
Ing. Jana Plisková¹
RNDr. Mikuláš Madaras, Ph.D.¹
Ing. Tomáš Šimon, CSc.¹
Ing. Ladislav Menšík²

Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i.¹⁾
AGROSPOL, a.d. Knínice²⁾

Praha, Jevíčko, Knínice
Prosinec 2025

Optimalizace agrotechnických opatření pro zvýšení kvality půdní organické hmoty

Metodické postupy (schválená/certifikovaná metodika) představují na příkladu dílčích studií z různých půdně-klimatických podmínek ČR, vliv agrotechnických opatření (vliv osevních postupů, hnojení, managementu v TTP apod.) na stav a kvalitu půdní organické hmoty (SOM). 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*. Důraz byl kladen na hodnocení výsledků pomocí moderních statistických metod (ANOVA, MANOVA, vícerozměrné statistické analýzy, regresní modelování apod.). Potvrdily se předpoklady o pozitivním vlivu osevních postupů, hnojení statkovými hnojivy (hnůj, kejda) na stav a kvalitu půdy (udržení, resp. zvýšení půdní úrodnosti; *Soil Health*) ve smyslu udržitelného obhospodařování zemědělské půdy s organickou hmotou v podmínkách ČR, ale i ve vztahu k potravinovému zabezpečení (výnosy, kvalita potravin) a zvyšování adaptačního potenciálu půdy na předpokládané účinky klimatické změny (GZK). Metodika je určena pro zemědělské podniky a dále uživatelům v zemědělském výzkumu (včetně vysokých škol) a ve státních institucích.

Klíčová slova: *půda, kvalita a zdraví půdy, osevní postupy, hnojení, statistické metody*

Optimising agronomic practices to improve soil organic matter quality

The methodological procedures (approved methodology) use examples from partial studies of various soil and climatic conditions in the Czech Republic to illustrate the impact of agronomic measures, such as crop rotation, fertilisation and grassland management, on the condition and quality of soil organic matter (SOM). Each individual study is divided into the following sections: (1) the objective of the study; (2) a description of the research object, including study methods (e.g. long-term field experiments, semi-operational and operational research areas, modelling of long-term time series); (3) results (e.g. graphs, tables, evaluations); and (4) partial conclusions. Emphasis was placed on evaluating the results of each study using modern statistical methods (ANOVA, MANOVA, multivariate statistical analyses, regression modelling, etc.). The methodology assumes that crop rotation and fertilisation with farmyard manure (manure and slurry) positively impact soil condition and quality, maintaining or increasing soil fertility and soil health, in terms of the sustainable management of agricultural land containing organic matter in the Czech agricultural landscape. This is also relevant to food security (yields and food quality) and the ability of soil to adapt to the expected effects of climate change (GZK). This methodology is intended for use by agricultural enterprises, agricultural research users (including universities) and state institutions.

Keywords: *soil, soil quality and health, crop rotation, fertilization, statistical methods*

Metodika vznikla za finanční podpory MZe ČR a je výstupem řešení institucionální podpory MZE-RO0425 (20 %) a projektu NAZV: QK21010124 (80 %).

Autorský kolektiv:

Ing. Eva Kunzová, CSc., Ing. Ladislav Menšík, Ph.D., Ing. Lukáš Hlisenkovský, Ph.D., Ing. Veronika Zemanová, Ph.D., Ing. Pavel Nerušil, Ph.D., Ing. Jana Plisková, RNDr. Mikuláš Madaras, Ph.D., Ing. Tomáš Šimon, Ph.D., Ing. Ladislav Menšík

Oponenti:

Ing. Michaela Smatanová, Ph.D., Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brno, Česká republika
Dr. Ing. Milan Sáhka, Mendelova univerzita, Brno, Česká republika

Publikace neprošla jazykovou úpravou.

Metodika byla schválena orgánem státní správy (Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský) pod č.j. ÚKZÚZ-xxxx/2025-xxxx.

Citace: Kunzová E., Menšík L. ml., Hlisenkovský L., Zemanová V., Nerušil P., Plisková J., Madaras M., Šimon T., Menšík L. st. 2025. Optimalizace agrotechnických opatření pro zvýšení kvality půdní organické hmoty. Schválená/certifikovaná metodika (xx/2025). Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i., 45 s. ISBN 978-80-7427-xxx-x

© Kunzová E., Menšík L. ml., Hlisenkovský L., Menšík L. st. 2025

© Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i., Praha – Ruzyně, 2025

Obsah

1. Úvod.....	5
2. Cíl metodiky.....	6
3. Současný stav řešené problematiky	6
4. Experimentální část.....	9
<i>Studie 1: Vliv osevních postupů na obsah, dynamiku a zásoby SOM (SOC).....</i>	10
<i>Studie 2: Vliv dlouhodobé aplikace minerálních a statkových (hnůj, kejda) hnojiv na základní chemické vlastnosti půdy /SOM, živiny, půdní reakce/</i>	11
<i>Studie 3: 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</i>	15
<i>Studie 4: Jak minerální hnojení a půdně-klimatické podmínky ovlivní výnos zrna ječmene jarního a chemické vlastnosti půdy (SOC, Ntot, živiny)</i>	19
<i>Studie 5: Vliv obhospodařování a hnojení TTP statkovými a minerálními hnojivy na kvalitu a zdraví půdy (SOM, živiny, půdní reakce)</i>	23
<i>Studie 6: Monitoring stavu půdní organické hmoty v zemědělských podnicích v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny</i>	24
<i>Studie 7: Organická hmota v půdě v závislosti na vlastnostech půdy a aplikaci různých hnojiv</i>	25
<i>Studie 8: Modelování změn obsahu půdní organické hmoty v půdách ČR.....</i>	29
5. Doporučení pro praxi	32
6. Souhrn a závěr	32
7. Ekonomický a ekologický přínos metodiky.....	34
8. Srovnání novosti postupů a uplatnění metodiky	34
9. Seznam publikací, které předcházely metodice.....	35
Literatura.....	38
Seznam obrázků, tabulek a zkratk	43

1. Úvod

Globální potravinová bezpečnost v 21. století je stále ohrožena souběhem rostoucí poptávky po potravinách v důsledku rostoucí populace /očekává se, že do roku 2050 dosáhne světová populace 9,7 miliardy/ (OSN 2024) a neschopnosti současného systému produkce potravin uspokojit rostoucí poptávku v podmínkách současné globální změny klimatu /GZK; angl. *climate change*/, zhoršující se úrodnosti půdy (degradace, kontaminace apod.), stagnace výnosů světových obilovin, ale i problémů s dostupností vody v půdě atd. (Hasegawa et al. 2018; Dillard 2019; Fears et al. 2019; Bagnall et al. 2021; Li et al. 2025).

Probíhající GZK (změněné srážkové poměry, časté výskyty period sucha a zvýšené četnosti extrémních jevů) má již v současnosti negativní dopady na potravinovou bezpečnost tím, že snižuje výnosy zemědělských plodin /předpokládaný pokles výnosů v souvislosti s GZK se předpokládá v 10–20 % různých částí světa (Yuan et al. 2024; Li et al. 2025)/, zpomaluje nárůst produktivity (užitkovosti) 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 – potraviny, krmiva apod.) bude muset pocházet z produkce na stávající zemědělské půdě (tj. z intenzifikace), i když bude pravděpodobně zapotřebí určitá nová zemědělská půda (FAO 2017). Vyšší rostlinou 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; Menšík, Hlisenikovský, et al. 2019). Intenzifikace zemědělství a její rozšiřování bez kvalitního hnojení statkovými hnojivy /angl. *livestock manure*/ (hnůj, kejda) však povede k nežádoucím dopadům jak na zásoby živin v půdě, obsah uhlíku (C), dusíku (N), rizikových prvků, 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 zemědělství je úrodnost půdy /kvality a zdraví půdy - angl. *Soil Health*/ 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) v půdě (Lal 2020) 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 nejdůležitějších faktorů procesu degradace půd v obecném pojetí (ztráty uhlíku především větrnou a vodní erozí, nedostatečným přísunem kvalitních statkových a organických hnojiv, nesprávným hospodařením na půdě apod. (Rutkowska and Pikula 2018; Zheng et al. 2025) . SOM, resp. půdní organický uhlík (angl. *soil organic carbon*, dále jen SOC), jsou klíčovými parametry při hodnocení kvality, resp. úrodnosti půdy (Doran 2002; Lal 2004, 2016, 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 [10]. Množství a kvalita SOM (obsah SOC, obsah humusových látek /HL/, huminových kyselin /HK/ a fulvokyselin /FK/) jsou dva základní pilíře půdní úrodnosti (Piccolo et al. 2002; Kopecký et al. 2022; Tiwari et al. 2023; Antu et al. 2025; Piccolo and Drosos 2025). Kvalitu a množství SOM ovlivňuje mnoho faktorů, jako je například střídání plodin, agrotechnický přístup (systém orby nebo bez orby), hnojení, zavlažování atd. (Raphael et al. 2016; Triberti et al. 2016; Balík et al. 2023a; Sedlár et al. 2023; Iheshiulo et al. 2024; Šimon et al. 2024)

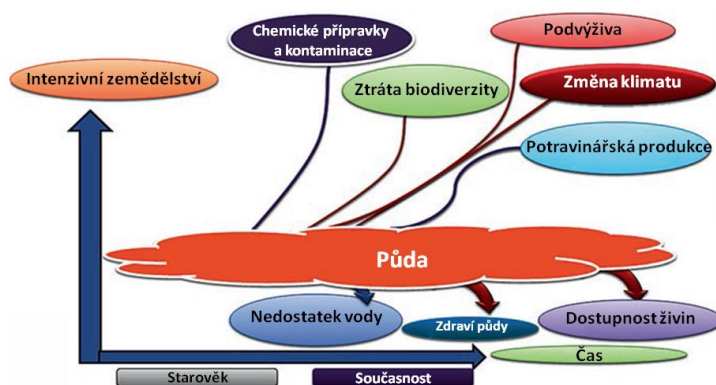
K udržení, resp. zvýšení kvality a zdraví půdy (SOM, živiny, pH apod.) mohou přispět i správná agrotechnická opatření (osevní postupy, resp. střídání plodin včetně zařazení zlepšujících plodin /víceletých píceň – vojtěška, jetel apod./, hnojení kvalitními statkovými a organickými hnojivy, pěstováním meziplodin včetně zeleného hnojení, omezením zpracování půdy /systémy bez orby, přímé setí, mulčování, pásové zpracování půdy apod./) (He and Zhang 2014; Page et al. 2020; Gross and Glaser 2021; Joon et al. 2024; Balík et al. 2025; Kama et al. 2025; Sun et al. 2025; Al-Musawi et al. 2025).

2. Cíl metodiky

Cílem metodiky je představit na příkladu dílčích studií (dlouhodobé polní pokusy, poloprovozní a provozní výzkumné plochy) z různých půdně-klimatických podmínek ČR vliv agrotechnických opatření (osevních postupů, hnojení, managementu TTP apod.) na stav a kvalitu SOM (hodnocení je založeno na použití moderních statistických metod – ANOVA, MANOVA, techniky vícerozměrné statistické analýzy /PCA, FA, CLU/ a regresního modelování /jednorozměrné a vícerozměrné lineární regresní modely apod.).

3. Současný stav řešené problematiky

Globální potravinová bezpečnost 21. století je 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, kontaminace půdy a problémů s dostupností vody v půdě atd. (Lal 2017, 2020; Dillard 2019; Rahut *et al.* 2022). Stojíme proto před velkou výzvou jak nasycit masivně narůstající podvyživenou populaci s omezenou dostupností potravinových zdrojů v méně rozvinutých zemích, a dále jak udržet současnou kvalitu a zdraví půdy, negativně ovlivněnou aplikací chemických přípravků, minerálních hnojiv a souvisejícím rizikem kontaminace půdy, erozí půdy a poklesem její úrodnosti, ale také i 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.



Obr. 3.1: Globální změny v současném zemědělství (upraveno dle Meena, Lal 2018).

Půda

Půda je základním, omezeným a neobnovitelným zdrojem výroby potravin, krmiv, ale také energie, a je přírodním zdroje 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 čase 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 (krajinný pokryv a využití půdy) a environmentálních faktorech, včetně vodního režimu, topografie a klimatu

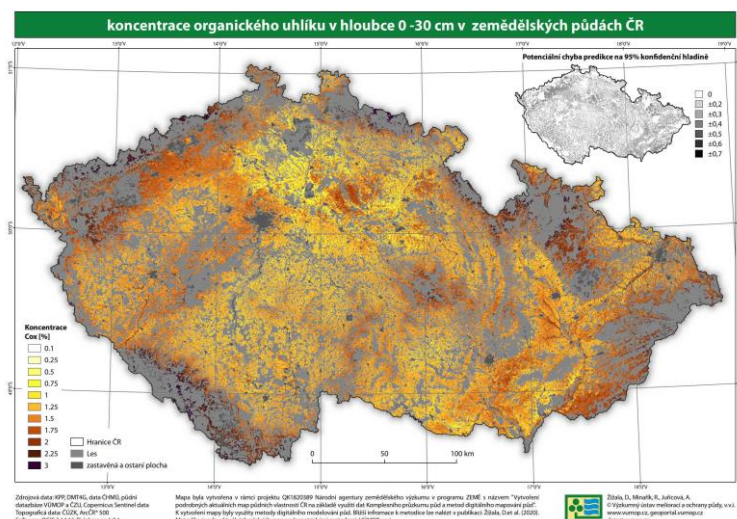
apod. (Guo *et al.* 2015). Podnebí včetně vysokých teplot a nízkých srážek, jaké se vyskytují například v semiaridních podmínkách, snižují akumulaci SOM (Melillo *et al.* 2002). Dokonce i na lokální úrovni, kdy půdotvorný materiál a klima mohou být poměrně homogenní, může být obsah SOM ovlivněn půdotvornými faktory, jako je topografie nebo i způsobem využití půdy (Goydaragh *et al.* 2021).

SOM je velmi důležitý při udržování a zlepšování půdních 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 2008; Tobiašová *et al.* 2018; 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 organických látek a sloučenin, ovlivnit příjem půdních živin (Rochette *et al.* 1999) a zvýšit pufovací kapacitu půdy (Grego and Lagomarsino 2008; Yang *et al.* 2012; Rao *et al.* 2017; Shi *et al.* 2019). Zvyšování obsahu SOM zároveň také zvyšuje sekvestraci uhlíku v půdě (Lal 2004, 2021; Lorenz and Lal 2018; Meena and Lal 2018).

Půdní organický uhlík (SOC) a jeho frakce proto hrají podstatnou roli z pohledu chemických, fyzikálních a biologických procesů v půdě (Goydaragh *et al.* 2021; Balontayová *et al.* 2025). Je také indikátorem úrodnosti, produktivity a dostupnosti živin v půdě (Pouladi *et al.* 2019).

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 příznaky 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 směřuje k přímým platbám, za 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). 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 prostředek pro kompenzaci emisí CO₂ prostřednictvím sekvestrace uhlíku (C) do půdy (Lugato *et al.* 2014).



Obr. 3.2: Mapa koncentrace SOC v povrchových vrstvách zemědělské půdy (0–30 cm) v ČR (Žižala *et al.* 2020).

Kvantifikace SOC v půdě na území 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 2006¹, 2012²). Cílem nové strategie EU pro půdu (angl. *EU Soil Strategy 2030*³) 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 archivních podkladů, zejména z nedávno digitalizovaných 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 nich 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. 2.6*).

Dle Situační a výhledové zprávy Ministerstva zemědělství *Půda* z roku 2012, 2015, 2018 i 2021, hrozí v ČR intenzivní dehumifikace půd (ztráta organické hmoty) spíše místně při souběhu více degradačních vlivů, neuvážených zásazích 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, popele 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, Kebli, *et al.* 2018; Mi *et al.* 2018; Shiwakoti *et al.* 2019), především, pokud není doprovázena aplikací kvalitních statkových hnojiv (Menšík *et al.* 2018; Menšík, Nerušil, *et al.* 2019; Menšík, Hlisnikovský, *et al.* 2019; Hakl *et al.* 2021; Hlisnikovský, Menšík, *et al.* 2021). V současné době tak rostlinná produkce stojí především na minerální formě dusíku, který bez dodatku statkových hnojiv (hnůj, kejda) významně napomáhá ke snížení hodnoty půdní pH a tím významně ovlivňuje přístupnost živin v půdě pro rostliny (Vašák *et al.* 2015; Kopeč *et al.* 2021), a dále dochází i poklesu SOC a změně v chemickém složení SOM (významně se mění poměr huminových kyselin k fulvokyselinám /poměr HK/FK/, kde v půdě začínají převládat fulvokyseliny).

Hlavním cílem současného zemědělství musí být zachování (ochrana) půdní úrodnosti při předpokládané změně klimatu, a to pravidelným navrácením odebraných živin a dostatečným přísunem organických látek (OL) a živin do půdy (Čermák 2007; Klír 2008; Hlušek and Richter 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⁻¹ (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 je úhrada živin zajišťována především minerálními hnojivy, nelze s ohledem na udržení půdní úrodnosti opomenout význam organických hnojiv, která i přes pokles stavů hospodářských zvířat stále hrají ve výživě rostlin významnou úlohu (Čermák 2007). Za snížené produkce chlévského hnoje a současně

¹ 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.

² 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.

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

nižšího využití kejdy (s ohledem na moderní trend jejího zužitkování v bioplynových stanicích), je zvláště nezbytné hledat nová vhodná řešení (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 jejich 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 hnůj nebo kvalitní kompost v systému hnojení nezastupitelné místo (Černý *et al.* 2010; Balík *et al.* 2023b). Tato hnojiva dodávají pro půdní mikroorganismy zdroj lehce mineralizovatelné organické hmoty, uvolňují se živiny pro rostliny a zároveň jsou také zdrojem stabilnějších organických látek, které přispívají k procesu humifikace a tvorbě stabilního humusu v půdě (Vaněk *et al.* 2010).

4. Experimentální část

Výsledky řešení jsou v metodice popsány formou příkladových studií z různých půdně-klimatických podmínek ČR. Každá jednotlivá studie je vždy členěna do čtyř 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 grafy, tabulky, zhodnocení apod.) a (4) dílčí závěr.

V každé ze studií byl kladen důraz na hodnocení výsledků pomocí moderních statistických metod. Převážná část metod patří mezi techniky vícerozměrné statistické analýzy a regresního modelování (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 2021 (NCSS, LLC, Utah, USA); OPstat (Pytela 2017), Origin 2024b (OriginLab Corporation, Northampton, USA) apod. Pro vícerozměrnou statistickou analýzu naměřených dat byly použity metody: průzkumová popisná statistika (EDA), analýzy hlavních komponent /PCA/, faktorová analýza /FA/ a analýza shluků /CLU/ (Meloun, Militký 2012). Dále byly použity techniky průzkumové analýzy jednorozměrných a vícerozměrných dat, lineární regrese – výstavba regresního modelu regresním tripletem (Meloun *et al.* 2018). 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 strukturální (= využití hlavní komponenty) a do matice šumové (= nevyužití hlavní komponenty). V grafu komponentních vah se porovnávají 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 komponentního skóre 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, znamená to značnou podobnost objektů (Meloun, Militký 2012).

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 and Militký 2013). 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 2012).

Studie I: Vliv osevních postupů na obsah, dynamiku a zásoby SOM (SOC)

(1) Cílem výzkumu bylo vyhodnotit jak osevní postupy (střídání plodin) a hnojení ovlivňují dlouhodobou dynamiku SOM (SOC).

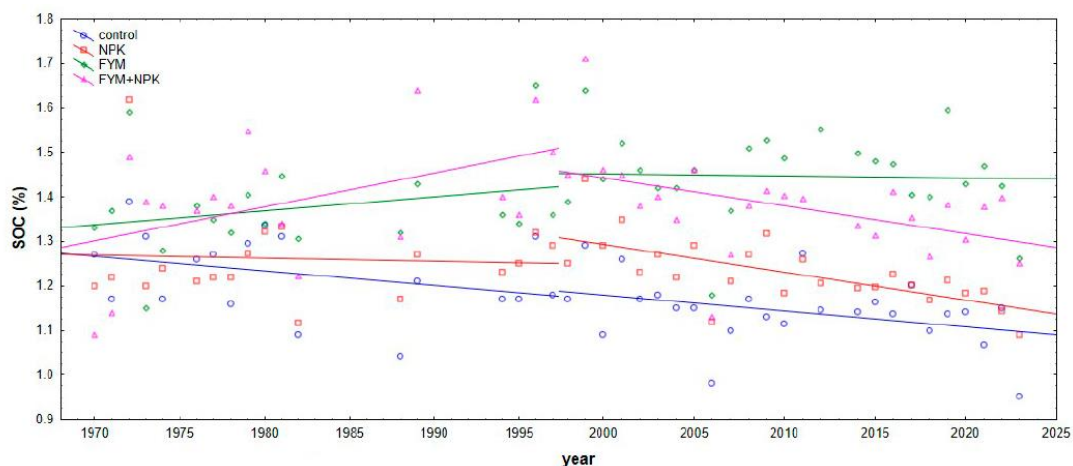
(2) Výzkum byl proveden v dlouhodobých polních výživářských pokusech (RFE, CARC) v západní části Prahy (50°05'15"N, 14° 17'28"E), v nadmořské výšce 338 m (*obr. 4.1.1.*). Průměrná roční teplota lokality je 8,5 °C s průměrným úhrnem srážek 495,8 mm (průměrné hodnoty za období 1954–2015, meteorologická stanice Praha-Ruzyně). 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. Byly vybrány dva hony: Hon B – dvou-honý osevní postup (SCR) /50 % obilovin, 50 % okopanin/: cukrová řepa a jarní pšenice. Na každém honu bylo aplikováno 24 variant hnojení ve čtyřech opakováních (96 jednotlivých parcel) a velikost parcely dosahovala 12 × 12 m. Pro studii byly vybrány čtyři způsoby hnojení: kontrola – nehnojeno od roku 1955, NPK – pouze minerální hnojení, FYM – chlévský hnůj (25 % sušiny a 0,5 % obsahu N), 21 t.ha⁻¹ každý druhý rok před cukrovou řepou a NPK + FYM. Hon IV – devíti-honý osevní postup (MCR) /45 % obilovin, 33 % okopanin, 22 % píce/: 1. vojtěška, 2. vojtěška, 3. ozimá pšenice, 4. cukrová řepa, 5. jarní ječmen, 6. brambory, 7. ozimá pšenice, 8. cukrová řepa a 9. jarní ječmen s podsevem vojtěšky. Byly vybrány čtyři způsoby hnojení: kontrola – nehnojeno od roku 1955, NPK – pouze minerální hnojení, FYM – chlévský hnůj, 21 t.ha⁻¹ před cukrovou řepou a 15 t.ha⁻¹ před bramborami a NPK + FYM.



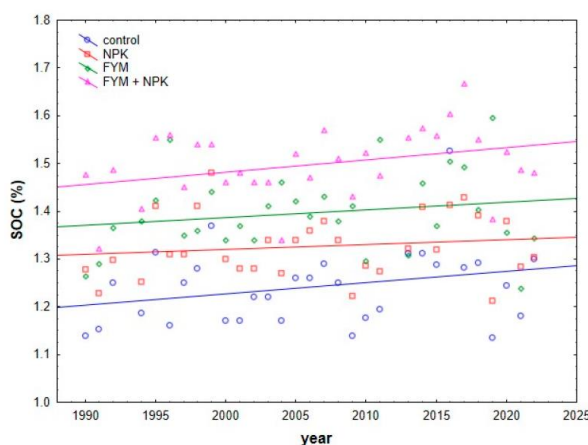
*Obr. 4.1.1: Letecká fotografie pokusné lokality Praha-Ruzyně s jednotlivými pozemky I–V (Hlisnikovský *et al.* 2016) po redukci pokusných ploch z důvodu stavby dálnice v 90. letech 20. století.*

(3) Nehnojená Kontrola na honu B (osevní postup SCR) vykazovala během celého sledovaného období konzistentní pokles obsahu SOC viz *obr. 4.1.2.* Obsah SOC klesl z 1,33 % v roce 1955 na 1,15 % v roce 2022. Minerální hnojení (NPK) mělo podobnou tendenci poklesu na SOC = 1,14 %. Trendy Kontroly a NPK se významně nelišily ($p > 0,05$). Naopak hnojení FYM vykazovalo během celého sledovaného období konstantní postupný nárůst SOC a v roce 2022 byl zjištěn obsah SOC = 1,43 %. Rozdíl mezi FYM a Kontrolou byl statisticky významný. Ve srovnání s vypočtenou hodnotou SOC = 1,29 % v roce 1955 nebyl zaznamenán žádný významný pokles SOC u žádného hnojení na honu IV (osevní postup MCR) viz *obr. 4.2.3.* Na rozdíl od SCR i u Kontroly obsah SOC stagnoval a v průměru za posledních devět let dosáhl 1,28 %. Obsah SOC u všech hnojených variant byl vyšší než v roce 1955 (1,35 % u NPK, 1,42 % u FYM a 1,54 % u FYM + NPK). Roční nárůst zásob SOC se pohyboval od 31 kg C.ha⁻¹ u varianty s NPK do 80 kg C.ha⁻¹ u FYM + NPK.

(4) Hodnocení dynamiky SOC v ornici (0–30 cm) nejstaršího českého dlouhodobého polního experimentu potvrdilo, že devíti-honý osevní postup s pícninami (Hon IV, MCR) je nejlepší strategií obhospodařování zemědělské půdy ve vztahu pro dlouhodobé zvyšování zásob SOC. Naopak jednoduché střídání plodin (Hon B, SCR) pouze se dvěma plodinami (cukrová řepa a jarní pšenice) se jeví jako velmi citlivé na rostoucí teploty vzduchu a vykazovalo vyšší ztráty SOC.



Obr. 4.1.2: Dynamika obsahu organického uhlíku v půdě (SOC) v ornici v osevním postupu SCR v obdobích 1970–1997 a 1997–2022.



Obr. 4.1.3: Dynamika obsahu organického uhlíku v půdě (SOC) v ornici v osevním postupu MCR v období 1990–2022.

Tyto ztráty lze částečně zmírnit hnojením FYM. Výsledky ukázaly, že kombinace vhodných strategií hospodaření, tj. diverzifikované střídání plodin a hnojení FYM, může zmírnit negativní dopady současných podmínek prostředí (klimatická změna, GZK) na zásoby SOC. Výsledky jsou v souladu se závěry z dlouhodobých polních experimentů prováděných i v jiných evropských státech a je zapotřebí je implementovat do správné zemědělské praxe, aby se zabránilo významným ztrátám zásob SOC v zemědělských půdách.

Rozšířené výsledky studie 1 byly publikovány v časopisu *Agriculture* (MDPI) - viz podrobně Šimon *et al.* (2024).

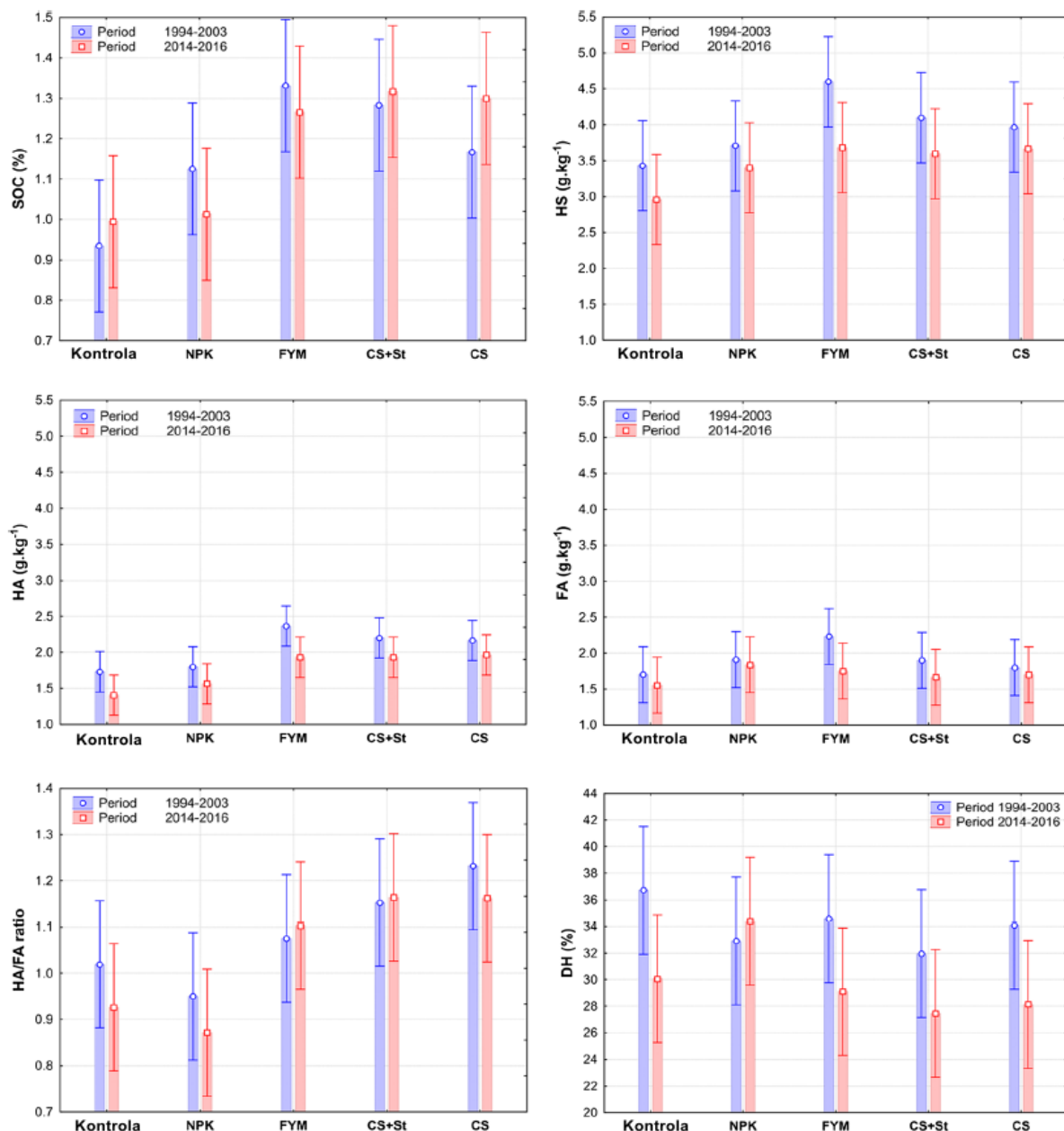
Studie 2: Vliv dlouhodobé aplikace minerálních a statkových (hnůj, kejda) hnojiv na základní chemické vlastnosti půdy /SOM, živiny, půdní reakce/

(1) Cílem studie bylo vyhodnotit pomocí vícerozměrných statistických metod (analýza hlavních komponent /PCA/, faktorová analýza /FA/) 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 u dlouhodobých polních výživářských pokusů.

(2) Výzkum byl proveden v dlouhodobých polních výživářských pokusech (RFE, CARC) v západní části Prahy (50°05'15"N, 14° 17'28"E), v nadmořské výšce 338 m na Honě IV viz *Studie 1*. Byly vybrány varianty hnojení: a) kontrola bez hnojení (Control), b) minerální hnojení NPK (NPK), c) minerální

hnojení NPK se chlévským hnojem (FYM), d) minerální hnojení NPK s hovězí kejdou (CS) a e) minerální hnojení NPK s hovězí kejdou a slámou (CS + St).

(3) Průměrný obsah SOC v obdobích 1994–2003 a 2014–2016 pohyboval od 0,9 % do 1,3 %. Velmi nízký obsah SOC byl stanoven v období 2014–2016 u kontrolní varianty (0,99 %) a NPK hnojení (1,01 %). V porovnání s kontrolou byl v obou hodnocených obdobích obsah SOC statisticky vyšší u variant FYM, CS a CS + St (*obr. 4.2.1*).



Pozn.: HS - humusové látky, HA - huminová kyselina, FA - fulvokyselina, HA/FA ratio - poměr huminových a fulvokyselin, DH - stupeň humifikace)

Obr. 4.2.1: Obsah půdního organického uhlíku (SOC) a frakční složení humusových látek ve dvou hodnocených obdobích (1994–2003 a 2014–2016).

Vyšší obsah HL a FK byl zjištěn u varianty FYM v obou obdobích, rozdíl byl však statisticky neprůkazný. Naopak obsah HK byl v porovnání s kontrolou statisticky vyšší u variant FYM, CS a CS + St v obou hodnocených obdobích. V případě poměru HK/FK byly zjištěny nízké hodnoty pro variantu kontrolní a NPK v období 1994–2003 (0,95) i 2014–2016 (0,87). V období 2014–2016 byl statisticky

vyšší poměr u variant FYM, CS a CS + St v porovnání s variantou NPK. Stupeň humifikace byl střední a v prvním hodnoceném období se jeho hodnoty pohybovaly od 32 % do 36,7 %. V druhém období se hodnoty pohybovaly od 27,6 % do 34,7 %, kdy nejvyšší hodnota byla zjištěna u varianty NPK. Pro tento parametr nebyl zjištěn statisticky průkazný rozdíl mezi variantami.

Na základě absorbancí HL lze jejich kvalitu odhadnout jako střední. V obou sledovaných obdobích byly pozorovány nižší hodnoty u variant NPK, CS a CS + St v porovnání s kontrolou. Nejvyšší absorbance byla zjištěna pro variantu FYM, což značí nejvyšší obsah HL. Zjištěná data značí, že celkový obsah SOC a obsah HL je silně ovlivněn nejen vstupy, ale také variabilitou roku. Také poměr $Q_{4/6}$ vypočítaný z absorbancí, jehož hodnoty byly v daných obdobích v rozmezí od 4,2 do 4,7 (1994–2003) a od 4,4 do 4,5 (2014–2016), značí střední kvalitu HL (limit pro vysokou kvalitu je poměr $Q_{4/6} < 4$). V prvním období tento parametr v porovnání s kontrolou dosahoval vyšších hodnot u varianty FYM. Byl prokázán statisticky významný rozdíl i mezi variantami FYM a CS, kdy opět varianta FYM měla vyšší hodnoty. Stejný trend byl pozorován ve druhém sledovaném období, avšak bez statisticky průkazných rozdílů.

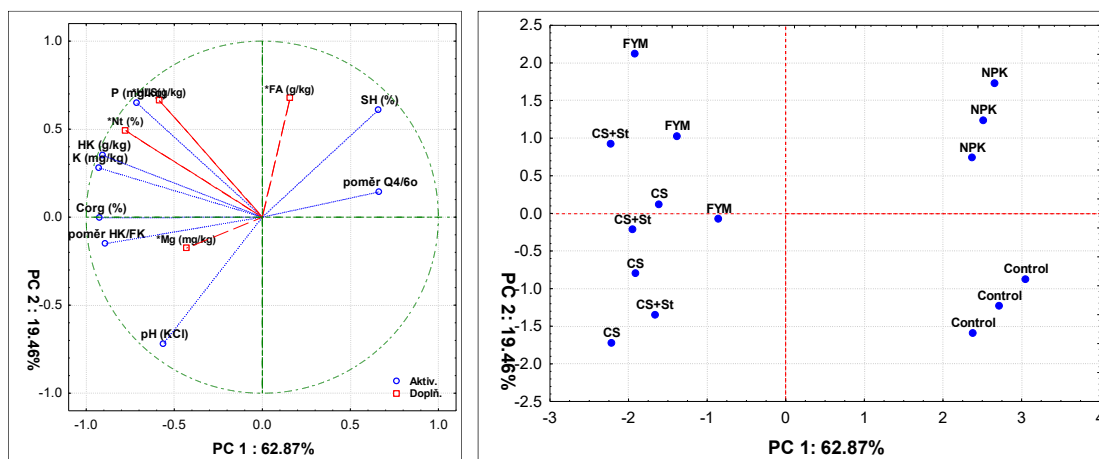
Výsledky pro další hodnocené parametry vrchní vrstvy půdy jsou uvedeny v *tabulce 4.2.1*. Významné změny byly zjištěny pro hodnotu pH, která byla při založení dlouhodobého pokusu 6,5 (pH/H₂O). U kontrolní varianty byla v období 1994–2003 hodnota 6,2 (pH/H₂O). Aplikace minerálního NPK hnojení vedla ke statisticky průkaznému poklesu pH na hodnotu 5,8 (pH/H₂O). Naopak aplikace organických hnojiv signifikantně zvýšila hodnotu pH na 6,4 až 6,7. Podobné hodnoty a trend ukázalo i druhé sledované období. V tomto byla nejnižší hodnota pH u varianty NPK a nejvyšší u variant CS a CS + St. V porovnání s kontrolní variantou však nebyl prokázán statisticky významný rozdíl u varianty FYM. V případě N_t byl v obou sledovaných obdobích významný rozdíl mezi variantou NPK a FYM. Při porovnání s kontrolní variantou byly statisticky průkazné rozdíly zjištěny i u variant CS a CS + St v období 1994–2003 a u všech variant hnojení ve druhém sledovaném období (*tab. 4.2.1*).

Tab. 4.2.1: Hodnota pH půdy, obsah půdního organického uhlíku (SOC, %), celkový dusík (N_t, %) a obsah rostlinou přijatelných živin (mg/kg) jednotlivých variant hnojení v sledovaných obdobích (1994–2003 a 2014–2016).

Varianta	Rok	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	SOC (%)	N _t (%)	Ca (mg/kg)	K (mg/kg)	Mg (mg/kg)	P (mg/kg)
Kontrola	1961	7,00	–	–	–	–	108,0*	–	29,0*
	1983	6,40	–	1,09	1,12	–	85,0*	88,0*	38,0*
	1994–2003	6,20 ^a	–	0,93 ^a	0,11 ^a	3067,9	129,6 ^a	159,9 ^a	17,6 ^a
	2014–2016	–	5,45 ^a	0,99 ^a	0,11 ^a	2973,8	153,4 ^a	152,5	15,3 ^a
NPK	1994–2003	5,80 ^b	–	1,13	0,12 ^A	3007,0	225,0 ^b	136,0	88,6 ^b
	2014–2016	–	5,26	1,01	0,13 ^{Bb}	2801,0	187,8	132,0	69,6 ^b
FYM	1994–2003	6,40 ^c	–	1,33 ^b	0,13 ^{Ab}	3318,3	295,6 ^b	172,1	99,3 ^b
	2014–2016	–	5,41	1,26 ^b	0,14 ^{Bb}	3012,1	247,3 ^b	176,7	92,3 ^b
CS	1994–2003	6,73 ^c	–	1,16 ^b	0,13 ^b	3364,2	265,6 ^b	131,6 ^b	90,0 ^b
	2014–2016	–	5,73 ^b	1,30 ^b	0,14 ^b	3185,5	233,3 ^b	149,5	71,4 ^b
CS + St	1994–2003	6,63 ^c	–	1,28 ^b	0,13 ^b	3183,0	290,6 ^b	151,3	104,9 ^b
	2014–2016	–	5,71 ^b	1,31 ^b	0,14 ^b	3022,5	256,5 ^b	152,2	85,9 ^b

*Pozn.: NPK - minerální hnojivo, FYM - hnůj, CS - kejda skotu, St - sláma; Velká písmena (A, B) značí statisticky významné rozdíly mezi obdobími 1994–2003 a 2014–2016. Malá písmena (a, b) značí statisticky významné rozdíly mezi variantami hnojení v obdobích 1994–2003 a 2014–2016. Hodnoty označené * jsou neporovnatelné v důsledku jiných metod stanovení. Statistická významnost byla hodnocena při p = 0,05 (HSD a LSD test).*

Výsledky obsahu přijatelných živin v půdě, které jsou uvedeny v *tabulce 4.2.1*, byly statisticky neprůkazné pro Ca, kdy nebyl prokázán vliv varianty hnojení a sledovaného období. Obsah K se u kontrolní varianty mírně zvyšoval při porovnání hodnocených období, avšak trend nebyl statisticky průkazný. Vyšší obsahy K byly zjištěny u variant s organickým hnojením (FYM, CS, CS + St). Přestože obsah Mg dosahoval nejvyšších hodnot u varianty FYM v obou hodnocených obdobích, statisticky průkazný rozdíl byl zjištěn jen u varianty CS v porovnání s kontrolou v období 1994–2003. U obsahu P byl pozorován podobný trend jako pro obsah K, kdy vyšší hodnoty byly zjištěny u variant s organickým hnojením (FYM, CS, CS + St). Naopak u kontrolní varianty bez aplikace hnojení byl zjištěn pokles obsahu P o 2,3 mg/kg mezi obdobími 1994–2003 a 2014–2016.



Pozn.: Corg (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. 4.2.2: 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.

Pro interpretaci zjištěných výsledků obsahu půdní organické hmoty a fyzikálně-chemických vlastností půdy byla použita PCA analýza viz obr. 4.2.2. Na grafu komponentních vah PC1, PC2, PC3 v období 2014–2016 jsou významné jen první tři osy, které dohromady vyčerpávají cca 93 % variability. Celková variabilita (osy PC1 a PC2) je více než 82 %. Na ose PC1 v grafu PC1xPC2 byl zjištěn silný a pozitivní vztah C_{org} s obsahem HK ($r = 0,86$) a dále mezi C_{org} a poměrem HK/FK ($r = 0,75$). Středně pozitivní vztah byl zaznamenán mezi C_{org} 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 a dále poměr HK/FK je ve středně pozitivním vztahu s koncentrací K a C_{org} . 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} , poměru HK/FK, a dále i obsahu živin P a K. Nejvyšší obsahy C_{org} , 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).

(4) Dlouhodobé hnojení minerálními (NPK) a organickými hnojivými (hnůj, kejda) v dlouhodobém experimentu (60 let trvání) na půdním typu hnědozem modální (Praha-Ruzyně) vede k výrazné diferenciaci půdních vlastností v hloubce 0–30 cm z pohledu kvality humusu (obsah C_{org} , 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:

- 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;
- varianty s minerálními a organickými hnojivými 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.

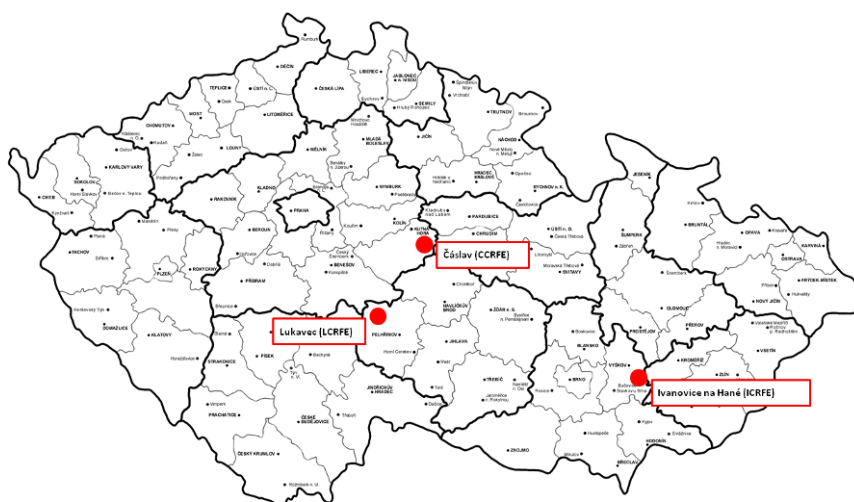
Dlouhodobá aplikace minerálních hnojiv NPK bez vstupů organických látek urychluje mineralizaci humusu a degradaci kvality půdy se všemi negativními důsledky, jako je vyluhování dusíku, vyšší „dostupnost“ toxických prvků pro rostliny, pomalá energie pro půdní mikroorganismy apod. Aplikací organických 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* (Springer) - viz podrobně Menšík *et al.* (2018).

Studie 3: 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

(1) Cílem výzkumu bylo 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 České republiky.

(2) Výzkum byl proveden v dlouhodobých polních výživářských pokusech (VOP, CARC) na stanovištích Ivanovice na Hané /ICRFE/, Čáslav /CCRFE/ a Lukavec /LCRFE/ založených v roce 1956 viz obr. 4.3.1 a tab. 4.3.1. v období 2012–2015. Systém hnojení, dávky hnojiv a osevni postup byl jednotný na všech stanovištích. Byly vybrány čtyři varianty hnojení (statková + minerální hnojiva): (A) Kontrola/Control/ (bez hnojení, pouze vápnění v dávce 2 t.ha⁻¹ - základní půdní úrodnost stanoviště); (B) Hnůj/FYM/ + 0 (dávka hnoje 40 t.ha⁻¹ + minerální hnojiva: N, P, K 0 kg.ha⁻¹); (C) Hnůj/FYM/ + N3PK (dávka hnoje 40 t.ha⁻¹ + minerální hnojiva: N 120 kg.ha⁻¹, P 80 kg.ha⁻¹; K 100 kg.ha⁻¹); (D) Hnůj/FYM/ + N2 (dávka hnoje 40 t.ha⁻¹ + minerální hnojiva: N 80 kg.ha⁻¹). 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 modelových honů se pohybovala v rozmezí od 0,40 do 0,60 ha. Každý modelový hon byl rozdělen na 48 parcel (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 m².

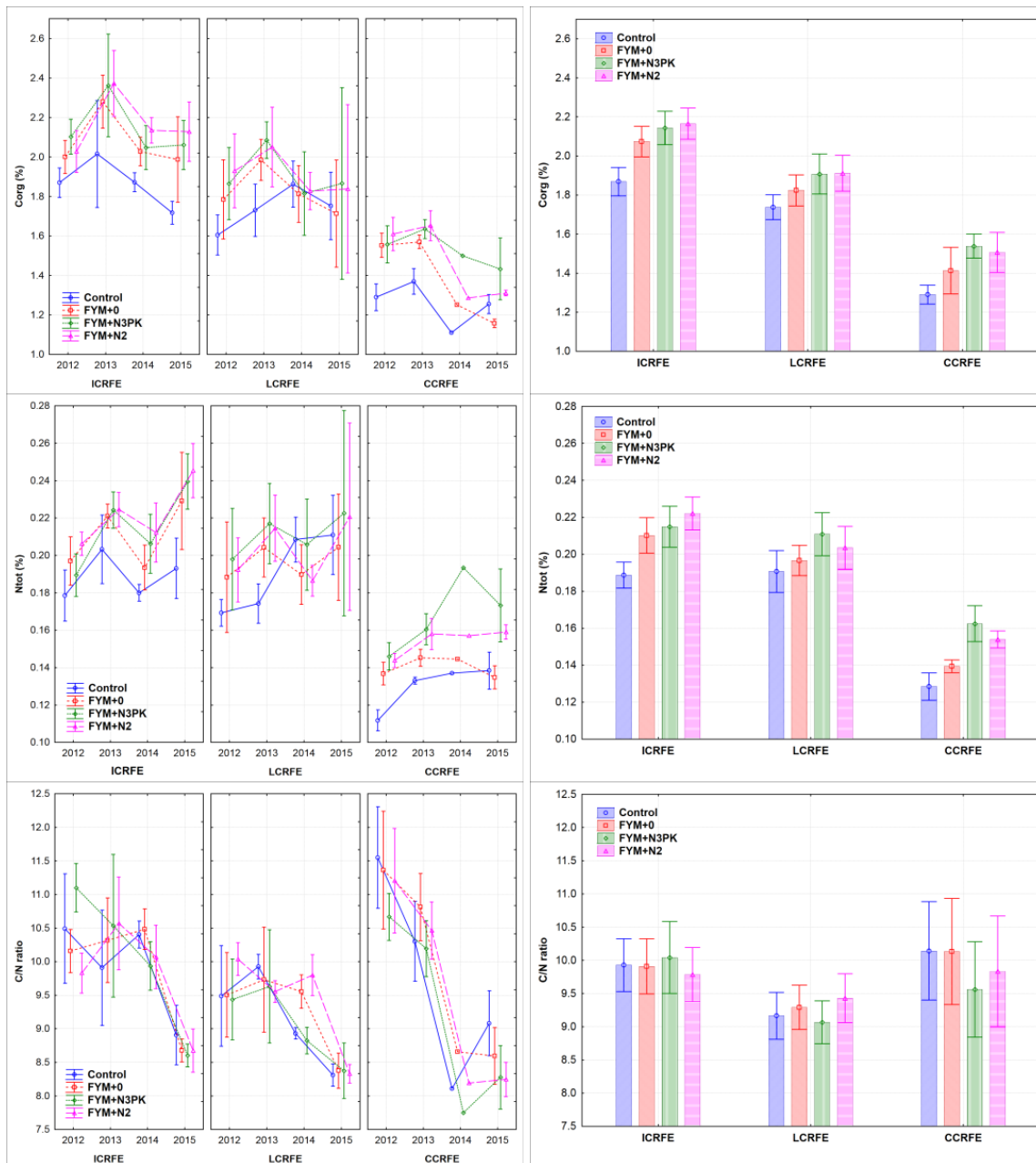


Obr. 4.3.1: Přehledová mapa VOP pokusů Národního centra zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i. v ČR.

Tab. 4.3.1: 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
Půda			
Půdní typ	Černozem modální (CEm)	Černozem karbonátová /luvicá - degradovaná/ (CEc/l/)	Kambizem modální (KMm)
Půdní druh	hlinitá	hlinitá	písčitohlinitá
Hloubka ornice (m)	0,35–0,45	0,40–0,50	0,15–0,20
Klimatické charakteristiky			
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

(3) Obsah SOC (C_{org}) byl stanoven v jednotlivých letech (2012–2015) na všech třech stanovištích od 1,05 do 2,38 % viz obr. 4.3.2 (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. 4.3.2, 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. 4.3.2 dole.

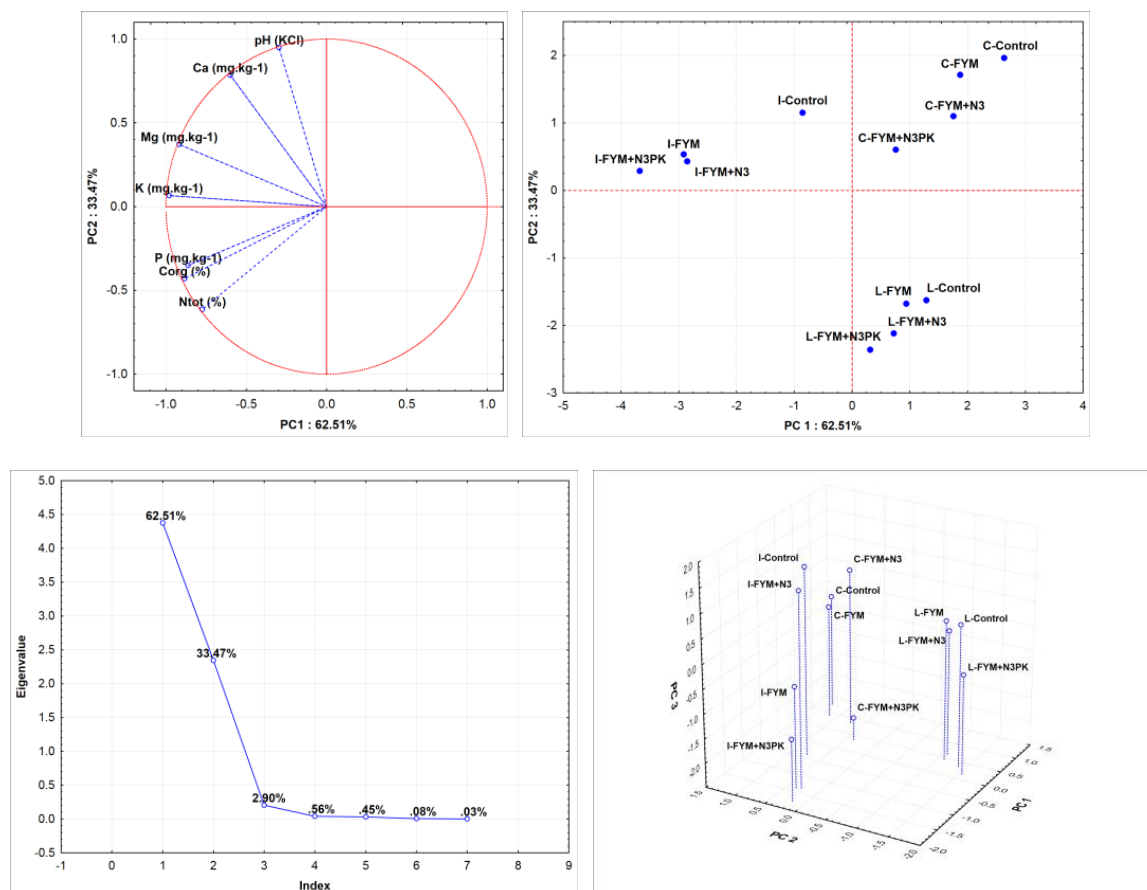


Pozn.: ICRFE - Ivanovice na Hané, CCRFE - Čáslav, LCRFE - Lukavec; Control - kontrola, FYM - hnoj, NPK - minerální hnojivo, C_{org} (SOC) - půdní organický uhlík, N_{tot} - celkový dusík, C/N ratio - poměr C/N

Obr. 4.3.2: Obsah uhlíku (C_{org}), dusíku (N_{tot}) a poměr C/N v období 2012–2015.

Půdní reakce (pH v KCl) na lokalitách ICRFE, CCRFE (černoze, degradovaná černoze) kolísala v rozmezí od 6,5 do 7,4. Pokles pH byl na obou lokalitách zaznamenán ve variantách FYM+N3PK a FYM+N2 (bez statisticky vyznaných 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 zjištěno statisticky nižší pH oproti všem ostatním variantám za období 2012–2015. Obsahy přístupného P a K na všech třech lokalitách (stanovištích) a ve všech variantách v jednotlivých letech vykazovaly obdobný trend (kromě varianty FYM+NPK na lokalitě LCRFE – zaznamenán postupný pokles P). Průměrný obsah P za období 2012–2015 se pohyboval od 45 do 195 mg.kg⁻¹. Nejvyšší obsahy byly zaznamenány na všech třech lokalitách ve variantě FYM+N3PK (statisticky významně vyšší oproti Control a FYM+0). 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⁻¹ (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).

Pro interpretaci zjištěných výsledků půdní organické hmoty a fyzikálně-chemických vlastností půdy byly použity metody vícerozměrné analýzy dat (PCA, FA, CLU) – viz obr. 4.2.3-5. 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. 4.2.3 (vlevo dole).

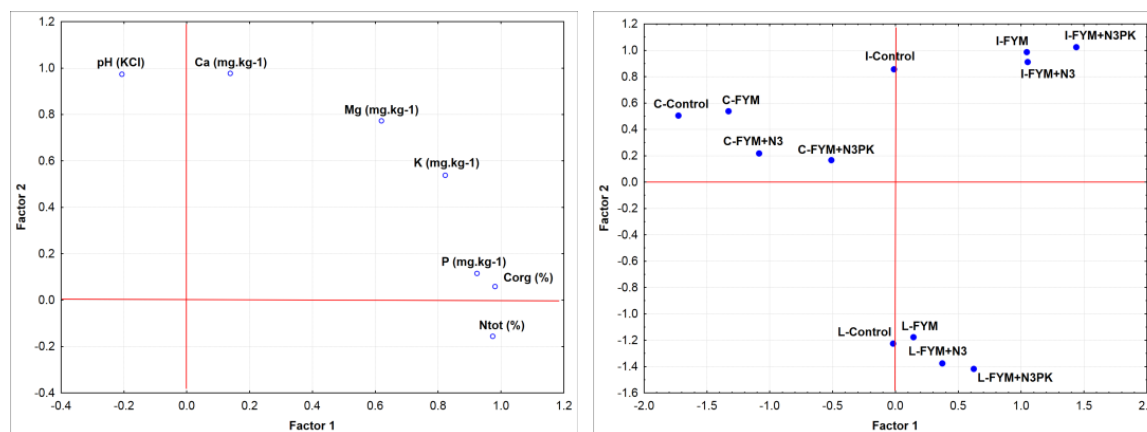


Pozn.: ICRFE - Ivanovice na Hané, CCRFE - Čáslav, LCRFE - Lukavec; Control - kontrola, FYM - hnůj, NPK - minerální hnojivo; C_{org} (SOC) - půdní organický uhlík, N_{tot} - celkový dusík, pH - půdní reakce, P - fosfor, K - draslík, Ca - vápník, Mg - hořčík

Obr. 4.3.3: Analýza PCA půdních vlastností – organická hmota (C_{org}, N_{tot}), přístupné živiny (P, K, Ca, Mg) a půdní reakce (pH) v období 2012–2015.

Osa PC1 v grafu PC1 x PC2 charakterizuje jednoznačně obsah přístupných živin K, Mg, P a dále stav SOM (C_{org} /SOC/) - viz obr. 4.3.3 (vlevo nahoře). Obsah K jde přímo podél této osy a je s ní

korelovaný ($r = -0,98$; záporná korelace), obsah Mg ($r = -0,91$), obsah $C_{org}/SOC/$ ($r = -0,88$), a dále obsah P ($r = -0,86$) i obsah N_{tot} ($r = -0,77$). Na ose PC2 je korelace s parametrem pH ($r = 0,95$) a Ca ($r = 0,78$). V rozptylovém diagramu komponentního skóre (obr. 4.3.3, vpravo nahoře) jsou podél osy PC1 rozdělené jednoznačně 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}), 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 Faktorové analýze (viz obr. 4.3.4) 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 - hnoj, 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. 4.3.4: 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. 4.3.2: 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} (%)	0,9818	0,0578	0,9638	0,9672	0,9966
N_{tot} (%)	0,9736	-0,1564	0,9479	0,9724	0,9962
P ($mg.kg^{-1}$)	0,9241	0,1151	0,8540	0,8673	0,9126
K ($mg.kg^{-1}$)	0,8232	0,5375	0,6777	0,9665	0,9718
Ca ($mg.kg^{-1}$)	0,1389	0,9770	0,0193	0,9739	0,9630
Mg ($mg.kg^{-1}$)	0,6200	0,7721	0,3844	0,9806	0,9865

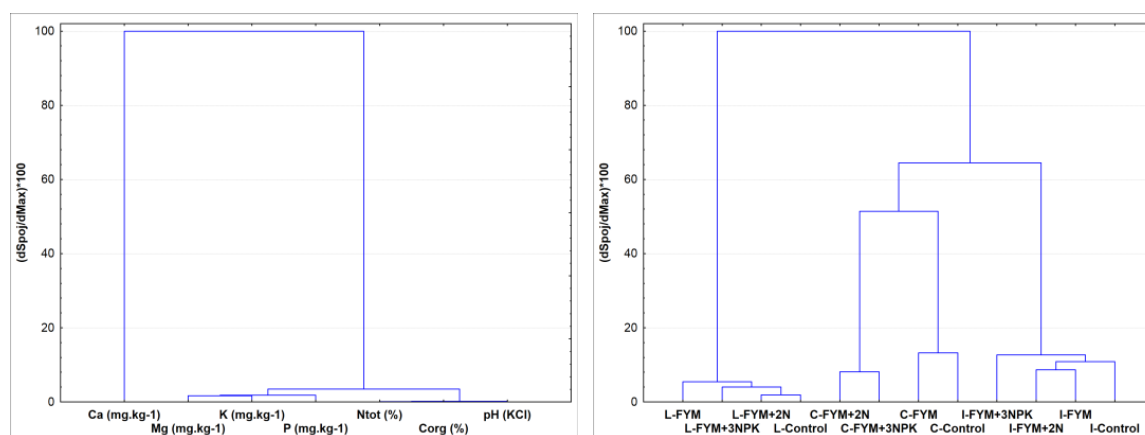
Pozn.: C_{org} (SOC) - půdní organický uhlík, N_{tot} - celkový dusík, pH - půdní reakce, P - fosfor, K - draslík, Ca - vápník, Mg - hořčík

Dendrogramy viz obr. 4.3.5 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.

(4) Multikriteriální statistické hodnocení dat (analýzy PCA, FA, CLU), jednoznačně diferencovaly na základě sledovaných charakteristik (obsah $C_{org}/SOC/$, N_{tot} , poměr C/N, půdní reakce, přístupné živiny) tři rozdílné půdně-klimatických lokality (půda, klima) a dále i významně diferencovaly 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} , 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), vydané v nakladatelství *IntechOpen*.



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

Studie 4: Jak minerální hnojení a půdně-klimatické podmínky ovlivní výnos zrna ječmene jarního a chemické vlastnosti půdy (SOC, N_{tot} , živiny)

(1) Cílem studie bylo vyhodnotit vliv tří odlišných variant ošetření (kontrola – bez hnojení, N – minerální dusík odpovídající dávce 60 kg/ha a NPK – minerální dusík, fosfor a draslík odpovídající dávkám 60, 60 a 80 kg/ha) na půdní vlastnosti ve třech různých půdně-klimatických podmínkách v období 2013 až 2016. Vybranými půdními vlastnostmi bylo pH půdy, obsah organického uhlíku (SOC), celkový obsah dusíku (N_{tot}) a obsah rostlinou přijatelných živin (Ca, K, Mg a P).

(2) Výzkum byl proveden v dlouhodobých polních výživářských pokusech (VOP, CARC) na stanovištích Ivanovice na Hané, Čáslav a Lukavec založených v roce 1956 viz *Studie 3*. Pro studii bylo využito tři variant: kontrola (nehnojená od 1955), N (minerální dusík odpovídající dávce 60 kg/ha) a NPK (minerální dusík, fosfor a draslík odpovídající dávce 60, 60 a 80 kg/ha). Dávky N, P a K představují dávku čistých živin. N byl dodáván ve formě dusičnanu vápenato-amonného (27 % N) během předseťové přípravy (ruční rozmetání) na jaře. P byl aplikován v hnojivu superfosfát (19,4 % P) na podzim podobně jako K, který byl dodáván jako chlorid draselný (49,8 % K). Předchozí plodinou byla vždy kukuřice na siláž (odrůda LG 32.58), hnojená hnojem z chovu skotu (40 t/ha, přibližně 200, 56 a 236 kg N, P a K na ha). V kontrolní variantě kukuřice na siláž nebyl hnůj použit. Hlavní plodinou pěstovanou v rámci této studie byl ječmen jarní (odrůda 'Bolán').

(3) Obsah přijatelných živin v hloubce půdy 0–30 cm byl částečně ovlivněn variantou hnojení (*tabulka 4.4.1*). Při porovnání s kontrolní a N variantou byl vlivem používání minerálních P a K hnojiv (varianta NPK) ve sledovaném čtyřletém období zjištěn vyšší obsah K a P v půdě na všech lokalitách. V případě P nebyl zjištěn statisticky průkazný rozdíl mezi kontrolní variantou a N variantou. Přestože vlivem hnojení došlo u varianty N k mírnému zvýšení obsahu K v porovnání s kontrolou, tento rozdíl také nebyl statisticky průkazný. Z těchto výsledků lze usoudit, že varianta N představuje jakýsi přechodný krok mezi nehnojenou kontrolní variantou a NPK variantou. Obsah Ca nebyl ovlivněn

variantou hnojení ani na jedné lokalitě (tabulka 4.4.1). V případě obsahu Mg došlo pouze na lokalitě Čáslav k mírnému zvýšení u varianty N a NPK v porovnání s kontrolní variantou.

Tab. 4.4.1: Obsah rostlinou přijatelných živin (Ca, K, Mg a P) v půdě dle lokality a varianty hnojení.

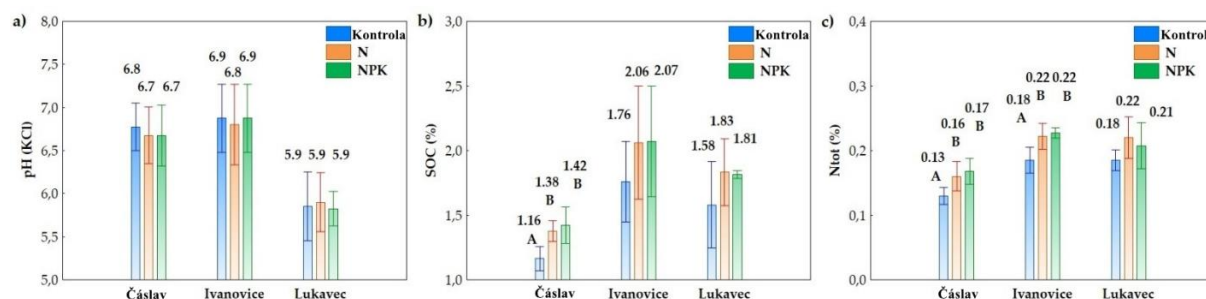
	Ca	K	Zhodnocení	Mg	Zhodnocení	P	Zhodnocení
Čáslav							
Kontrola	3015 ± 143 ^A	108 ± 20 ^A	Vyhovující	114 ± 7 ^A	Vyhovující	42 ± 4 ^A	Nízký
N	2946 ± 126 ^A	130 ± 15 ^{AB}	Vyhovující	145 ± 7 ^B	Vyhovující	53 ± 17 ^A	Nízký
NPK	2910 ± 192 ^A	163 ± 18 ^B	Vyhovující	150 ± 8 ^B	Vyhovující	146 ± 2 ^B	Vysoký
Ivanovice							
Kontrola	4257 ± 205 ^A	174 ± 7 ^A	Dobry	184 ± 16 ^A	Dobry	65 ± 7 ^A	Vyhovující
N	4192 ± 243 ^A	279 ± 22 ^{AB}	Dobry	235 ± 12 ^A	Dobry	117 ± 14 ^A	Dobry
NPK	4239 ± 221 ^A	429 ± 67 ^B	Velmi vysoký	133 ± 17 ^A	Vyhovující	232 ± 25 ^B	Velmi vysoký
Lukavec							
Kontrola	2054 ± 69 ^A	110 ± 16 ^A	Vyhovující	110 ± 9 ^A	Vyhovující	46 ± 8 ^A	Nízký
N	2209 ± 80 ^A	129 ± 11 ^{AB}	Vyhovující	109 ± 6 ^A	Vyhovující	50 ± 5 ^A	Nízký
NPK	2181 ± 93 ^A	162 ± 12 ^B	Vyhovující	103 ± 7 ^A	Nízký	158 ± 10 ^B	Vysoký

Pozn.: Hodnoty jsou vyjádřeny jako průměr ± směrodatná chyba průměru. Stejná písmena za hodnotou (A – svisle) ukazují statisticky neprůkazné rozdíly ($p < 0,05$).

Vliv varianty hnojení na hodnotu pH půdy na všech sledovaných lokalitách nebyl statisticky průkazný (obr. 4.4.1a). Na lokalitě Čáslav se hodnota pH pohybovala v rozpětí od 6,7 do 6,8, na lokalitě Ivanovice od 6,8 do 6,9 a na lokalitě Lukavec byla u všech variant hodnota pH 5,9.

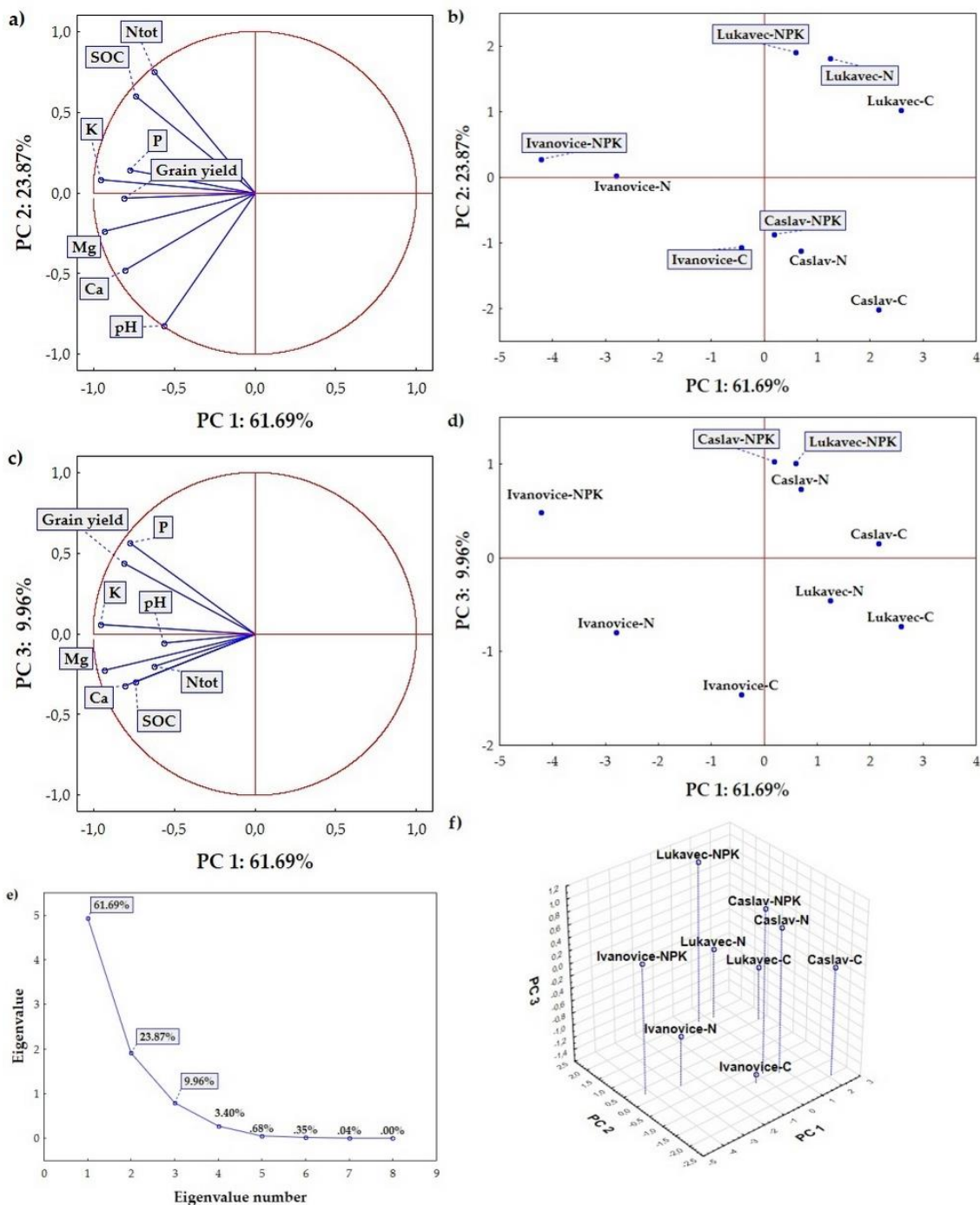
Obsah SOC se lišil dle lokalit a statisticky průkazný vliv variant byl zjištěn pouze u lokality Čáslav (degradovaná černozem), kde obsah SOC dosahoval nejnižších hodnot (obr. 4.4.1b). U varianty N byla hodnota obsahu SOC 1,38 % a u varianty NPK 1,42 %. Obě tyto varianty dosahovaly statisticky významně vyšších hodnot obsahu SOC v porovnání s kontrolní variantou (1,16 %). Nejvyšší obsah SOC byl zjištěn na lokalitě Ivanovice, kde se hodnoty pohybovaly od 1,76 % (kontrolní varianta) do 2,07 % (varianta NPK). Rozdíly mezi variantami však nebyly statisticky průkazné (d.f. = 3, $F = 2,05$, $p = 0,185$). Podobný trend v obsahu SOC byl zjištěn i u poslední lokality, Lukavec, kde také nebyly rozdíly mezi variantami statisticky průkazné (d.f. = 3, $F = 3,4$, $p = 0,079$) a pohybovaly se od 1,58 % (kontrolní varianta) do 1,81 % (varianta N).

V případě obsahu N_{tot} byl u lokality Čáslav a Ivanovice zjištěn statisticky průkazný vliv varianty N a NPK na tento parametr v porovnání s kontrolní nehnojenou variantou (obr. 4.4.1c). Avšak rozdíl mezi hnojenými variantami nebyl statisticky průkazný ani na jedné z těchto dvou lokalit. Obsah N_{tot} dosahoval na lokalitě Čáslav hodnot od 0,13 % (kontrolní varianta) do 0,17 % (varianta NPK) a na lokalitě Ivanovice hodnot od 0,18 % (kontrolní varianta) do 0,22 % (varianta N a NPK). Na třetí sledované lokalitě Lukavec, nebyl zjištěn statisticky průkazný rozdíl mezi variantami hnojení. Obsah N_{tot} pohyboval v rozmezí od 0,18 % (kontrolní varianta) do 0,22 % (varianta N).



Pozn.: Hodnoty průměrů se stejným písmenem nejsou statisticky průkazně rozdílné ($p < 0,05$). Hodnoty bez písmene značí, že v lokalitě nebyl zjištěn rozdíl mezi variantami.

Obr. 4.4.1: Vliv variant hnojení na: (a) pH půdy, (b) obsah organického uhlíku (SOC, %) a (c) celkový obsah dusíku (N_{tot} , %) na lokalitě Čáslav, Ivanovice a Lukavec (2013–2016).



Pozn.: (a) PC1 a PC2 – výnos zrna a parametry půdy, (b) PC1 a PC2 – varianty hnojení dle lokality, (c) PC1 a PC3 – výnos zrna a parametry půdy, (d) PC1 a PC3 – varianty hnojení dle lokality, (e) graf vlastních čísel a (f) 3D model ukazující osy PC1, PC2 a PC3.

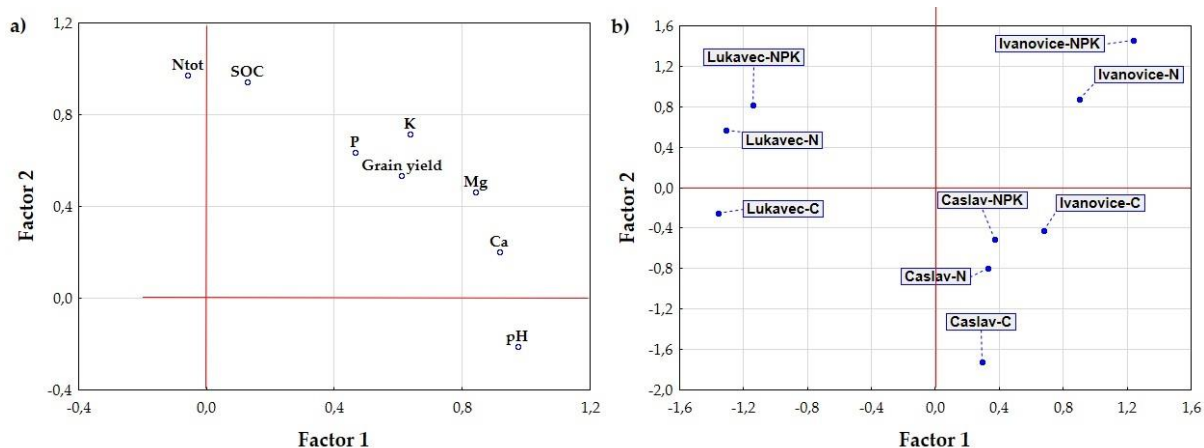
Obr. 4.4.2: Výsledky PCA analýzy ukazující vztah mezi parametry půdy (pH, obsah SOC, N_{tot} , Ca, K, Mg a P), výnosem zrna a variantou hnojení/lokality.

Pro vyhodnocení vztahu mezi sledovanými parametry byla využita analýza PCA, jejíž výsledky ukazují, že dle váhových koeficientů os PC1, PC2 a PC3 (Obr. 2a,c) jsou významné první dvě osy. Tyto osy společně vysvětlují 85 % variability (Obr. 2e). Osa PC1 v grafu PC1 × PC2 jednoznačně charakterizuje obsahy K a Mg, jež se nacházejí podél této osy a mají vysoký korelační koeficient přesahující hodnotu 0,9. Dále byla na této ose zjištěna korelace pro výnos zrna ($r = 0,81$) a obsah Ca ($r = 0,80$). Na ose PC1 byla také potvrzena významná korelace s P a SOC ($r = 0,74-0,77$). V případě osy

PC2 byla zjištěna významná korelace s pH ($r = 0,82$) a N_{tot} ($r = 0,74$). Na ose PC3 nebyla pozorována významná korelace.

Výsledky rozptylového diagramu hodnocených komponent (*obr. 4.4.2b*) ukazují, že jsou lokality (Čáslav, Ivanovice a Lukavec) a varianty hnojení (kontrola, varianta N a NPK) jednoznačně umístěny podél osy PC1. Nejvyšší obsahy Ca, K a Mg jsou u lokality Ivanovice (půdní typ černozem). U lokality Čáslav (půdní typ černozem degradovaná) a Lukavec (kambizem) dosahují obsahy Ca, K a Mg podobných hodnot a z tohoto důvodu se nacházejí na stejné úrovni v rámci osy PC1. Podobný trend je možné pozorovat i v případě výnosu zrna, kdy porovnatelné hodnoty byly zjištěny u lokality Čáslav a Ivanovice. U lokality Lukavec byl nižší výnos zjištěn u kontrolní varianty, a naopak vysoký výnos u variant N a NPK, podobně jako u lokality Čáslav. V případě osy PC2 bylo rozdělení významné a dle výsledků (*obr. 4.4.2b*) se lokalita Lukavec významně liší od zbylých dvou lokalit (Čáslav a Ivanovice), což je způsobeno především nižší hodnotou pH a vyšším obsahem SOC a N_{tot} u lokality Lukavec v porovnání s lokalitou Čáslav.

Faktorová analýza (*obr. 4.4.3*) potvrdila výsledky analýzy PCA a rozdělila lokality a varianty hnojení podobně jako PCA analýza (*obr. 4.4.2*). Vypočítané váhy faktorů vysvětlují korelace mezi faktory a proměnnými (*tabulka 4.4.3*) a představují nejdůležitější informaci, na které je interpretace faktorů založena. Lze tak tedy usuzovat, že Faktor 1 popisuje vlastnosti půdy (pH, obsah Ca a Mg – významné rozdíly mezi lokalitami Lukavec a Ivanovice s lokalitou Čáslav) a Faktor 2 jasně popisuje obsah SOC a N_{tot} (významně vyšší obsah SOC a N_{tot} v hnojených variantách ve srovnání s kontrolní variantou u všech třech lokalit). Komunalita představuje podíl variability znaků vyjádřený danými faktory a je podobná hodnotě R^2 , kterou je možné získat, pokud jsou původní znaky vysvětleny regresí vybraných znaků (Meloun a Militský 2011). Z výsledků uvedených v *tabulce 4.4.3* je zřejmé, že komunalita z příspěvku Faktoru 1 a 2 dosahuje vysokých hodnot ($> 0,9$) a proto lze konstatovat, že tyto charakteristiky jsou velmi dobře zohledněny v navrženém faktorovém modelu.



Obr. 4.4.3: Výsledky faktorové analýzy ukazující vztah mezi (a) vlastnostmi půdy (pH, obsah SOC, N_{tot} , Ca, K, Mg a P) a výnosem zrna a (b) variantou hnojení/lokalitou.

Tab. 4.4.2: Váha faktorů a příspěvek daného faktoru ke komunalitě pro jednotlivé charakteristiky po normalizaci pomocí Varimaxové rotaci pro produkci (výnos) a parametry půdy.

Proměnná	Váha faktoru		Podíl faktoru		Komunalita
	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 1	Faktor 2	
pH (KCl)	0,9734	-0,2113	0,9475	0,9922	0,9999
Ca	0,9157	0,2041	0,8385	0,8802	0,9999
K	0,6374	0,7158	0,4063	0,9187	0,9964
Mg	0,8403	0,4649	0,7060	0,9221	0,9567
P	0,4635	0,6353	0,2148	0,6184	0,9901
SOC	0,1270	0,9428	0,0161	0,9050	0,9999
N_{tot}	-0,0604	0,9723	0,0037	0,9490	0,9992
Výnos zrna	0,6106	0,5355	0,3728	0,6595	0,9972

(4) Varianty hnojení významně ovlivňují některé ze sledovaných vlastností půdy ve vybraných lokalitách s rozdílnými půdně-klimatickými podmínkami (Čáslav, Lukavec, Ivanovice). Hodnota pH nebyla ovlivněna aplikací minerálních hnojiv, což bylo způsobeno především pravidelnou aplikací chlévského hnoje na předplodinu (kukuřice na siláž) a také přirozenými vlastnostmi půdy v některých lokalitách, např. vysokou pufrací kapacitou černozemě v lokalitě Ivanovice. Právě přídavek organických hnojiv může vyrovnat nebo zabránit negativnímu vlivu použití pouze minerálních hnojiv (Zeng *et al.* 2017). Obsahy K a P v půdě byly pozitivně ovlivněny aplikací NPK hnojiv. Podobné výsledky byly zjištěny v publikacích (Liu *et al.* 2010) a Shang *et al.* (2014). Pravidelná aplikace P a K minerálními hnojivy zabraňuje jejich vyčerpání, zejména v situaci, kdy je rostlinná výroba závislá na minerálním N, jak je tomu v České republice. Právě použití hnojiv s P a K také mírně zvýšilo účinnost N, zejména v lokalitě Lukavec, která je charakteristická půdou s nízkou přirozenou úrodností. V případě obsahu SOC byl významný vliv minerálního hnojení pouze na lokalitě Čáslav, kdy aplikace hnojiv zvyšovala obsah SOC. Zvýšení SOC vlivem minerálních hnojiv bylo potvrzeno i v dalších studiích (Chen *et al.* 2018; Maltas, Dupuis, *et al.* 2018). Jak však uvádí Zhengchao *et al.* (2013), úroveň zvýšení SOC je závislá na půdně-klimatických podmínkách. Což naznačují i výsledky studie, kdy v lokalitě Ivanovice a Lukavec byl obsah SOC vždy vyšší vlivem variant N a NPK ve srovnání s kontrolou, ale rozdíly byly statisticky neprůkazné.

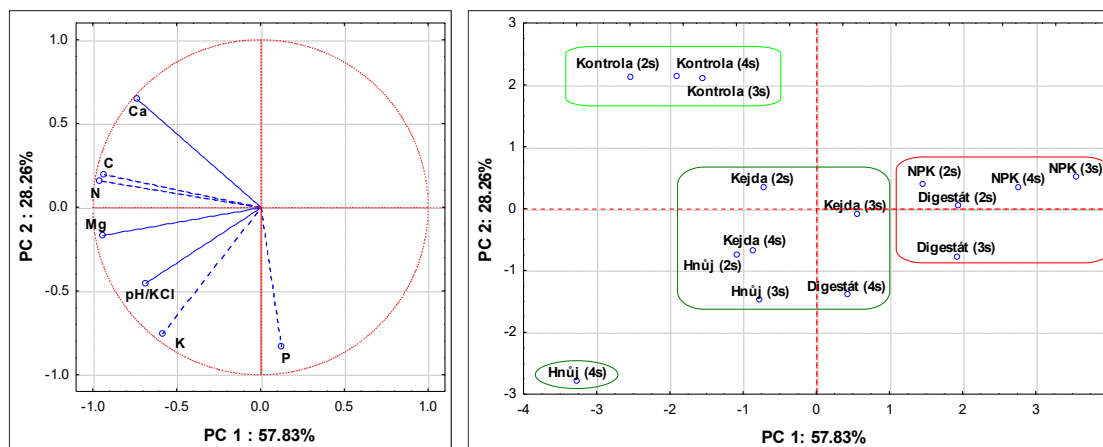
Rozšířené výsledky studie byly publikovány v časopisu *Agronomy* (MDPI) – viz podrobně Hlisnikovský, Křížová, *et al.* (2021).

Studie 5: Vliv obhospodařování a hnojení TTP statkovými a minerálními hnojivy na kvalitu a zdraví půdy (SOM, živiny, půdní reakce)

(1) Cílem studie bylo vyhodnotit vliv dlouhodobého hnojení (minerální, chlévský hnůj, kejda, digestát v modelové zatížení skotem 1–2 DJ.ha⁻¹) a managementu využívání TTP (2–4 seče/rok) na stav půdy (obsah SON, přístupných živin apod.) v pokusu, založeném na údolní louce s trvalým travním porostem v oblasti Malé Hané (Boskovická brázda).

(2) Výzkum byl proveden v dlouhodobém pokusu, založeném v roce 2004 na trvalém travním porostu /TTP/ (poloha: 49,6282881N, 16,7317036E; CARC, 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), formou přesných maloparcelových ploch. Půdním typem výzkumných ploch je fluvizem slabě oglejená. 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). 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 DJ.ha⁻¹. Podrobná metodika výzkumu je uvedena v monografii Menšík and Nerušil (2019)

(3) Na grafu komponentních vah PC1, PC2 (*obr. 4.5.1*) 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 $-0,75$). V rozptylovém diagramu komponentního skóre (*obr. 4.5.1*) 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 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.



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

Obr. 4.5.1: 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 v období 2016–2019.

(4) 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 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.

Rozšířené výsledky studie včetně výnosů, botanického složení a kvality píče byly publikovány v monografii Menšík, Nerušil (2019).

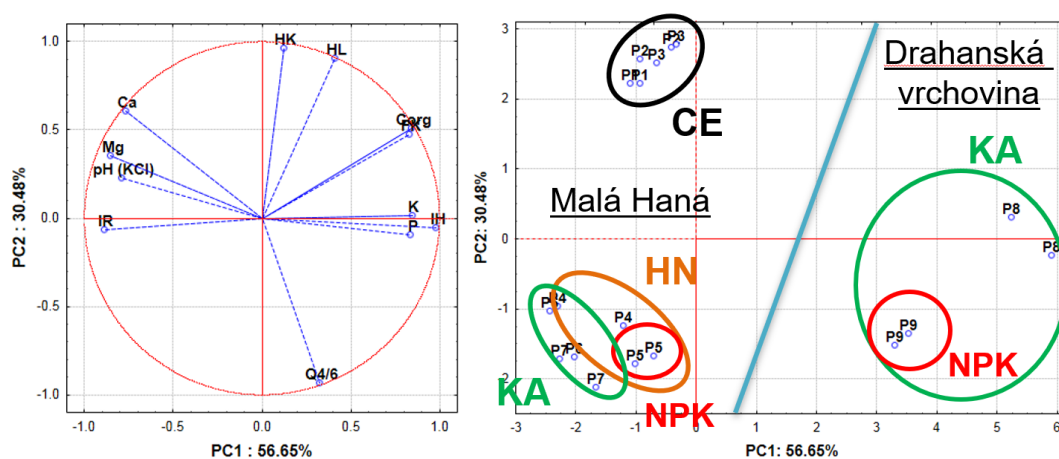
Studie 6: Monitoring stavu půdní organické hmoty v zemědělských podnicích v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny

(1) Cílem studie bylo vyhodnotit pomocí vícerozměrných statistických metod (PCA, FA, CLU) vliv minerálního hnojení (NPK) a hnojení statkovým hnojivem (hnůj) na stav půdní organické hmoty (obsah organického uhlíku, frakcionaci humusových látek /obsah humusových látek, huminových kyseliny, fulvokyselin/, stupeň humifikace, barevný kvocient, spektra UV-VIS, FTIR), půdní reakci a obsah přístupných živin v půdě (dusík, fosfor, draslík, hořčík) v provozních podmínkách.

(2) Výzkum (monitoring) byl proveden na vybraných experimentálních polích (provozní pokusy) v různých půdně klimatických podmínkách (350–650 m n. m., půdní typy: černozem, hnědozem, kambizem) zemědělských společností hospodařící v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d.) a Dražanské vrchoviny (AGROSPOL, a.d., ZD Lipová, družstvo) – viz podrobně Menšík et al. (2023).

(3) V rozptylovém diagramu komponentního skóre (obr. 4.6.1, vpravo) jsou podél osy PC1 rozdělené jednoznačně jednotlivé skupiny experimentálních polí (druh půdy, nadmořská výška, varianta 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 výrazně 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}, 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 půdně-klimatické podmínky daných experimentálních polí (P1-3; P4-7; P8-9). V oblasti Dražanské vrchoviny (P8,9) se významně odlišuje pole P8 (dlouhodobé hnojení hnojem – ZD Lipová, družstvo) od P9 (dlouhodobé hnojení pouze minerálními hnojivy se zapravením slámy a posklizňových zbytků – podnik AGROSPOL, a.d. v oblasti Dražanské vrchoviny z důvodu značné vzdálenosti budov s ustájením skotu nepoužívá statková hnojiva). Pole 8 má vyšší pH, vyšší obsah C_{org} , 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 diferencovaly shluky experimentálních polí P1-3 a P4-P7. Pole P1-P3 jsou situovány na velmi kvalitních půdách typu černozem luvičká (CE), pole (P4-7) jsou na půdních typech hnědozem modální /HNm/ a kambizem modální /KAm/. V oblasti Malé Hané podnik 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 40–50 t.ha⁻¹). 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 luvičká). Obdobná situace (objekty jsou si vzájemně podobné, a proto se neprojevil vliv hnojení /hnůj – NPK/) je i ve shluku polí P4-P7, který je charakterizován půdními typy hnědozem modální /HNm/ (P4,5) a kambizem modální /KAm/ (P6,7).



Pozn.: pH - půdní reakce, C_{org} - 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; Půdní typ: CE - černozem, HN - hnědozem, KA - kambizem

Obr. 4.6.1: Vícerozměrná statistická analýza (PCA) základních půdních vlastností v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny v období 2018–2021.

(4) 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, stabilizují produkci z pohledu kvantity a kvality potravin (krmiv) a zároveň zvyšují adaptační potenciál současně půdy v důsledku měnících se podmínek prostředí (předpokládané účinky probíhající klimatické změny). Naopak na pozemcích (půd) dlouhodobě hnojených pouze minerálními hnojivy se zapravením slámy a posklizňových zbytků, se zvyšuje mineralizace a acidifikace půdy a zároveň se snižuje obsah stabilních humusových látek a přístupných živin apod.

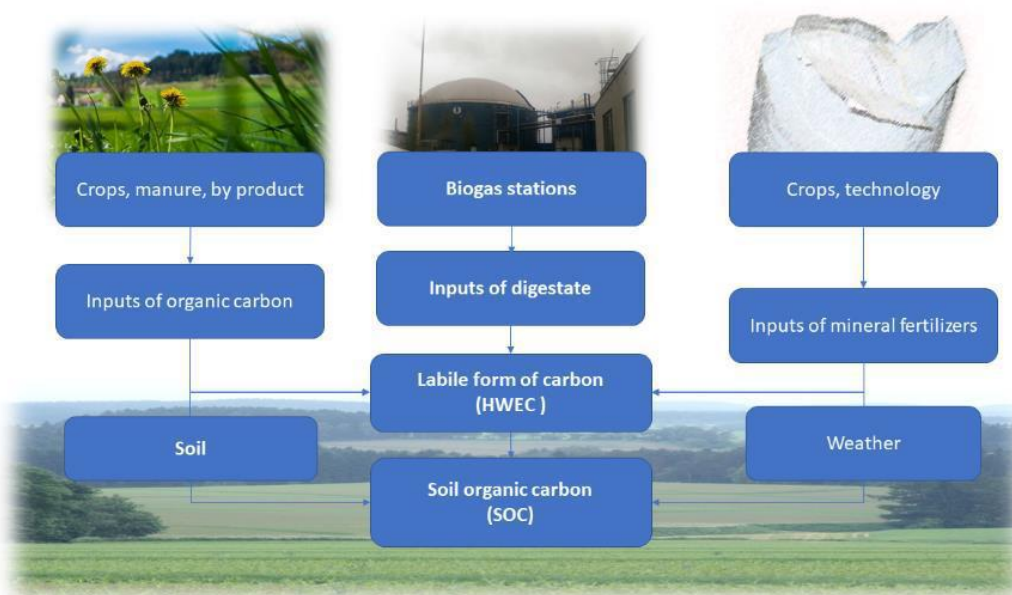
Rozšířené výsledky dílčí studie byly publikovány v monografii Menšík *et al.* (2023a).

Studie 7: Organická hmota v půdě v závislosti na vlastnostech půdy a aplikaci různých hnojiv

(1) Cílem studie bylo komplexně vyhodnotit stav a změny obsahu půdního organického uhlíku /SOC/ (stabilní forma C) a uhlíku rozpuštěného v horké vodě /HWEC/ (labilní forma C, angl. *hot water extrable carbon*) – viz obr. 4.7.1, 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 (lokalit), získaného v provozních podmínkách zemědělských podniků hospodařících v různých půdně-klimatických podmínkách České republiky.

(2) 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. Půdními typy experimentálních pozemků byly černozemě (CE), hnědozemě (HM), luvizemně (LU), kambizemě (KA), fluvizemě (FL), stagnogleje (SG) a další. Experimentální plochy byly vybrány na základě průzkumu homogenních půdních vlastností v dlouhodobém sledování výnosů plodin na základě evidence bonitovaných půdně-ekologických jednotek /BPEJ/ tak, aby alespoň 70 % plochy pozemku bylo tvořeno jednou BPEJ. Zemědělské podniky (farmy), zahrnuté do sledování, provozovaly zemědělské bioplynové stanice (na experimentálních polích byl do půdy aplikován digestát podle dispozice zemědělského pozemku). Na experimentálních polích (lokalitách) byly kromě výnosu pěstovaných plodin sledovány další informace, jako sběr slámy po sklizni, agrotechnika (tj. orba nebo bezorebné zpracování půdy), aplikace hnojiv – dusíku, fosforu, draslíku, organických živin ve formě hnojiv živočišného původu, rostlinných zbytků a zeleného hnojení. Specificky byly sledovány dávky technologické vody a digestátu z bioplynových stanic. K hodnocení výsledků výzkumu byly použity techniky průzkumové analýzy jednorozměrných a vícerozměrných dat, lineární regrese – výstavba vícerozměrného lineárního regresního modelu regresním tripletem apod. Podrobná metodika výzkumu je uvedena ve studii Voltr, Menšík et al. (2021).

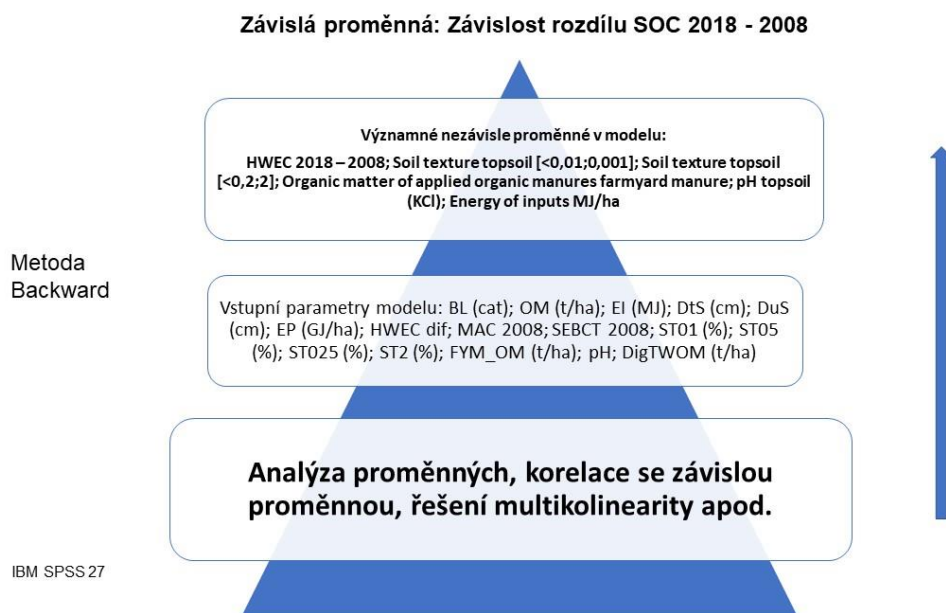


Obr. 4.7.1: Obecné schéma tvorby SOC a HWEC.

(3) Soubor dat byl pořízen na 68 lokalitách (experimentálních polích) v období 2008–2018. Nejzastoupenějším půdním typem byla černozem (28 lokalit), dále hnědozem (13 lokalit), kambizem (11 lokalit), luvizemě (8 lokalit), fluvizemě (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 černozemě (6,59), nejnižší u půdního 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 černozemě (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 k nárůstu SOC v půdě. Stanovení obsahu HWEC bylo provedeno na začátku a konci sledovaného období (2008 a 2018). Obsah HWEC na experimentálních polích v roce 2018 byl zjištěn v rozpětí od 225 do 666 mg.kg⁻¹. Průměrné hodnoty dle půdního typu byly vypočítány od 335 mg.kg⁻¹ (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⁻¹ (stagnoglej) do 178 mg.kg⁻¹ (fluvizem). V průměru všech sledovaných půdních typů došlo v půdě k poklesu HWEC. Průměrná nasycenost sorpčního komplexu (CEC %) za období 2008–2018 byla stanovena od 63 (stagnoglej) do 93 (fluvizem, 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⁻¹ (stagnoglej) do 157,2 kg.ha⁻¹ (luvizem). Vstup N z minerálních hnojiv je obdobný jako celkový N. V případě celkového P se průměrný vstup do půdy v hnojivech na sledovaných experimentálních lokalitách pohyboval od 19,7 kg.ha⁻¹ (fluvizem) do 47,6 kg.ha⁻¹ (černozem). Průměrný vstup celkového K na sledovaných experimentálních lokalitách se pohyboval od 12,0 kg.ha⁻¹ (kambizem) do 69,1 kg.ha⁻¹ (luvizem). Nejvyšší průměrný vstup K byl zaznamenán na půdním typu stagnoglej (186,5 kg.ha⁻¹). Průměrná zrnitost půdy (%) dle jednotlivých půdních typů se v první kategorii (0,001-0,01 mm) se pohybovala v rozsahu od 13,7 (luvizem) do 24,8 (stagnoglej). Ve druhé kategorii (0,25-2,00 mm) byly průměrné hodnoty v rozpětí od 1,3–3,9 % (černozem, luvizem, hnědozem, fluvizem) a dále od 16,4 do 20,7 % (stagnoglej, kambizem).

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 pomocí přepočtového koeficientu 1,721088 pro průměrné podmínky ČR) – viz obr. 4.7.2. Pro stanovení regresních rovnic byla použita metoda Backware, která postupně odebírala nesignifikantní proměnné. Finální model (celkem bylo dílčích 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. 4.7.2: Vývojové schéma pro model Závislost rozdílu SOC mezi roky 2018 a 2008.

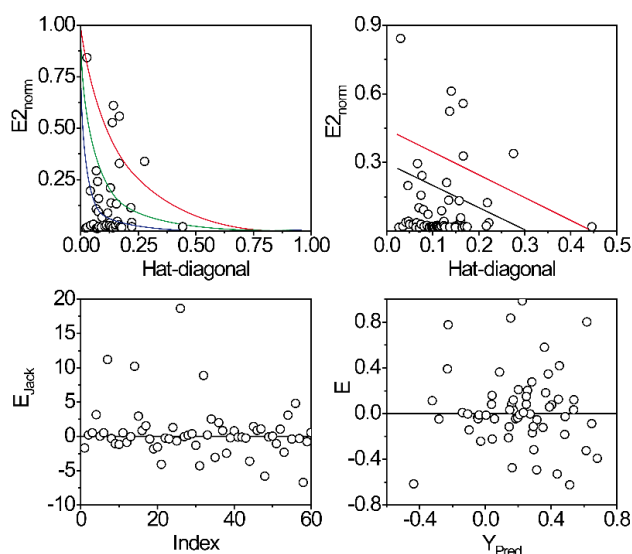
Finální vícerozměrný lineární regresní model pro Závislost rozdílu SOC mezi roky 2018 a 2008 (DH SOC) byl dále zpřesněn pomocí regresní diagnostiky tzv. regresním tripletem (Meloun, Militký 2012). Pro zpřesnění modelu byla použita metoda IRWLS exp(-e). To je robustní regresní metoda ze třídy M-odhadů, 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:

$$\text{Humus Difference } 2018 - 2008 = 2.3920 + 0.0006 * \text{Difference HWEC} - 0.223 * \text{ST01\%} - 0.0232x \text{ ST2 (\%)} + 0.0201 * \text{FYM_OM (t / ha)} - 0.1308 * \text{pH (KCl)} - 6.9199 * \text{ENPKB (MJ ha}^{-1}\text{)} - 0.0111 * \text{SSD (cm)}.$$

Statistické charakteristiky regrese jsou následující: $r = 0,9385$, $R^2 = 0,8808$, $\text{MEP} = 0,1396$, $\text{AIC} = -221,3600$. Model je významný dle Fisher-Snedecorova testu významnosti modelu ($F = 54,9392$, kvantil $F = 2,1916$, $8,4837\text{E-}022$) a je korektní dle Scottova kritéria multikolinearity ($\text{SC} = -0,0751$). 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. 4.7.3.



Obr. 4.7.3: 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/).

(4) Výsledky studie jednoznačně prokázaly, že:

- na všech sledovaných experimentálních lokalitách v období 2008–2018 se obsah SOC (stabilní složka SOM) v průměru zvýšil, obsah HWEC (labilní složka SOM) se naopak snížil;
- obsah HWEC (labilní složka C) je významně ovlivňován aktuální úrodností půdy v parametrech obsah fosforu (-30 %) a aplikací organických hnojiv /digestát/ (+29 %), dále CEC (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 texturou 0,01–0,001mm (10 %), vstupem organické hmoty a živin ze živočišné výroby (10 %), negativním působením minerálního hnojení (-14 %), hloubkou půdy v podorniči (-11 %) a půdní texturou 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 organické hmoty ve formě statkových hnojiv /FYM/ aplikuje málo, obsah humusu výrazně klesá. Potvrzuje to i výstavba regresního modelu 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.

Dosažené výsledky dále potvrdily důležitost současného sledování stabilní /SOC/ i labilní /HWCE/ složky SOM ve vztahu k fyzikálně-chemickým, ale i biologickým vlastnostem půdy (*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* (MDPI) – viz podrobně Voltr, Menšík *et al.* (2021) a dále jsou součástí monografie Menšík *et al.* (2023a).

Studie 8: Modelování změn obsahu půdní organické hmoty v půdách ČR

(1) Cílem výzkumu bylo vyhodnotit na příkladu případových vědeckých studií možnosti predikce změn obsahu půdní organické hmoty v orných půdách na území ČR pomocí procesně orientovaných simulačních modelů, jakým je např. volně dostupný model EPIC⁴.

(2) Realizované studie v oblasti modelování obsahu půdní organické hmoty (SOM) byly:

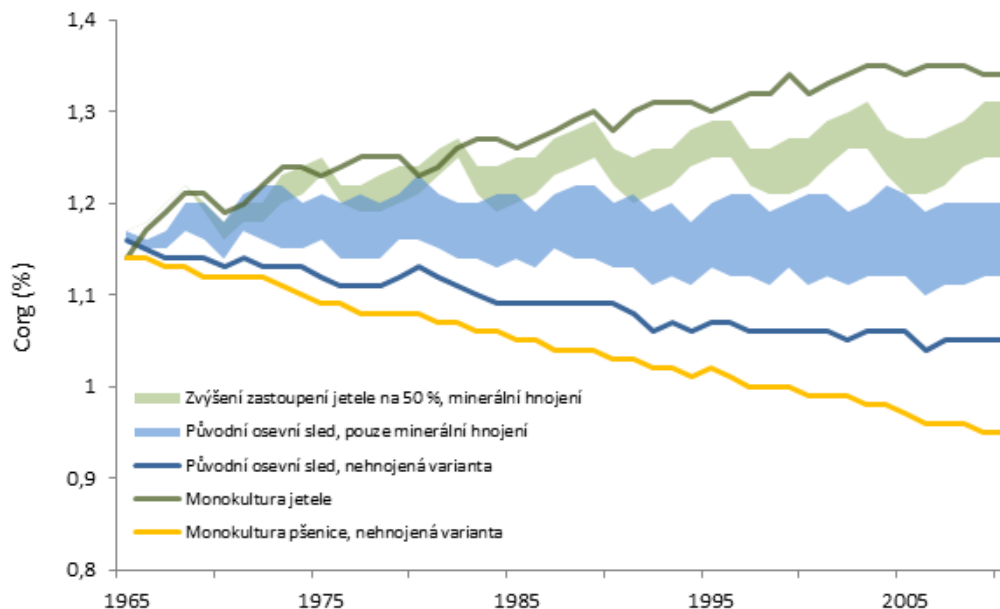
- Madaras *et al.* (2017) - kalibrován a validován model EPIC na lokální úrovni pomocí výsledků dlouhodobého pokusu se zadržkou slámy v lokalitě Trutnov, validovaný model EPIC byl využit pro testování virtuálních scénářů různých managementů při stejném klimatu a hnojení pouze minerálními hnojivy.

- Balkovič *et al.* (2020) - 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.

(3) Výsledky studie Madaras *et al.* (2017) zahrnují polní experiment v oblasti u Trutnova, který 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⁻¹. Ve stejných letech jako hnůj byla po sklizni obilovin aplikována sláma s přídatkem 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⁻¹.rok⁻¹. Experiment navíc zahrnoval použití minerálních hnojiv N, P a K v různých kombinacích, což vedlo k celkem osmnácti variantám hnojení, čtyřikrát opakovaným. Osmiletý osevní sled se sestával z obilovin (50 %), brambor (25 %) a píce (jetele; 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 hnojení hnojem nelze plně nahradit aplikací 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. Cílem simulační studie bylo určit, jakých obsahů SOC lze dosáhnout agrotechnickými opatřeními při absenci aplikace hnoje. Výsledky simulací (*obr. 4.8.1*) ukazují, že na obsah SOC má pozitivní vliv pěstování jetele, zatímco pěstování pšenice negativní. Pěstování (hypotetické) kontinuální monokultury jetele je spojeno s nejvyššími předpokládanými hodnotami SOC ve všech simulacích. Dále byl simulován 6-letý osevní sled s 50% podílem jetele (3 roky jetele - 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 t.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. To je další pozitivní účinek zařazení jetele do osevních sledů, protože během jeho pěstování není půda kultivována. Z testovaných možností změn managementu zaměřených na zvýšení obsahu půdní organické hmoty se jako nejúčinnější opatření ukázalo zajištění dostatečného

⁴ 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

vstupu stabilizované organické hmoty (hnůj) a zvýšení podílu víceletých pícnin v osevním sledu. Obě opatření předpokládají pokračování v chovu 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.



Pozn.: Pásky zobrazují rozsahy, které závisí na intenzitě kultivace půdy – dolní hranice pásu představuje konvenční zpracování půdy a horní hranice minimalizaci (žádná kultivace).

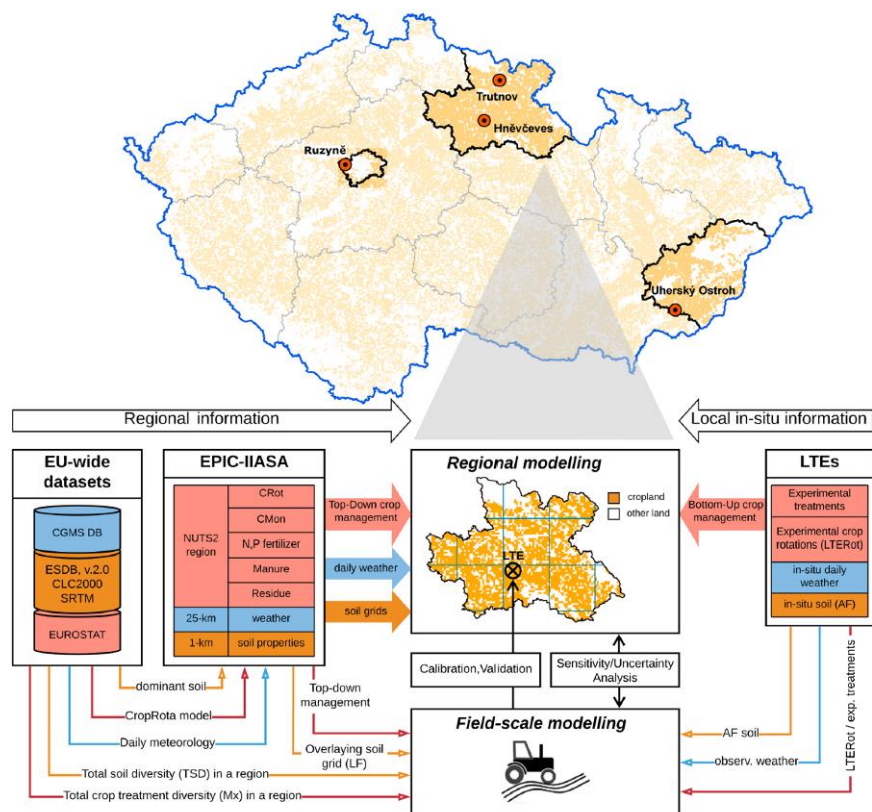
Obr. 4.8.1: Simulace vývoje obsahu SOC při různých scénářích sledu plodin a intenzity kultivace půdy.

Výsledky studie Balkovič et al. (2020) představují schéma simulací pro tři české regiony a jsou uvedeny na obr. 4.8.2. 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. V této práci k tomu sloužily zejména evropské databáze (počasí, půda) a regionální statistiky (struktura plodin). Testovány byly 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 nejpravděpodobnější 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. Takto nastavený model byl posléze využit pro simulace v jednotlivých buňkách pomocí třech výše uvedených přístupů. Vliv eroze při simulacích nebyl uvažován. 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⁻¹.rok⁻¹. Pouze u malé části půd královéhradeckého regionu je při nehnojení simulován mírný nárůst SOC, což je zřejmě dáno humidnějším charakterem této oblasti.

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

bilance SOC byla v simulacích dosažena pouze pro kombinované hnojení (NP+FYM), kdy ve většině půd docházelo ke zvyšování SOC v průměru o 0,1 až 0,2 t.ha⁻¹.rok⁻¹. Navyšování SOC je patrné i při minerálním hospodaření se zadržkou slámy, zde je však nutné uvědomit si, že model EPIC má v tomto případě tendenci SOC nadhodnocovat oproti skutečnosti.



Pozn.: oranžová barva – informace o orné půdě, modrá barva – meteorologické vstupy, červená barva – vstupy o hospodaření na půdě

Obr. 4.8.2: Simulované regiony s lokalizací dlouhodobých pokusů a schématem struktury regionálního rastrového modelu.

(4) Výsledky studií prokázaly, že 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⁻¹.rok⁻¹, 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⁻¹.rok⁻¹, což je podstatně vyšší než skutečný účinek hnojení nebo struktury plodin. I přes svou citlivost na vstupní parametry byla zjištěna 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 v CARC vytvářena výpočetní infrastruktura, umožňující rozšíření modelu EPIC-IIASA pro všechny oblasti ČR i pro simulace různých scénářů klimatického a agronomického vývoje.

Rozšířené výsledky studií byly zveřejněny v publikacích Madaras *et al.* (2017), Balkovič *et al.* (2020).

5. Doporučení pro praxi

Dostatečné množství a kvalita SOM má zásadní význam v suchozemských ekosystémech, a především v agroekosystémech. SOM v ekosystémech plní důležité produkční i mimoprodukční funkce. Na základě uvedených a popsanych skutečností a výsledků výzkumu spojených s péčí o obsah a kvalitu půdní organické hmoty lze jednoznačně doporučit:

- na orných půdách je třeba zajistit trvalý přísun organických látek (*potřeba cca 4,0–4,5 t.ha⁻¹.rok⁻¹, z toho cca 60 % je uhrazeno posklizňovými zbytky, cca 40 % je vhodné dodat statkovými hnojivy /hnůj, kejda/ pocházející 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, skotul/ 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,b); Menšík *et al.* (2022a,b); Menšík *et al.* (2023a,b,c);**
- **na základě výsledků dlouhodobých polních pokusů CARC (Ruzyně, 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⁻¹ statkových hnojiv (chlévský hnůj, popř. kejda) jednou za 4 roky;**
- **zvýšit zastoupení víceletých píceň v osevních postupech (zejména jetelovin /vojtěška, jetel apod./) – Menšík *et al.* (2020a), Šimon *et al.* (2024);**
- **zařazovat meziplodiny do osevního postupu, a to jako další zdroj organické hmoty (biomasa) do půdy, tak i pro jejich půdochrannou funkci;**
- dodržovat vyvážený osevní postup a agronomické technologie;
- **sledovat celkový obsah uhlíku a dusíku, kvalitu humusových látek (HL, HK, FK apod.) a půdní reakci;**
- **omezit dlouhodobou aplikaci minerálních hnojiv NPK bez vstupů organických látek,**
- **využívat modely a vícerozměrné statistické metody pro komplexní hodnocení a interpretaci dat o fyzikálně-chemických vlastnostech půdy.**

V současné době, stále nejsou k dispozici exaktní predikce budoucího vývoje obsahu organického uhlíku (C) v půdě. Publikované práce (např. Madaras *et al.* 2017; Balkovič *et al.* 2020 a další.) 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 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 tak 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.

6. Souhrn a závěr

V moderním zemědělství je úrodnost půdy důležitým faktorem významně ovlivňujícím životní 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 v agroekosystémech. Významný vliv na obsah a kvalitu SOM má způsob hospodaření, hnojení, struktura plodin, osevní postupy, zpracování půdy, zavlažování apod. Pokud uvedené postupy nejsou správně v zemědělské praxi nastaveny, pak hospodaření není trvale udržitelné a představuje rizika jak půdu, 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 a devastaci půdy a krajiny.

Cílem zpracované metodiky, která je členěna do jednotlivých příkladových studií (angl. „*case study*“) řešených v různých půdně-klimatických podmínkách ČR (dlouhodobé polní pokusy, poloprovozní a provozní výzkumné plochy), bylo vyhodnotit vliv agrotechnických opatření (vliv osevních postupů, vliv hnojení, vliv managementu v TTP apod.) na stav a kvalitu SOM v současných měnících se podmínkách prostředí zemědělské výroby v České republice.

V každé příkladové studii byl 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 pokles kvality a zdraví půdy (*Soil Health*) se všemi negativními důsledky: okyselení, vyluhování 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;
- aplikací statkových hnojiv (hnůj /FYM/) udržujeme, resp. zvyšujeme obsah SOC i HWEC /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 studie 7 (*Organická hmota v půdě v závislosti na vlastnostech půdy a aplikaci různých hnojiv*);
- 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.

Budoucím cílem 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 a podporuje účinné provzdušňování a minimalizuje ztráty ornice erozí (Reeves 1997; Robertson *et al.* 2014). V komplexně pojatém výzkumu bylo v souladu s dalšími vědeckými studii prokázáno, že biogeochemie půdní organické hmoty (SOM) /studium dynamických procesů apod./ má zásadní význam pro správné fungování ekosystémů /přírodních, polopřírodních, umělých/ (Lorenz and Lal 2018; Wang *et al.* 2019; Ondrasek *et al.* 2019; Rayne and Aula 2020; Lin *et al.* 2021; Masoudi *et al.* 2023; Simon *et al.* 2025; Almendros and González-Pérez 2025) v současném měnícím se klimatu (GZK).

7. Ekonomický a ekologický přínos metodiky

Ekonomické přínosy zpracované metodiky *Optimalizace agrotechnických opatření pro zvýšení kvality půdní organické hmoty* se zaměřením na: vliv osevních postupů, vliv hnojení, vliv managementu TTP apod., jsou v současné době těžko vyčíslitelné, protože představené výsledky nemají v této fázi výzkumu charakter komerčního využití. Ekonomické přínosy můžeme spatřovat především v několika rovinách:

- **zvýšení úrodnosti a výnosů plodin:** půdy hnojené kvalitními statkovými a organickými hnojivy a dále půdy s vícehonným osevním postupem se zastoupením pícnin mají vyšší obsah SOM (SOC), resp. vyšší úrodnost, což je předpoklad stabilnějších a vyšších výnosů pěstovaných zemědělských plodin i v současných měnících se podmínkách prostředí (GZK);
- **snížení nákladů na hnojiva:** půdy hnojené kvalitními statkovými a organickými hnojivy mají efektivnější koloběh živin a může se snížit závislost na drahých minerálních hnojivech;
- **snížení erozních škod (událostí):** půdy hnojené kvalitními statkovými a organickými hnojivy a dále půdy s vícehonným osevním postupem se zastoupením pícnin (půdy s vyšším obsahem SOM /SOC/) mají vyšší předpoklad protierozní odolnosti;
- **diverzifikace příjmů:** vývoj v mezinárodní zemědělské politice směřuje k přímým platbám, za 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), v budoucnu budou moci zemědělci využívat tyto metodiky získat dodatečné příjmy z programů kompenzace uhlíku nebo jiných environmentálních plateb.

Ekologické přínosy pak můžeme spatřovat především v:

- **zlepšení fyzikálních vlastností půdy:** zvyšování SOM zlepšuje strukturu půdy, její pórovitost a stabilitu, což vede k lepší **schopnosti zadržovat vodu** (zvýšená infiltrační schopnost) a odolnosti proti erozi (vodní i větrné);
- **zvýšení biodiverzity a biologické aktivity:** organická hmota je klíčovým zdrojem potravy pro půdní mikroorganismy a živočichy, čímž podporuje bohatý a aktivní (mikrobiální) půdní ekosystém;
- **koloběh látek:** rozklad organické hmoty uvolňuje živiny zpět do půdy v organické formě, což přispívá k udržitelnému koloběhu živin a snižuje potřebu minerálních hnojiv;
- **sekvestrace uhlíku:** půda bohatá na organickou hmotu funguje jako zásobárna uhlíku, což v současné době hraje důležitou roli ve zmírňování klimatických změn tím, že pomáhá snižovat koncentraci oxidu uhličitého v atmosféře;
- **ochrana spodních vod:** zlepšená infiltrace a retence vody v půdě snižuje povrchový odtok, a tím i riziko kontaminace povrchových a podzemních vod pesticidy, ale i živinami.

8. Srovnání novosti postupů a uplatnění metodiky

Význam zpracované metodiky z pohledu novosti postupů 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*“), ale i ve vztahu k potravinovému zabezpečení (výnosy, kvalita potravin) a zvyšování adaptačního potenciálu půdy na předpokládané účinky klimatické změny.

Přínos z uplatňování metodiky je možné vnímat jako příspěvek pro optimalizaci využívání půdy a regulaci vstupů, které tak v konečném důsledku ovlivňují vývoj půdní úrodnosti (kvality a zdraví půdy), jako i kvalitu rostlinných produktů vstupujících do dalších řetězců (potravního řetězce), protože už jen na základě analýzy (chemické rozborů půd, hnojiv a rostlin) lze zmíněný proces efektivně ovlivňovat.

Metodika najde uplatnění u subjektů, hospodařících na orné půdě, trvalých travních porostech, v konvenčním i ekologickém zemědělství. Metodika může být také uplatněna kontrolními pracovišti (např. ÚKZÚZ). Dále se předpokládá že bude uplatněna u zemědělských poradců i v rámci poradenského systému MZe ČR apod. Uplatněním metodiky budou získané poznatky a údaje vedle zemědělské prvovýroby, navazujících odvětvích a služeb, rovněž využitelné pro státní správu, vědu a výzkum, ale i pro studenty a pedagogy středních i vysokých škol, popřípadě i akreditovaná školící centra apod.

9. Seznam publikací, které předcházejí metodice

Článek v odborném periodiku /Jimp/ (RIV):

- Plisková J., Pospíšilová L., Šimon T., Menšík L., Nerušil P. 2025. DRIFT and UV-VIS Spectroscopic Characterization of Humic Substances in Grasslands after Organic and Mineral Fertilization. *Soil Science Annual*, 76.
- Roman M., Hlisenikovsky L., Menšík L., Zemanová V., Kunzová E. 2025. Temporal Trends in Winter Wheat Yield: The Role of NPK-Fertilization and Climate over Decades of Field Experiments. *The Journal of Agricultural Science*, 163, 3–12, doi:10.1017/S0021859625000024
- Hlisenikovsky L., Menšík L., Roman M., Kunzová E. 2024. The Evaluation of a Long-Term Experiment on the Relationships between Weather, Nitrogen Fertilization, Preceding Crop, and Winter Wheat Grain Yield on Cambisol. *Plants* 2024, 13, 802, doi:10.3390/plants13060802.
- Hlisenikovsky 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>
- Hlisenikovsky 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., Hlisenikovsky 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>
- Hlisenikovsky 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>
- Hlisenikovsky 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>

Článek v odborném periodiku /JSC, rec/ (RIV):

- Plisková J., Pospíšilová L., Nerušil P., Šimon T., Menšík L. 2023. Effect of Grasslands Fertilisation on Soil Organic Matter Quality and Nutrients Status. *Agriculture (Poľnohospodárstvo)*, 69, 129–139, doi:10.2478/agri-2023-0011.
- Boturová K., Sedlák L., Pospíšilová L., Šimon T., Menšík L. 2023. Spectroscopic Characterization of Soil Organic Matter Quality in Intensively Used Chernozems. *Acta fytotechnica et zootechnica*, 384–389, doi:10.15414/afz.2023.26.04.384-389.
- Kunzová E., Hlisnikovský L., Menšík L. 2022. Vliv hnojení statkovými a minerálními hnojivými na výnos a kvalitu pšenice ozimé v letech 2015–2018. *Agromanuál*, 17(1): 49–49.
- 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.

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

- Menšík L., Kunzová E., Hlisnikovský L., Nerušil P., Pospíšilová L., Plisková J., Voltr V., Šimon T., Madaras M. 2023. Význam statkových hnojiv pro udržitelné obhospodařování zemědělské půdy v podmínkách změny klimatu (kvalita a zdraví půdy), 1. vydání. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v. v. i., 84 stran. ISBN 978-80-7427-428-2.
- 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.

Certifikovaná (schválená) metodika /Nmet/ (RIV):

- Menšík L. ml., Kunzová E., Pospíšilová L., Nerušil P., Kulhánek M., Plisková J., Hlisnikovský L., Ryant P., Madaras M., Černý J., Menšík L. st., Balík J. 2025. Metodické postupy (vývoj kalibračních rovnic) pro stanovení kvality SOM v zemědělských půdách pomocí NIR spektroskopie. Schválená metodika. Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i. - VS Jevíčko, 55 s. ISBN 978-80-7427-444-2.
- 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 příhraničí 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. 2025. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnicích se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota), 4. ročník. Webinář, 3.4.2025, Praha (CZ).
- Menšík L., Kunzová E., Madaras M., Hlaváčková V. 2023. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnicích se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota), 3. ročník. Webinář, 7.12.2023, Praha (CZ).
- Menšík L., Kunzová E., Madaras M., Hlaváčková V. 2022. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnicích se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota), 2. ročník. Webinář, 9.6.2022, Praha (CZ).
- Kunzová E., Menšík L. 2022. Moderní postupy měření parametrů kvality půdy pomocí spektroskopických a spektrometrických metod v česko-bavorském příhraničí. Konference. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v. v. i., Klatovy, 23.11.2022 (CZ).
- Menšík L., Kunzová E. 2020. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnicích se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota) /online/. 12. 12. 2020, Praha (CZ).

Ostatní /O/ (RIV):

- Menšík L., Kunzová E., Hlisnikovský L., Nerušil P., Pospíšilová L., Plisková J., Voltr V., Šimon T., Madaras M. 2024. Význam statkových hnojiv pro udržitelné obhospodařování zemědělské půdy v podmínkách změny klimatu. In Sobocká J., Šarapatka B. (eds.) Pedologické dny 2024 - Udržitelnost půdy v kontexte národních a evropských iniciativ. Zborník abstraktov. Liptovský Ján 18.–20. september 2024. Bratislava: NPPC – Výskumný ústav pôdozvedectva a ochrany pôdy, Societas pedologica slovacica, o.z., s. 20. ISBN 978-80-8163-053-8.
- 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., Haberer 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).

Sborník (mimo RIV):

- Menšík, L., Kunzová, E., Madaras, M. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnících se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota), 4. ročník. Praha: Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i., Praha – Ruzyně, 2025. ISBN 978-80-7427-443-5.
- 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 měnicích 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.

Literatura

- Agovino M, Casaccia M, Ciommi M, Ferrara M, Marchesano K. 2019. Agriculture, climate change and sustainability: The case of EU-28. *Ecological Indicators* 105: 525–543.
- Almendros G, González-Pérez JA. 2025. Soil Organic Carbon Sequestration Mechanisms and the Chemical Nature of Soil Organic Matter—A Review. *Sustainability (Switzerland)* 17.
- Al-Musawi ZK, Vona V, Kulmány IM. 2025. Utilizing Different Crop Rotation Systems for Agricultural and Environmental Sustainability: A Review. *Agronomy* 15.
- Amin I, Fikrat F, Mammadov E, Babayev M. 2020. Soil Organic Carbon Prediction by Vis-NIR Spectroscopy: Case Study the Kur-Aras Plain, Azerbaijan. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 51: 726–734.
- Antu UB, Roy TK, Kulsum TI, et al. 2025. Role of humic acid for climate change adaptation measures to boost up sustainable agriculture and soil health: A potential review. *International Journal of Biological Macromolecules* 313: 144043.
- Approaches A. 2019. Agroecological Approaches to Sustainable Intensification. *Sustainable Food and Agriculture*: 179–184.
- Bagnall DK, Shanahan JF, Flanders A, Morgan CLS, Honeycutt CW. 2021. Soil health considerations for global food security. *Agronomy Journal* 113: 4581–4589.
- Balík J, Suran P, Černý J, Sedlář O, Kulhánek M, Procházková S. 2025. Changes in soil organic matter content and quality after application of different organic and mineral fertilisers in 27 years long-term field experiments on luvisol. *Frontiers in Soil Science* 5: 1–17.
- Balík J, Suran P, Sedlář O, et al. 2023a. The Effect of Long-Term Farmyard Manure and Mineral Fertilizer Application on the Increase in Soil Organic Matter Quality of Cambisols. *Agronomy* 13.
- Balík J, Suran P, Sedlář O, et al. 2023b. Long-Term Application of Manure and Different Mineral Fertilization in Relation to the Soil Organic Matter Quality of Luvisols. *Agronomy* 13: 2678.
- Balkovič J, Madaras M, Skalský R, et al. 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.
- Balontayová E, Hreško J, Petlušová V, Petluš P, Děbska B, Lošák T. 2025. Parameters of labile organic carbon as the indicators of the stability of soil organic matter under different land use. *Soil and Water Research* 20: 52–68.
- Birkeland Kr. 1906. On the oxidation of atmospheric nitrogen in electric arcs. *Transactions of the Faraday Society* 2: 98.
- Bogunovic I, Dugan I, Pereira P, et al. 2023. Effects of Biochar and Cattle Manure under Different Tillage Management on Soil Properties and Crop Growth in Croatia. *Agriculture* 13: 2128.
- Brady NC, Weil RR. 2008. *The Nature and Properties of Soil*. Upper River, New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Brar BS, Singh J, Singh G, Kaur G. 2015. Effects of long term application of inorganic and organic fertilizers on soil organic carbon and physical properties in maize-wheat rotation. *Agronomy* 5: 220–238.
- Czamecki S, Düring R-A. 2015. Influence of long-term mineral fertilization on metal contents and properties of soil samples taken from different locations in Hesse, Germany. *SOIL* 1: 23–33.
- Čermák P. 2007. *Bilance živin v ekologicky hospodařícím podniku: metodická pomůcka*. Náměšť nad Oslavou: ZERA - Zemědělská a ekologická regionální agentura.
- Černý J, Balík J, Kulhánek M, Časová K K, Nedvěd V. 2010. Mineral and organic fertilization efficiency in long-term stationary experiments. *Plant, Soil and Environment* 56: 28–36.
- 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: 139840.
- De Rosa D, Ballabio C, Lugato E, Fasiolo M, Jones A, Panagos P. 2024. Soil organic carbon stocks in European croplands and grasslands: How much have we lost in the past decade? *Global Change Biology* 30.

- Diaz, L. F., De Bertoldi, M., & Bidlingmaier W (Eds.). 2007. *Compost Science and Technology, Volume 8 (Waste Management)*. Elsevier Science.
- Dillard HR. 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*. Springer Netherlands, 249–252.
- Doran JW. 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88: 119–127.
- Du Z, Xie Y, Hu Liqun, *et al.* 2014. Effects of fertilization and clipping on carbon, nitrogen storage, and soil microbial activity in a natural grassland in southern China. *PLoS ONE* 9.
- Eo J, Park KC. 2016. Long-term effects of imbalanced fertilization on the composition and diversity of soil bacterial community. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 231: 176–182.
- FAO. 2017. The future of food and agriculture. Rome: Trends and Changes. <https://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf>.
- Fears R, ter Meulen V, von Braun J. 2019. Global food and nutrition security needs more and new science. *Science Advances* 5.
- Gong W, Yan X, Wang J, Hu T, Gong Y. 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: 318–324.
- Goydaragh MG, Taghizadeh-Mehrjardi R, Jafarzadeh AA, Triantafilis J, Lado M. 2021. Using environmental variables and Fourier Transform Infrared Spectroscopy to predict soil organic carbon. *CATENA* 202: 105280.
- Grego S, Lagomarsino A. 2008. Soil organic matter in the sustainable agriculture: Source or sink of carbon? *Soil Carbon Sequestration Under Organic Farming in the Mediterranean Environment* 661: 39–51.
- Gross A, Glaser B. 2021. Meta-analysis on how manure application changes soil organic carbon storage. *Scientific Reports* 11.
- Guo P-T, Li M-F, Luo W, Tang Q-F, Liu Z-W, Lin Z-M. 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: 49–59.
- 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: 126219.
- Harden JW, Hugelius G, Ahlström A, *et al.* 2018. Networking our science to characterize the state, vulnerabilities, and management opportunities of soil organic matter. *Global Change Biology* 24: e705–e718.
- Hasegawa T, Fujimori S, Havlík P, *et al.* 2018. Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy. *Nature Climate Change* 8: 699–703.
- He Z, Zhang H. 2014. *Applied Manure and Nutrient Chemistry for Sustainable Agriculture and Environment* (Zhongqi He and Hailin Zhang, Eds.). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Hlisenikový 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: 1843.
- Hlisenikový 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* 10: 2473.
- Hlušek J, Ríchnr R. 2010. *Bilance živin v rostlinné výrobě ČR a potřeba hnojení. Racionální použití hnojiv – sborník z konference.*
- Chang J, Havlík P, Leclère D, *et al.* 2021. Reconciling regional nitrogen boundaries with global food security. *Nature Food* 2: 700–711.
- Chen Y, Camps-Arbestain M, Shen Q, Singh B, Cayuela ML. 2018. The long-term role of organic amendments in building soil nutrient fertility: a meta-analysis and review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*: 1–23.
- Iheshiulo EMA, Larney FJ, Hernandez-Ramirez G, St. Luce M, Chau HW, Liu K. 2024. Soil organic matter and aggregate stability dynamics under major no-till crop rotations on the Canadian prairies. *Geoderma* 442: 116777.
- Javadi SH, Munnaf MA, Mouazen AM. 2021. Fusion of Vis-NIR and XRF spectra for estimation of key soil attributes. *Geoderma* 385: 114851.
- Joona J, Liski E, Kahiluoto H. 2024. Manure increases soil organic carbon most when allocated to annual cropping. *Catena* 238.
- Kama R, He J, Nabi F, *et al.* 2025. Crop rotation and green manure type enhance organic carbon fractions and reduce soil arsenic content. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 378: 109287.
- Karlen DL, Mausbach MJ, Doran JW, Cline RG, Harris RF, Schuman GE. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Science Society of America Journal* 61: 4–10.
- Klír J. 2008. *Rámcová metodika výživy rostlin a hnojení*. Prague: VÚRV (CRI).
- Klír J. 2017. *Akční program nitrátové směrnice*. Prague: VÚRV (CRI).
- Klír J. 2021. Bilance organických látek v rostlinné výrobě In: Praha, 1–8.

- Kopeć M, Gondek K, Mierzwa-Hersztek M, Jarosz R. 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: 33–46.
- Kopecký M, Kolář L, Perná K, *et al.* 2022. Fractionation of Soil Organic Matter into Labile and Stable Fractions. *Agronomy* 12: 73.
- Kronstad WE. 1997. Agricultural development and wheat breeding in the 20th Century In: 1–10.
- 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.*
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123: 1–22.
- Lal R. 2008. Review article Soils and sustainable agriculture . A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28: 57–64.
- Lal R. 2016. Soil health and carbon management. *Food and Energy Security* 5: 212–222.
- 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: 3265–3277.
- Lal R. 2021. Soil management for carbon sequestration. *South African Journal of Plant and Soil* 38: 231–237.
- Lehmann J, Bossio DA, Kögel-Knabner I, Rillig MC. 2020. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth and Environment* 1: 544–553.
- Li C, Camac J, Robinson A, Kompas T. 2025. Predicting changes in agricultural yields under climate change scenarios and their implications for global food security. *Scientific Reports* 15.
- Lin Y, Campbell AN, Bhattacharyya A, *et al.* 2021. Differential effects of redox conditions on the decomposition of litter and soil organic matter. *Biogeochemistry* 154: 1–25.
- Lipavský J, Kubát J, Zobač J. 2008. Long-term effects of straw and farmyard manure on crop yields and soil properties. *Archives of Agronomy and Soil Science* 54: 369–379.
- Liu E, Yan C, Mei X, *et al.* 2010. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China. *Geoderma* 158: 173–180.
- Lorenz K, Lal R. 2018. *Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems.* Cham: Springer International Publishing.
- Lugato E, Panagos P, Bampa F, Jones A, Montanarella L. 2014. A new baseline of organic carbon stock in European agricultural soils using a modelling approach. *Global change biology* 20: 313–26.
- Madaras M, Balkovič J, Skalský R. 2017. *EPIC model based search of agronomic strategies for increasing SOC (case study).*
- Mahmood S, Nunes MR, Kane DA, Lin Y. 2023. Soil health explains the yield-stabilizing effects of soil organic matter under drought. *Soil & Environmental Health* 1: 100048.
- Malhi GS, Kaur M, Kaushik P. 2021. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability (Switzerland)* 13: 1–21.
- Maltas A, Dupuis B, Sinaj S. 2018. Yield and Quality Response of Two Potato Cultivars to Nitrogen Fertilization. *Potato Research* 61: 97–114.
- Maltas A, Kebli H, Oberholzer HR, Weisskopf P, Sinaj S. 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: 926–938.
- Masoudi M, Centeri C, Karlik M, Jakab G. 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: 2560–2572.
- Meena RS, Lal R. 2018. Legumes and Sustainable Use of Soils In: *Legumes for Soil Health and Sustainable Management.* Singapore: Springer Singapore, 1–31.
- Melillo JM, Steudler PA, Aber JD, *et al.* 2002. Soil Warming and Carbon-Cycle Feedbacks to the Climate System. *Science* 298: 2173–2176.
- Meloun M, Militký J, Hill M. 2018. *Statistická analýza vícerozměrných dat v příkladech.* Praha: Nakladatelství Karolinum.
- Meloun M, Militký J. 2012. *Interaktivní statistická analýza dat.* Praha: Nakladatelství Karolinum.
- Meloun M, Militký J. 2013. *Kompendium statistického zpracování dat.* Praha: Nakladatelství Karolinum.
- Menšík L., Kunzová E., Hlisnikovský L., Nerušil P., Pospíšilová L., Plisková J., Voltr V., Šimon T., Madaras M. 2023a. Význam statkových hnojiv pro udržitelné obhospodařování zemědělské půdy v podmínkách změny klimatu (kvalita a zdraví půdy), 1. vydání. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., 84 stran. ISBN 978-80-7427-428-2.
- 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 ML, Soloneski S, eds. *Organic Fertilizers - History, Production and Applications.* IntechOpen, 23–42.

- 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: 2813–2822.
- Menšík L, L. Hlisnikovský, L. Pospíšilová, T. Šimon and E. Kunzová. 2023c. 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, Nerušil P, Míka V, Loučka R, Jambor V. 2019. History and Current use of Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) for the Analysis of Forage and Preserved Feed at Grasland Research Station Jevíčko in the Czech Republic In: *18th International Symposium Forage Conservation. Conference proceedings*. Brno: Mendel University in Brno, 190–197.
- Menšík L, Nerušil P. 2019. *Produkční, kvalitativní a porostové změny trvalého lučního společenstva ve vztahu k intenzitě využívání a úrovni hnojení v oblasti Malé Hané*. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.
- Menšík L., E. Kunzová, M. Madaras, P. Nerušil and L. Pospíšilová L. 2020b. Zpracování významu hnojení statkovými hnojivý na ornou půdu „Význam hnojení statkovými hnojivý na ornou půdu na základě provozních pokusů zhotovitele a dalších zjištění na základě porovnání působení hnojiv živočišného původu s ostatními hnojivý“. Studie. Zakázka UZEI, 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 UZEI, 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. 2023b. 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
- Mi Wenhai, Sun Y, Xia S, *et al.* 2018. Effect of inorganic fertilizers with organic amendments on soil chemical properties and rice yield in a low-productivity paddy soil. *Geoderma* 320: 23–29.
- Munawar AA, Yunus Y, Devianti D, Satriyo P. 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 AA, Yunus Y, Devianti, Satriyo P. 2020. Calibration models database of near infrared spectroscopy to predict agricultural soil fertility properties. *Data in Brief* 30.
- MZe. 2018. *Situační a výhledová zpráva – Půda*. Praha: Ministerstvo zemědělství České republiky.
- MZe. 2021. *Situační a výhledová zpráva – Půda*. Praha: 978-80-7434-598-2.
- Němeček J, Mühlhanslová M, Macků J, Vavříček D, Novák P. 2011. *Taxonomický klasifikační systém půd*. Praha: ČZU v Praze.
- Oldfield EE, Bradford MA, Wood SA. 2019. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. *SOIL* 5: 15–32.
- Ondrasek G, Bakić Begić H, Zovko M, *et al.* 2019. Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications. *Science of The Total Environment* 658: 1559–1573.
- OSN. 2024. *World Population Prospects 2024: Summary of Results*. UN DESA/POP/2024/TR/NO. 9.
- Page KL, Dang YP, Dalal RC. 2020. The Ability of Conservation Agriculture to Conserve Soil Organic Carbon and the Subsequent Impact on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties and Yield. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4.
- Piccolo A, Celano G, Conte P. 2002. Methods of isolation and characterization of humic substances to study their interactions with pesticides In: Cornejo J, Jamet P, eds. *Proceedings of conference Pesticide/Soil Interactions*. Paris: INRA, 103–116.

- Piccolo A, Drosos M. 2025. The essential role of humified organic matter in preserving soil health. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 12.
- Pouladi N, Møller AB, Tabatabai S, Greve MH. 2019. Mapping soil organic matter contents at field level with Cubist, Random Forest and kriging. *Geoderma* 342: 85–92.
- Rahut DB, Aryal JP, Manchanda N, Sonobe T. 2022. Expectations for household food security in the coming decades: A global scenario In: *Future Foods*. Elsevier, 107–131.
- Rao CS, Indoria AK, Sharma KL. 2017. Effective management practices for improving soil organic matter for increasing crop productivity in rainfed agroecology of India. *Current Science* 112: 1497–1504.
- Raphael JPA, Calonego JC, Milori DMBP, Rosolem CA. 2016. Soil organic matter in crop rotations under no-till. *Soil and Tillage Research* 155: 45–53.
- Rayne N, Aula L. 2020. Livestock manure and the impacts on soil health: A review. *Soil Systems* 4: 1–26.
- Reeves DW. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research* 43: 131–167.
- Robertson GP, Gross KL, Hamilton SK, et al. 2014. Farming for ecosystem services: An ecological approach to production agriculture. *BioScience* 64: 404–415.
- Rockström J, Williams J, Daily G, et al. 2017. Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio* 46: 4–17.
- Rochette P, Angers DA, Flanagan LB. 1999. Maize Residue Decomposition Measurement Using Soil Surface Carbon Dioxide Fluxes and Natural Abundance of Carbon-13. *Soil Science Society of America Journal* 63: 1385–1396.
- Russel DA, Williams GG. 1977. History of Chemical Fertilizer Development. *Soil Science Society of America Journal* 41: 260–265.
- Rutkowska A, Pikula D. 2018. Effect of Crop Rotation and Nitrogen Fertilization on the Quality and Quantity of Soil Organic Matter. i: 13.
- Sáňka M, Hofman J, Vácha R, et al. 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, Dallemand JF, Fahl F. 2018. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy* 129: 457–472.
- Sedlár O, Balík J, Černý J, Kulhánek M, Smatanová M. 2023. Long-Term Application of Organic Fertilizers in Relation to Soil Organic Matter Quality. *Agronomy* 13.
- Shang Q, Ling N, Feng X, et al. 2014. Soil fertility and its significance to crop productivity and sustainability in typical agroecosystem: A summary of long-term fertilizer experiments in China. *Plant and Soil* 381: 13–23.
- Shi R yong, Liu Z dong, Li Y, et al. 2019. Mechanisms for increasing soil resistance to acidification by long-term manure application. *Soil and Tillage Research* 185: 77–84.
- Shiwakoti S, Zheljaskov VD, Gollany HT, Kleber M, Xing B. 2019. Macronutrients in soil and wheat as affected by a long-term tillage and nitrogen fertilization in winter wheat–fallow rotation. *Agronomy* 9: 1–11.
- Simon C, Miltner A, Mulder I, et al. 2025. Long-term effects of manure addition on soil organic matter molecular composition: Carbon transformation as a major driver of energetic potential. *Soil Biology and Biochemistry* 205.
- Sotáková S. 1982. *Organická hnota a úrodnost' půdy*. Bratislava: Příroda Bratislava.
- Sparks DL. 2003. *Environmental Soil Chemistry*. San Diego, California, USA: Elsevier Science (USA).
- Steffens M, Zeh L, Rogge DM, Buddenbaum H. 2021. Quantitative mapping and spectroscopic characterization of particulate organic matter fractions in soil profiles with imaging VisNIR spectroscopy. *Scientific Reports* 11: 16725.
- Stevenson FJ. 1994. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. John Wiley and Sons.
- Sun Q, Zheng Y, Li S, et al. 2025. Diversified crop rotation: Synergistically enhancing peanut yield and soil organic carbon stability. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 382: 109497.
- Šimon T, Madaras M, Mayerová M, Kunzová E. 2024. Soil Organic Carbon Dynamics in the Long-Term Field Experiments with Contrasting Crop Rotations. *Agriculture* 14: 818.
- Škarpa P. 2013. Organická hnojiva a jejich vliv na bilanci organických látek v půdě In: *Ochrana půdy*. Náměšť nad Oslavou: ZERA – Zemědělská a ekologická regionální agentura, o.s., 31–41.
- Tiwari J, RAMANATHAN AL, BAUDDH K, KORSTAD J. 2023. Humic substances: Structure, function and benefits for agroecosystems—a review. *Pedosphere* 33: 237–249.
- Tobiašová E, Barancíková G, Gömöryová E, et al. 2018. The proportion of soil aggregates in dependence on the fraction composition of humic substances. *Soil and Water Research* 13: 193–199.
- Triberti L, Nistri A, Baldoni G. 2016. Long-term effects of crop rotation, manure and mineral fertilisation on carbon sequestration and soil fertility. *European Journal of Agronomy* 74: 47–55.
- Vance ED. 1996. Land Application of Wood-Fired and Combination Boiler Ashes: An Overview. *Journal of Environmental Quality* 25: 937–944.

- Vaněk V, Kolář L, Pavlíková D. 2010. *Úloha organické hmoty v půdě. Racionální použití hnojiv – sborník z konference.*
- Vašák F, Černý J, Buráňová Š, Kulhánek M, Balík J. 2015. Soil pH changes in long-term field experiments with different fertilizing systems. *Soil and Water Research* 10: 19–23.
- Voltr V, Menšík L, Hlisenkovský L, Hruška M, Pokorný E, Pospíšilová L. 2021. The Soil Organic Matter in Connection with Soil Properties and Soil Inputs. *Agronomy* 11: 779.
- Walter Stinner P, Deuker A, Schmalfuß T, et al. 2018. Perennial and Intercrop Legumes as Energy Crops for Biogas Production In: *Legumes for Soil Health and Sustainable Management*. Singapore: Springer Singapore, 139–171.
- Wang JJ, Bowden RD, Lajtha K, Washko SE, Wurzbacher SJ, Simpson MJ. 2019. Long-term nitrogen addition suppresses microbial degradation, enhances soil carbon storage, and alters the molecular composition of soil organic matter. *Biogeochemistry* 142: 299–313.
- Wood SA, Blankinship JC. 2022. Making soil health science practical: guiding research for agronomic and environmental benefits. *Soil Biology and Biochemistry* 172: 108776.
- Yang F, Tian J, Fang H, et al. 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.
- Yang X, Ren W, Sun B, Zhang S. 2012. Effects of contrasting soil management regimes on total and labile soil organic carbon fractions in a loess soil in China. *Geoderma* 177–178: 49–56.
- Yuan X, Li S, Chen J, et al. 2024. Impacts of Global Climate Change on Agricultural Production: A Comprehensive Review. *Agronomy* 14: 1360.
- Zeng M, de Vries W, Bonten LTC, et al. 2017. Model-Based Analysis of the Long-Term Effects of Fertilization Management on Cropland Soil Acidification. *Environmental Science & Technology* 51: 3843–3851.
- Zheng H, Miao C, Huntingford C, et al. 2025. The Impacts of Erosion on the Carbon Cycle. *Reviews of Geophysics* 63.
- Zhengchao Z, Zhuoting G, Zhouping S, Fuping Z. 2013. Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil organic carbon and total nitrogen in a semi-arid cropland. *European Journal of Agronomy* 45: 20–26.
- Žížala D, Minařík R, Juřicová A, Zádorová T, Beitlerová H, Penížek V. 2020. *Soubor detailních map půdních vlastností ČR*. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.
- Žížala D, Minařík R, Skála J, et al. 2022. High-resolution agriculture soil property maps from digital soil mapping methods, Czech Republic. *CATENA* 212: 106024.

Seznam obrázků, tabulek a zkratek

Seznam obrázků

- Obr. 3.1: Globální změny v současném zemědělství (upraveno dle Meena, Lal 2018).
- Obr. 3.2: Mapa koncentrace SOC v povrchových vrstvách zemědělské půdy (0–30 cm) v ČR (Žížala et al. 2020).
- Obr. 4.1.1: Letecká fotografie pokusné lokality Praha-Ruzyně s jednotlivými pozemky I–V (Hlisenkovský et al. 2016) po redukci pokusných ploch z důvodu stavby dálnice v 90. letech 20. století.
- Obr. 4.1.2: Dynamika obsahu organického uhlíku v půdě (SOC) v ornici v osevním postupu SCR v obdobích 1970–1997 a 1997–2022.
- Obr. 4.2.1: Obsah půdního organického uhlíku (SOC) a frakční složení humusových látek ve dvou hodnocených obdobích (1994–2003 a 2014–2016).
- Obr. 4.2.2: 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. 4.2.3: Obsah půdního organického uhlíku (SOC) a frakční složení humusových látek ve dvou hodnocených obdobích (1994–2003 a 2014–2016).
- Obr. 4.3.1: Přehledová mapa VOP pokusů Národního centra zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i. v ČR.
- Obr. 4.3.2: Obsah uhlíku (C_{org}), dusíku (N_{tot}) a poměr C/N v období 2012–2015.
- Obr. 4.3.3: 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. 4.3.4: 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. 4.3.5: 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. 4.4.1: Vliv variant hnojení na: (a) pH půdy, (b) obsah organického uhlíku (SOC, %) a (c) celkový obsah dusíku (N_{tot} , %) na lokalitě Čáslav, Ivanovice a Lukavec (2013–2016).

Obr. 4.4.2: Výsledky PCA analýzy ukazující vztah mezi parametry půdy (pH, obsah SOC, N_{tot} , Ca, K, Mg a P), výnosem zrna a variantou hnojení/lokalitou.

Obr. 4.4.3: Výsledky faktorové analýzy ukazující vztah mezi (a) vlastnostmi půdy (pH, obsah SOC, N_{tot} , Ca, K, Mg a P) a výnosem zrna a (b) variantou hnojení/lokalitou.

Obr. 4.5.1: 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. 4.6.1: Vícerozměrná statistická analýza (PCA) základních půdních vlastností v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny v období 2018–2021.

Obr. 4.7.1: Obecné schéma tvorby SOC a HWEC.

Obr. 4.7.2: Vývojové schéma pro model Závislost rozdílu SOC mezi roky 2018 a 2008.

Obr. 4.7.3: 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/).

Obr. 4.8.1: Simulace vývoje obsahu SOC při různých scénářích sledu plodin a intenzity kultivace půdy.

Obr. 4.8.2: Simulované regiony s lokalizací dlouhodobých pokusů a schématem struktury regionálního rastrového modelu.

Seznam tabulek

Tab. 4.2.1: Hodnota pH půdy, obsah půdního organického uhlíku (SOC, %) , celkový dusík (N_t , %) a obsah rostlinou přijatelných živin (mg/kg) jednotlivých variant hnojení v sledovaných obdobích (1994–2003 a 2014–2016).

Tab. 4.3.1: Základní výrobní a klimatické podmínky stanovišť.

Tab. 4.3.2: Faktorové váhy a příspěvky daného faktoru do komunity pro jednotlivé znaky v období 2012–2015.

Tab. 4.4.1: Obsah rostlinou přijatelných živin (Ca, K, Mg a P) v půdě dle lokality a varianty hnojení.

Tab. 4.4.2: Váha faktorů a příspěvek daného faktoru ke komunalitě pro jednotlivé charakteristiky po normalizaci pomocí Varimaxové rotaci pro produkci (výnos) a parametry půdy.

Seznam zkratk

a.s. - akciová společnost

BPEJ - bonitovaná půdně ekologická jednotka

C - uhlík

Ca - vápník

CARC - Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i.

CEC - nasycenost sorpčního komplexu

CLU - analýza shluků

cm - centimetr

CO₂ - oxid uhličitý

Cox /Corg/ - organický uhlík

CS - kejda skotu

ČHMÚ - Český hydrometeorologický ústav

ČR - Česká republika

ČSÚ - Český statistický úřad

DH - stupeň humifikace

DJ - dobytčí jednotka

EDA - průzkumová popisná statistika

ENPKB - Energy of NPK + the energy of the by-product left on the field

EPIC - volně dostupný simulační model

EU - Evropská unie

FA - faktorová analýza

FAO - Organizace pro výživu a zemědělství

FK - fulvokyselina

FTIR - Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací

FYM - hnůj

GZK - globální změna klimatu

H₂O - voda

ha - hektar

HK /HA/ - huminová kyselina

HL /HS/ - humusové látky

HWEC - uhlík rozpuštěný v horké vodě

IH - index rozkladu

IR - index hydrofobicity

K - draslík

KCl - chlorid draselný

Kč - koruna česká

Kg - kilogram

KPP - komplexní průzkum půd

LAV - ledek amonný s vápencem

m - metr

m² - metr čtvereční

MCR - vícehonný osevní postup

MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute

MEP - střední kvadratická chyba predikce

Mg - hořčík

MJ - megajoule

MLR - vícerozměrná lineární regrese

Mm - milimetr

MZe ČR - Ministerstvo zemědělství České republiky

N - dusík

n - počet opakování

NAZV - Národní agentura pro zemědělský výzkum

NDF - neutrálně detergentní vláknina

NPK - minerální hnojení

N_t / N_{tot} / - celkový dusík

OM - organická hmota

P - fosfor

PCA - analýza hlavních komponent

pH - půdní reakce

Q_{4/6} - barevný kvocient
r - korelační koeficient
R² - koeficient determinace
RFE - dlouhodobé polní výživářské pokusy CARC (Praha-Ruzyně)
SCR - dvouhonný osevní postup
SH - suchá hmota
SOC - půdní organický uhlík
SOM - půdní organická hmota
SSD - hloubka podorničí
St - sláma
SW - software
SZP - společná zemědělská politika

t - tuna
TP - travní porost
TPP - trvalý travní porost
ÚKZÚZ - Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský
UV-VIS - ultrafialovo-viditelná spektroskopie
v. v. i. - veřejná výzkumná instituce
VOP - výživářské osevní pokusy CARC (Čáslav, Lukavec, Ivanovice na Hané)
VS Jevíčko - Výzkumná stanice Jevíčko CARC
ZD - zemědělské družstvo
ZH - zelená hmota

Název: Optimalizace agrotechnických opatření pro zvýšení kvality půdní organické hmoty

Autoři:

Ing. Eva Kunzová, CSc.

Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.

Ing. Lukáš Hlisnikovský, Ph.D.

Ing. Veronika Zemanová, Ph.D.

Ing. Pavel Nerušil, Ph.D.

Ing. Jana Plisková

RNDr. Mikuláš Madaras, Ph.D.

Ing. Tomáš Šimon, Ph.D.

Ing. Ladislav Menšík

Foto na obálce: Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.

Vydal: Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v.v.i.

Tisk: powerprint s.r.o., Brandejsovo nám. 1219/1, 16500 Praha Suchdol

Vydání: rok 2025

Počet stran: 45

Náklad: 25 ks

ISBN 978-80-7427-xxx-x