

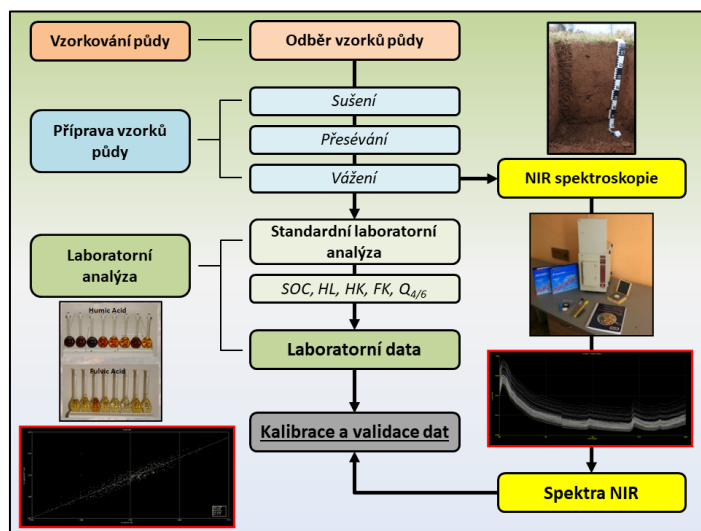
Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v.v.i.



Národní centrum zemědělského
a potravinářského výzkumu

Metodické postupy (vývoj kalibračních rovnic) pro stanovení kvality SOM v zemědělských půdách pomocí NIR spektroskopie

Schválená metodika



Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.

Ing. Eva Kunzová, CSc.

doc. RNDr. Lubica Pospíšilová, CSc.

prof. Ing. Jiří Balík, CSc., dr. h. c.

a kol.

Praha

2025

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



Národní centrum zemědělského
a potravinářského výzkumu

**Metodické postupy (vývoj kalibračních rovnic) pro stanovení kvality
SOM v zemědělských půdách pomocí NIR spektroskopie**

Schválená metodika

Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.¹

Ing. Eva Kunzová, CSc.¹

doc. RNDr. Lubica Pospíšilová, CSc.²

Ing. Pavel Nerušil, Ph.D.¹

doc. Ing. Martin Kulhánek, Ph.D.⁴

Ing. Ondřej Sedlář, Ph.D.⁴

Ing. Jana Plisková^{1,2}

Ing. Lukáš Hlisnikovský, Ph.D.¹

prof. Ing. Pavel Ryant, Ph.D.²

RNDr. Mikuláš Madaras, Ph.D.¹

Ing. Jindřich Černý, Ph.D.⁴

Ing. Ladislav Menšík³

prof. Ing. Jiří Balík, CSc., dr. h. c.⁴

¹Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v.v.i.

²Mendelova univerzita v Brně

³AGROSPOL, a.d. Knínice

⁴Česká zemědělská univerzita v Praze

Jevíčko, Brno, Praha

Březen 2025

Metodické postupy (vývoj kalibračních rovnic) pro stanovení kvality SOM v zemědělských půdách pomocí NIR spektroskopie

Schválená metodika (SM) představuje rychlé a přesné analytické postupy stanovení obsahu a kvality půdní organické hmoty (obsah půdního organického uhlíku /SOC/, celkového organického uhlíku /Ctot/, uhlíku rozpouštěného v horké vodě /HWC/, celkového dusíku /Ntot/, humusových látek /HL; CHS/, huminových kyselin /HK; CHA/, fulvokyselin /FK; CFA/, barevného kvocientu /Q_{4/6}/, indexu aromaticity /iAR/, indexu potenciální smáčivosti /PWI/ a celkového obsahu glomalínu /TG/), v suchých a přesátých vzorcích (2 mm) půd blízkou infračervenou spektroskopií (NIRS). Vzorky půdy byly odebrány v různých půdně-klimatických oblastech České republiky. Sledované parametry obsahu a kvality půdní organické hmoty byly stanoveny klasickými laboratorními metodami a současně u nich byla změřena spektra NIR spektroskopii. Vývoj kalibračních rovnic byl proveden vícerozměrných regresními metodami: regrese hlavních komponent /PCR/, regrese částečných nejmenších čtverců /PLSR/ a modifikovaná PLSR /MPLSR/. Pro analýzu pomocí NIR spektroskopie je zapotřebí malé množství vzorku půdy (cca 5–10 g). Měření je nejen velmi rychlé (stanovení vzorku trvá cca 2–5 minut), ale i dostatečně přesné. Regresním modelování s využitím moderních statistických vícerozměrných metod (PLSR, MPLSR apod.) lze stanovit různé složky (parametry) analyzovaného materiálu (půdy) pouze z jednoho měření vzorku. Metoda NIRS je šetrná k přírodnímu (životnímu) prostředí, dále je nákladově efektivní a má reálné předpoklady se prosadit v precizním zemědělství (Zemědělství 4.0) zejména s ohledem na rychlost stanovení, přesnost i ekologickou nezávadnost měření. Metodika je určena pro zemědělské podniky, laboratoře a dále uživatelům v zemědělském výzkumu (včetně vysokých škol) a ve státních institucích.

Klíčová slova: *půda, půdní organická hmota, kvalita a zdraví půdy; NIR spektroskopie, regresní modelování*

Methodology (development of calibration equations) for determination of SOM quality in agricultural soils by NIR spectroscopy

The Certified Methodology (CM) presents rapid and accurate analytical methods for the determination of the content and quality of soil organic matter (soil organic carbon /SOC/, total organic carbon /Ctot/, hot water dissolved carbon /HWC/, total nitrogen /Ntot/, humic substances /HL; CHS/, humic acids /HK; CHA/, fulvic acids /FK; CFA/, colour quotient /Q_{4/6}/, aromaticity index /iAR/, potential wettability index /PWI/ and total glomalin content /TG/) in dry and re-saturated soil samples (2 mm) by near-infrared spectroscopy (NIRS). The soils were from different soil-climatic regions of the Czech Republic. The monitored parameters of soil organic matter content and quality were determined by classical laboratory methods and further measured by NIR spectroscopy. Calibration equations were developed using multivariate regression calibration methods: principal component regression /PCR/, partial least squares regression /PLSR/ and modified PLSR /MPLSR/. A small amount of soil sample (about 5-10 g) is required for NIR spectroscopic analysis. The measurement is not only very fast (sample determination takes about 2-5 minutes) but also sufficiently accurate. Regression modelling using modern statistical multivariate methods (PLSR, MPLSR, etc.) can be used to determine the different components (parameters) of the analysed material (soil) from only one sample measurement. The NIRS method is environmentally friendly, cost-effective and has a realistic chance of being implemented in precision agriculture (Agriculture 4.0), particularly in terms of speed of determination, accuracy and environmental safety of measurements. The technology is aimed at farms, laboratories and users in agricultural research (including universities) and government institutions.

Keywords: *soil, soil organic matter, soil quality and health; NIR spectroscopy, regression modelling*

Metodika vznikla za finanční podpory MZE ČR a je výstupem projektu NAZV: QK21010124 (70 %) a dále i řešením institucionální podpory MZE-RO0423 (30 %).

Autorský kolektiv:

Ing. Ladislav Menšík, Ph.D., Ing. Eva Kunzová, CSc., doc. RNDr. Lubica Pospíšilová, CSc., Ing. Pavel Nerušil, Ph.D., doc. Ing. Martin Kulhánek, Ph.D., Ing. Ondřej Sedlář, Ph.D., Ing. Jana Plisková, Ing. Lukáš Hlisnikovský, Ph.D., prof. Ing. Pavel Ryant, Ph.D., RNDr. Mikuláš Madaras, Ph.D., Ing. Jindřich Černý, Ph.D., Ing. Ladislav Menšík, prof. Ing. Jiří Balík, CSc., dr. h. c.

Oponenti:

Ing. Václav Kadlec, Ph.D., Ministerstvo zemědělství České republiky, Praha, Česká republika
prof. Ing. Erika Balontayová, PhD., Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Nitra, Slovenská republika
doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D., Univerzita Pardubice, Pardubice, Česká republika

Publikace neprošla jazykovou úpravou.

Metodika byla schválena orgánem státní správy (Ministerstvo zemědělství České republiky, Sekce ekologického zemědělství, komodit, výzkumu a vzdělávání, Odbor rostlinných komodit, Oddělení půdy) pod č.j. MZE-27207/2025-13124.

Citace: 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.

© Ladislav Menšík, ml., Eva Kunzová, Lubica Pospíšilová, Jiří Balík, 2025

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

ISBN 978-80-7427-444-2

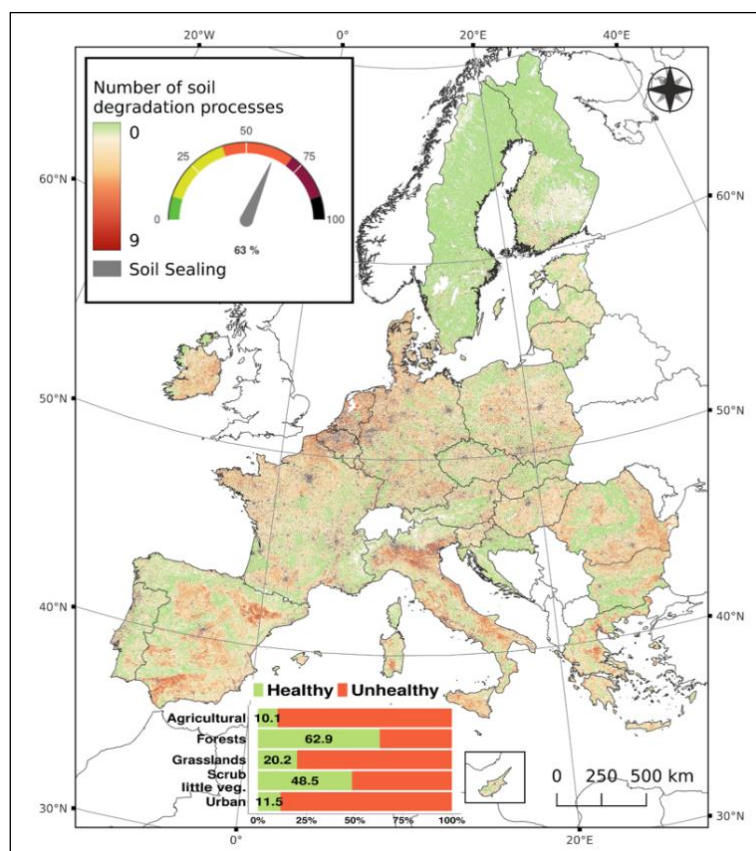
Obsah

1. Úvod	5
2. Cíl metodiky.....	6
3. Současný stav řešené problematiky	6
4. Experimentální část	14
4.1. Výzkumné lokality (pokusy) a odběr vzorků půdy.....	14
4.2. Laboratorní analýzy a statistické zpracování dat	19
4.3. Predikce parametrů kvality půdy	21
<i>Půdní organický uhlík (SOC), celkový uhlík (Ctot) a celkový dusík (Ntot)</i>	21
<i>Frakcionace humusových látek a další parametry kvality půdy</i>	25
a) Dlouhodobé výživářské pokusy a dlouhodobé pokusy CARC a poloprovozní plochy AGROSPOL a.d., Knínice	25
b) Dlouhodobé pokusy ÚKZÚZ	32
4.4. Diskuse	37
4.5. Potenciál NIR analýzy a výhled	39
5. Závěr.....	39
6. Ekonomický přínos metodiky.....	39
7. Srovnání novosti postupů a uplatnění metodiky	40
8. Seznam publikací, které předcházely metodice	40
Literatura.....	42
Seznam obrázků, tabulek, grafů, zkratk a symbolů.....	53

1. Úvod

Půda je základním, omezeným a neobnovitelným zdrojem výroby potravin, krmiv, ale také energie, a dále je přírodním zdroje nezbytným pro život člověka (Bogunovic *et al.* 2023; Uddin *et al.* 2025). Zdravá půda je základním kamenem pro dosažení potravinové bezpečnosti a podporu environmentální udržitelnosti v současném zemědělství (Godfray *et al.* 2010; Peng and Berry 2019; Rusmayandi *et al.* 2023; Mahmood *et al.* 2023). V posledním desetiletí se celosvětově prosadil koncept kvality a zdraví půdy „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; Lichtenberg 2024). Produkční schopnosti půdy jsou přímo závislé na stavu fyzikálních, chemických a biologických vlastností – všechny jsou prostorově a časově proměnné (Karlen *et al.* 1997; Amin *et al.* 2020). Proto je naše chápání jejich vlastností, funkcí a variability v prostoru a času pro udržitelné hospodaření s půdou zásadní (Grego and Lagomarsino 2008a; Lal 2008; Rockström *et al.* 2017; Approaches 2019). Půdní organická hmota (Soil Organic Matter, dále jen SOM), představuje souhrn všech neživých organických součástí půdy v různém stupni rozkladu a v různém stupni smísení s minerálním podílem (Stevenson 1994), resp. organický uhlík (SOC), jsou klíčovými parametry při hodnocení kvality, resp. úrodnosti půdy (J W Doran 2002; Lal 2020a; Voltr *et al.* 2021; Balontayová *et al.* 2024; De Rosa *et al.* 2024; Kabelka *et al.* 2025) v suchozemských ekosystémech a agroekosystémech. SOM je klíčovou složkou půdy a má zásadní význam pro půdní úrodnost, ochranu životního prostředí i udržitelný rozvoj zemědělství (Shi *et al.* 2015; Chen *et al.* 2020; Hu *et al.* 2023). Množství a kvalita SOM (obsah SOC, obsah humusových látek /HL/, huminových kyselin /HK/ a fulvokyselin /FK/) jsou dva základní pilíře půdní úrodnosti (Menšík *et al.* 2018; Banach-Szott *et al.* 2021; Kopecký *et al.* 2022; Balík *et al.* 2023a; b; Sedlář *et al.* 2023; Roulia 2024; Kagan *et al.* 2024; Zhang *et al.* 2024). Kvalitu a množství SOM ovlivňuje mnoho faktorů, jako je například střídání plodin, agrotechnický přístup (systém orby nebo bez orby), zavlažování atd. (Balík *et al.* 2023b).

EU Soil Observatory (EUSO) označila > 60 % půd v Evropě za „nezdravé“, přičemž v postižených oblastech probíhá alespoň jeden proces degradace půdy (Panagos *et al.* 2024) – viz obr. 1.1.



Obr. 1.1. Degradace půdy v EU podle přehledu stavu půdy /Soil Health Dashboard/ (Panagos *et al.* 2024).

V reakci na tuto skutečnost navrhla Evropská unie (EU) v červenci 2023 zákon o monitorování půdy, který má poskytnout právní rámec pro dosažení kvalitní a zdravé půdy (*Soil Health*) do roku 2050 a zajistit její dlouhodobě udržitelné využívání (Directorate-General for Environment Proposal 2023). V širším měřítku je zlepšení zdraví půdy považováno mimo jiné EU Mission Board for Soil Health and Food (Rada mise EU pro zdraví půdy a potraviny) za zásadní pro dosažení několika cílů udržitelného rozvoje United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) – zejména ve směrnících SDGs 2 (nulový hlad /*zero hunger*/), 6 (čistá voda a hygiena /*clean water and sanitation*/), 13 (opatření v oblasti klimatu /*climate action*/) a 15 (život na zemi /*life on land*/) (Bouma 2014; Keesstra *et al.* 2016, 2018; Visser *et al.* 2019; Veerman *et al.* 2020; Bonfante *et al.* 2020).

V současném precizním zemědělství (PZ), ale i konvenčním zemědělství je úrodnost půdy důležitým faktorem ovlivňujícím růst rostlin (Munawar *et al.* 2020; Javadi *et al.* 2021). Úrodnost půdy by měla být neustále monitorována v reálném čase stanovením jejích vlastností, jako jsou mikro a makro-živiny, půdní reakce (pH), obsah a kvalita půdní organické hmoty (SOM), rizikové prvky apod. (Recena *et al.* 2019). Monitoring přírodního prostředí (půdy) je proto velmi důležitý pro udržení, resp. zvýšení současné kvality a zdraví zemědělských půd (Munnaf and Mouazen 2021).

V současnosti se pro zjišťování obsahu SOM, resp. frakcionaci humusových látek (HL /humusové látky/, HK /huminové kyseliny/, FK /fulvokyseliny/), a dále i pro parametr barevný kvocient (index) / $Q_{4/6}$ / v zemědělských půdách využívají složité laboratorní metody /metody frakcionace humusu a izolace huminových kyselin apod./ (Kononova 1963; Stevenson 1994; Piccolo 1996, 2001; Piccolo *et al.* 2002; Menšík 2010; Menšík and Kulhavý 2011; Olk *et al.* 2019; Tiwari *et al.* 2023). Tyto metody jsou destruktivní, vyžadují náročnou přípravu vzorků a jsou také velmi časově náročné na samotné provedení analýzy (Pospíšilová *et al.* 2016). Vzhledem k dlouhé době měření a vysokým nákladům, které s těmito metodami souvisejí lze analyzovat jen velmi omezený počet vzorků, avšak tyto parametry jsou klíčové pro udržení, resp. zlepšení úrodnosti půdy v ČR (Menšík *et al.* 2018; Menšík and Nerušil 2021). V důsledku používání velkého množství chemikálií může také docházet ke znečištění životního prostředí a dále i k poškození lidského zdraví v laboratořích (výpary, poleptání apod.). Tyto faktory, především vysoké náklady na analýzu půdních vzorků, omezují možnosti rozsáhlého monitoringu půd, a to zejména ve velkých zemědělských oblastech. Z tohoto důvodu je zapotřebí hledat rychlejší a levnější způsoby zjišťování parametrů kvality půdy (SOC, HL, HK, HK, barevný index apod.) v půdě se srovnatelnou přesností jako již používané standardní laboratorní metody.

Moderním a zároveň velmi perspektivním směrem výzkumu v oblasti stanovení obsahu uhlíku a jeho frakcí v půdě je využití spektroskopie v blízké infračervené oblasti (NIRS). Z naměřených spekter lze na základě charakteristických absorpčních pásů, po vhodném chemometrickém zpracování (např. pomocí metod PCA, PLSR, MPLSR aj.), kvantifikovat obsah daných chemických prvků ve vzorku. Ve srovnání s konvenčními laboratorními metodami je NIRS levná rychlá nedestruktivní, neprodukuje žádné chemické látky a vyžaduje minimální přípravu vzorku, což ji činí velmi atraktivní (Heil and Schmidhalter 2021; Zhou *et al.* 2023; Safanelli *et al.* 2025).

2. Cíl metodiky

Metodika předkládá nejnovější postupy stanovení kvalitativních parametrů půdní organické hmoty /SOM/ (obsah SOC, HL, HK, FK, $Q_{4/6}$ a další) v usušených a přesátých vzorcích půd pomocí NIRS (blízké infračervené spektroskopie) na příkladu dlouhodobých výzkumných ploch (Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v.v.i. /*CARC*/, Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský /*ÚKZÚZ*/), ale i provozních výzkumných ploch (*AGROSPOL a.d.*, *Knínice*) v různých půdně klimatických podmínkách ČR (různé typy půd /*černozem*, *hnědozem*, *kambizem* apod./, odlišné klimatické i výrobní oblasti apod.). Výsledky přesnosti predikce kvalitativních parametrů SOM byly ověřeny na nezávislém validačním souboru vzorků, analyzovaných klasickými (standardními) laboratorními metodami, který potvrdil vysokou míru shody porovnávaných souborů.

3. Současný stav řešené problematiky

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, ale i způsob 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; Tobiášová *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).

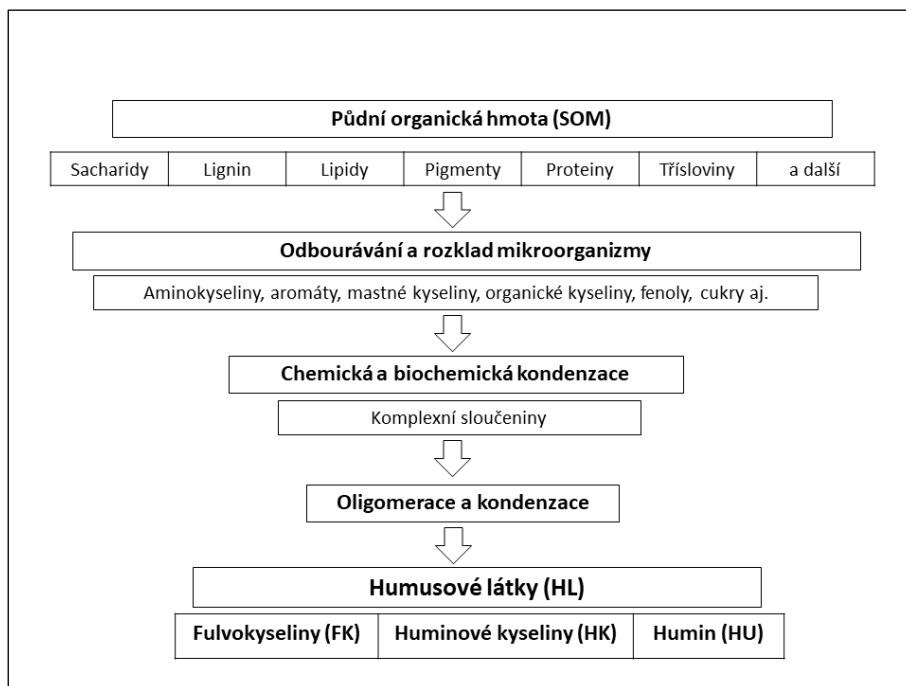
Konstituenty půdní organické hmoty – chemická frakcionace

V nedávné minulosti, ale i v současnosti je stále věnováno značné úsilí vývoji laboratorních analytických postupů, které by umožnily SOM podrobně popsat a charakterizovat. Definici humusu (latinský výraz pro půdu) a humusových látek ve svém přehledu literatury o původu, vlastnostech a významu humusových látek uvedl před více než 80 lety Waksman (1938). K jeho pojetí humusu se vrátili autoři Lehmann and Kleber (2015) a dále i Kleber and Lehmann (2019), a dospěli k závěru, že vzhledem k tomu, že alkalická extrakce nemůže rozlišit chemický vývoj humusových látek, nemůže být základem pro rozlišení huminových a nehuminových látek. Jejich doporučení se neseťkalo s kladným ohlasem v celosvětovém měřítku, neboť tito vědci od roku 2015 do současné doby nepřestali ve svých výzkumných pracích používat termín "*humus*" nebo "*humifikace*" (Tiwari *et al.* 2023). Autoři Baveye and Wander (2019) ve svém vědeckém článku předložili několik historických zdůvodnění a potvrdili, že Waksmanův pohled lze i po více než 80 letech považovat za stále aktuální. Studium humusových látek začalo již před více než 240 lety, kdy (Achar 1786) extrahoval huminovou kyselinu z rašeliny a zavedl první metody izolace a klasifikační schémata. Pro temně zbarvený organický materiál v půdě zavedl termín „*Huminstoffe*“ - huminové látky, jehož původ nacházíme v latinském slově „*humus*“, což znamená půda nebo země (Vlachová 2007). Podrobný přehled výzkumu humusu, resp. humusových látek od 19. do 21. století je uveden v disertační práci (Menšík 2010).

V SOM jsou obsaženy všechny organické sloučeniny, které jsou přirozenou součástí rostlinných a živočišných organizmů. Tyto látky podléhají celé řadě přeměn, při nichž mohou vznikat ze složitých makromolekulárních látek a polymerů chemicky jednodušší organické i anorganické látky nebo naopak mohou v procesu humifikace vznikat těžko rozložitelné látky o vysoké molekulové hmotnosti. Rychlost a druh těchto přeměn nezávisí jen na složení SOM, ale i na fyzikálně chemických a biologických vlastnostech prostředí. Látky tvořící SOM lze klasifikovat podle několika hledisek. Vzhledem k velké složitosti a k dynamice změn, kterými půdní organická hmota neustále prochází, nemůže však být žádné z těchto rozdělení zcela přesné (Stevenson 1994; Sparks 2003) viz *obr. 3.1*. Nejrozšířenějším procesem přeměn organických zbytků je humifikace a mineralizace, přičemž velmi důležitý v tomto procesu je jejich vzájemný poměr. Tento poměr je závislý na zdroji organického materiálu, jeho chemickém složení i geografických podmínkách prostředí. Proces, jehož výsledkem jsou humusové látky, se tradičně nazývá humifikace a je souborem mnoha biochemických reakcí. Procesy přeměn mají etapovitý charakter. Přeměna organických zbytků je v začátku velmi rychlá, ale postupně při odbourávání lehko rozložitelných sloučenin vznikají stabilní humusové látky (HL) a rychlost přeměny postupně klesá (Sotáková 1982).

Humus je možno po stránce látkové podle chemických a analytických znaků rozdělit na nehuminové látky (organické látky rostlinného a živočišného původu) a huminové látky (vytvořené z nehuminových látek a pro půdu specifické). Látkové složení humusu, a to především složení

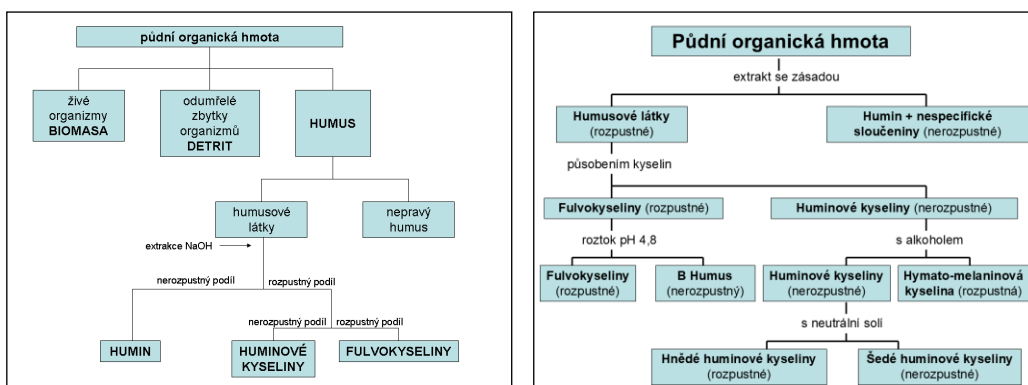
huminových látek, je nositelem všech vlivů a funkcí ve smyslu fyzikálním, chemickém i fyziologickém ve vztahu k půdě, jejíž vlastnosti ovlivňuje a mění i ve vztahu k živým organismům, na které působí. Nehuminové látky je možno oddělit z půdního vzorku kyselou hydrolyzou. Jestliže se z tohoto podílu odpočtou fulvokyseliny, které přecházejí do hydrolyzátu, vyjadřuje rozdíl dosud nehumifikované organické látky (Menšík 2010).



Obr. 3.1. Schéma tvorby humusových látek v půdě (upraveno dle Kononova 1963; Sotáková 1982; Stevenson 1994; Ouni et al. 2014; Guo et al. 2019; Tiwari et al. 2023).

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

- látky humusové (humic substances), tvořící 60–80 % SOM; jsou to pro půdu specifické, těžko rozložitelné, tmavě zbarvené látky, s relativně vysokou molekulovou hmotností (Aiken et al. 1985). Tyto látky vznikají v půdě sekundární syntézou. Humusové látky je možno rozdělit na tři frakce, na základě rozdílné rozpustnosti v kyselinách a loužích, na **fulvokyseliny, huminové kyseliny a humin** (Piccolo 1996). Tyto frakce se od sebe liší barvou, molekulovou hmotností, obsahem uhlíku a kyslíku i dalšími charakteristikami.



Obr. 3.2. Rozdělení organických látek v půdě a klasifikace humusových látek (Brady, Weil 2008, vlevo) a frakcionace půdní organické hmoty /SOM/ (Stevenson 1994; Sparks 2003, vpravo).

- nespecifické sloučeniny (nonhumic substances), tvořící 20–30 % SOM; jsou látky náležející do konkrétních skupin organických sloučenin popsaných organickou chemií (cukry, organické kyseliny,

aminokyseliny, vyšší mastné kyseliny, alkoholy, aldehydy, dusíkaté sloučeniny, celulóza, chitin, lignin, bílkoviny, polysacharidy a další sloučeniny).

Klasickým kritériem pro dělení humusových látek je jejich nerozpustnost v NaOH (humín) a následná rozpustnost (fulvokyseliny) nebo nerozpustnost – vysrážení (huminové kyseliny) v kyselině (obr. 3.2).

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

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

Hymatomelanové kyseliny (HMK) jsou látky, které se izolují z „nově vytvořených“ huminových kyselin alkoholovou extrakcí. HMK představují složitou směs látek, které mohou vznikat z huminových kyselin nebo při syntéze lehce rozložitelných organických zbytků, resp. při oxidačně redukčním rozkladu humusových látek, za přítomnosti kyslíku při určité vlhkosti.

Huminy (HU) představují silně karbonizovanou organickou hmotu, pevně vázanou na minerální podíl půdy (nejvíce rekalcičtrantní půdní organická hmota), a proto se nedají získat ani mnohonásobnou extrakcí alkáliemi z dekalcinované (zbažené vápníku) půdy (Skybová 2006; Skokanová and Dercová 2008; Schnitzer and Monreal 2011). Bylo prokázáno, že tvoří přibližně 50 % organického uhlíku (OC) v půdě (Rice 2001; Hayes *et al.* 2017). Molekulární povaha humínu není dobře prozkoumána, protože se obtížně z půdy extrahuje (Weber *et al.* 2022). Jeho nízká rozpustnost je způsobena nízkou hustotou náboje, sníženou polaritou (Hayes *et al.*, 2017) a interakcemi s ionty kovů, jílem a organickými povrchy, které silně vážou huminy na anorganické matrice a organické povrchy (Fabbri *et al.* 1996; Song *et al.* 2011; Weber *et al.* 2022). Lze proto předpokládat, že huminové frakce budou vhodné pro dlouhodobou sekvestraci uhlíku (C) v půdě. V roce 2016 byl prezentován názor na konferenci IHSS (Kanazawa, Japonsko), že huminy v současné době již neodpovídají základní definici humusových látek. Nadále lze i po roce 2016 nalézt práce kde jsou huminy součástí huminových (humusových) látek (Guo *et al.* 2019; Olk *et al.* 2019; Tiwari *et al.* 2023; Weber *et al.* 2024).

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

Význam humusových látek je mnohostranný a spočívá v kladném ovlivňování všech půdních vlastností působících rozhodujícím způsobem na obsah živin v půdě i na půdní úrodnost (Skybová 2006). Jejich přítomnost vede k vysokému poutání živin v půdě (6–7x vyšší než u jílových minerálů),

je důležitým faktorem drobtovité struktury půdy, jejímž důsledkem je příznivý vodní, vzdušný a tepelný režim půdy, kladně ovlivňuje pufrční schopnost půd, příznivě působí na biologické, biochemické vlastnosti půd (zvyšují biologickou aktivitu půdy, jsou zdrojem energie a potravy pro půdní heterotrofy, zvyšují sorpční kapacitu půdy, mají vliv na výživu rostlin, sycení svrchní části litosféry CO₂, ovlivňují půdní aciditu, ovlivňují koloběh prvků v pedosféře, ovlivňují charakter pedogenetických procesů apod.) a fyzikální vlastnosti půd /tvorba příznivé půdní struktury, zadržování srážkové vody, ovlivňují množství povrchového odtoku srážkové vody, ovlivňují teplotní i tepelný režim půdy, neutralizují atmosférické polutanty na bázi slabých anorganických kyselin/ (Malý and Siebielec 2015). Dále částečně váží některé těžké kovy v půdě, zabraňují vysrážení fosforečných sloučenin z půdního roztoku a dále rozpustné humusové látky vykazují přímý stimulační vliv na rostliny (Tiwari *et al.* 2023).

Spektroskopie

Spektroskopie (vzdálená, střední, blízká) si získala značný zájem ve studiu přírodního prostředí (kvantitativní a kvalitativní analýza složek půdy – pH, uhlík, dusík, živiny, rizikové prvky, huminové látky, uhličitany, jílové minerály apod.), zejména v posledních dvaceti letech (Madejová 2003; Aguiar *et al.* 2013; Dudek *et al.* 2021). Hlavní výhodou je možnost analyzovat celý vzorek půdy najednou a získat informace o jeho chemickém složení (Manley 2014; Workman and Shenk 2015; Javadi *et al.* 2021). Předností spektroskopie je rychlé spektrální měření a minimální nedestruktivní příprava vzorku, na rozdíl od destruktivní standardní chemické analýzy (Waruru *et al.* 2015). Nejslibnější spektrální metody, jako jsou viditelné (VIS), střední infračervené (MIR) a blízké infračervené (NIR) spektroskopie, vytvářejí nové možnosti v procesu hodnocení kvality půdy, zejména díky komplexnímu vzhledu do jejich fyzikálních a chemických vlastností (Han *et al.* 2021; Steffens *et al.* 2021; Zhang *et al.* 2021). Spektroskopické metody využívají skutečnosti, že prvky a molekuly od jednoduché skladby až po složité struktury selektivně absorbují nebo odrážejí elektromagnetické záření v závislosti na vlnové délce (Manley 2014). U neprůhledných médií, jako je půda, lze použít pouze odrazovou „reflektanční“ spektroskopii a vzhledem k jejich drsnosti povrchu se většinou měří difuzní odrazivost (Steffens *et al.* 2021). Jak již bylo uvedeno, spektroskopické metody jsou nedestruktivní a výsledky lze získat rychlým, robustním a snadno standardizovatelným procesem (Zhao *et al.* 2021). Interpretace dat se běžně provádí porovnáním spekter se standardizovanými spektrálními knihovny nebo kalibrováním na jiné analytické techniky (standardní chemické analýzy a postupy) za použití různých statistických přístupů (Nocita *et al.* 2013, 2014, 2015; Mouazen and Kuang 2016; Javadi *et al.* 2021).

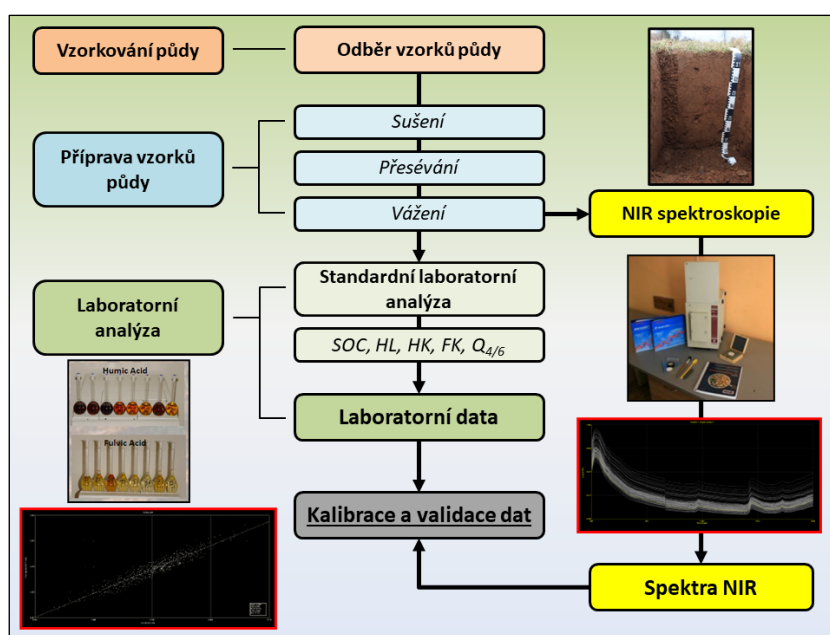
NIR spektroskopie

Blízká infračervená spektroskopie (NIRS) je již běžně používanou analytickou metodou v celé řadě výzkumných i zkušebních laboratoří v oblasti kontroly kvality rostlinných a živočišných produktů (Muselík 2012). NIR spektroskopie je určena zejména pro identifikaci a strukturní charakterizaci organických sloučenin i anorganických látek. Principem metody je pohlcování nebo reflexe různých vlnových délek dopadajícího záření, které závisí na chemickém složení analyzovaného vzorku (Manley 2014). Spektroskopie v NIR oblasti se v potravinářství a zemědělství uplatňuje již od 60. let minulého století, a to především zásluhou výzkumu K. Norrisa z USA (Norris 1992; Davies 2011). NIR analýza poskytuje výsledky v aktuálním čase, tzn. ještě ve výrobní technologii, před zabalením a expedicí současně během jednoho měření, v čase od několika sekund do jedné minuty (Marten *et al.* 1989).

Blízká infračervená spektroskopie (NIRS) je analytická technika, která využívá zdroj emitujícího záření známé vlnové délky (obvykle 800–2500 nm, tj. 12500–4000 cm⁻¹). Z praktických důvodů se podle vlnočtů rozlišuje oblast vzdálená (FIR, far infrared) vymezující vlnočty do 200 cm⁻¹, střední (MIR, middle infrared), které odpovídají vlnočty 4000–200 cm⁻¹ a blízká (NIR, near infrared), které odpovídá rozmezí vlnočtů 12821–4000 cm⁻¹ (Muselík 2012). V ní se nalézá většina vibračních vazeb -CH, -OH, -SH a -NH. Všechny absorpční pásy jsou výsledkem svrchních tónů (angl. *overtones*) či kombinací přechodů do základních MIR pásů (Siesler *et al.* 2002). Teorie NIR je velmi dobře popsána v řadě vědeckých publikací (Siesler *et al.* 2001; Burns and Ciurczak 2007; Huck and Bec 2020; Ozaki *et al.* 2021). Pro většinu aplikací kvantitativní analýzy prováděných v režimu reflektance je využívána oblast (400–700) a 1100–2500 nm z důvodu obtížného měření absorpčních pásů mimo uvedené rozpětí. Technika měření NIRS spekter včetně různých druhů přístrojů a zařízení je uvedena v metodice (Nerušil *et al.* 2016), schéma NIR analýzy vzorků půdy je znázorněno na obr. 3.3.

Chemometrické zpracování dat

Spektra odrazivosti NIRS (resp. Vis-NIR) obsahují bohaté informace o organickém i anorganickém složení půdy (Manley 2014). Obsah a kvalita organické hmoty výrazně ovlivňuje tvar a povahu spekter odrazivosti půdy (Amin *et al.* 2020). Obecně se spektrální odrazivost snižuje s nárůstem obsahu organické hmoty. Mezitím absorpční funkce ve spektrech Vis-NIR odpovídají podtónům a kombinacím základních pásem (Ben-Dor *et al.* 1997). Aby bylo možné kvantitativně analyzovat spektra NIR (Vis-NIR), je zpracování dat založeno na vícerozměrných kalibracích (Hanrahan *et al.* 2004). Mezi více proměnnými kalibracemi je částečná regrese nejmenších čtverců (PLSR) jednou z nejběžnějších technik spektrální kalibrace a predikce (Cheng and Wu 2006; Nawar *et al.* 2023). Metoda PLSR se výhodně používá ke konstrukci prediktivních modelů, když existuje mnoho prediktorových proměnných, které jsou vysoce kolineární. Jednou z výhod modelování PLSR je, že po sobě jdoucí ortogonální faktory vybrané algoritmem PLSR zvyšují kovarianci mezi proměnnými prediktor (X spektra) a odezva (Y vlastnost půdy). Tímto způsobem je většina variací v prediktorových a reakčních proměnných vysvětlena faktory PLSR (Leone *et al.* 2012). Dále se používá ve vícerozměrné kalibraci i modifikovaná regrese nejmenších čtverců /MPLSR/ (Cheng and Wu 2006; Jaconi *et al.* 2017; Ahmadi *et al.* 2021 aj.).



Obr. 3.3. Schéma NIR analýzy.

Půda a predikce parametrů obsahu a kvality SOM pomocí techniky NIRS

Vývoj kalibračních rovnic pro predikci obsahu SOC a obsahu dusíku (Ntot) v půdě je již na vysoké vědecké úrovni (Ko *et al.* 2004; Viscarra Rossel *et al.* 2006; Stenberg *et al.* 2010; Stenberg 2010; Vohland *et al.* 2011; Gannouni *et al.* 2012; Tekin *et al.* 2012; Yang and Mouazen 2012; Nocita *et al.* 2013; Ramirez-Lopez *et al.* 2013; Stevens *et al.* 2013; Soriano-Disla *et al.* 2014; Horta *et al.* 2015; Jaconi *et al.* 2017; Dotto *et al.* 2018; Barthès *et al.* 2019; Luo *et al.* 2020; Aguiar *et al.* 2021; Zhang *et al.* 2021; Ebrahimzadeh *et al.* 2021; Ng *et al.* 2022; Shahrayini *et al.* 2022; Das *et al.* 2023; Zhou *et al.* 2023; Chinilin *et al.* 2023; Qi *et al.* 2024; Santasup *et al.* 2024; Zhu *et al.* 2024; Dai *et al.* 2025 aj.) a dále viz tab. 3.1.

Naopak analýza kvality organické hmoty v zemědělských půdách (frakcionace humusových látek) pomocí NIR spektroskopie studována v současné době v ČR není. Dle provedené literární rešerše v databázích SCOPUS, Web of Science apod., tato problematika není v ČR řešena vůbec – existuje pouze první předběžný výsledek o kvalitě HL a HK z lesních ekosystémů (Menšík, Kunzová, Nerušil, Pospíšilová, *et al.* 2019). Ve světové literatuře existuje jen velmi omezené množství studií, které se částečně danou problematikou zabývají (Butkute and Šlepetiene 2006; Moros *et al.* 2008; Meissl *et al.* 2008; Albrecht *et al.* 2011; Gong *et al.* 2019; Lima *et al.* 2024; Salgado *et al.* 2025).

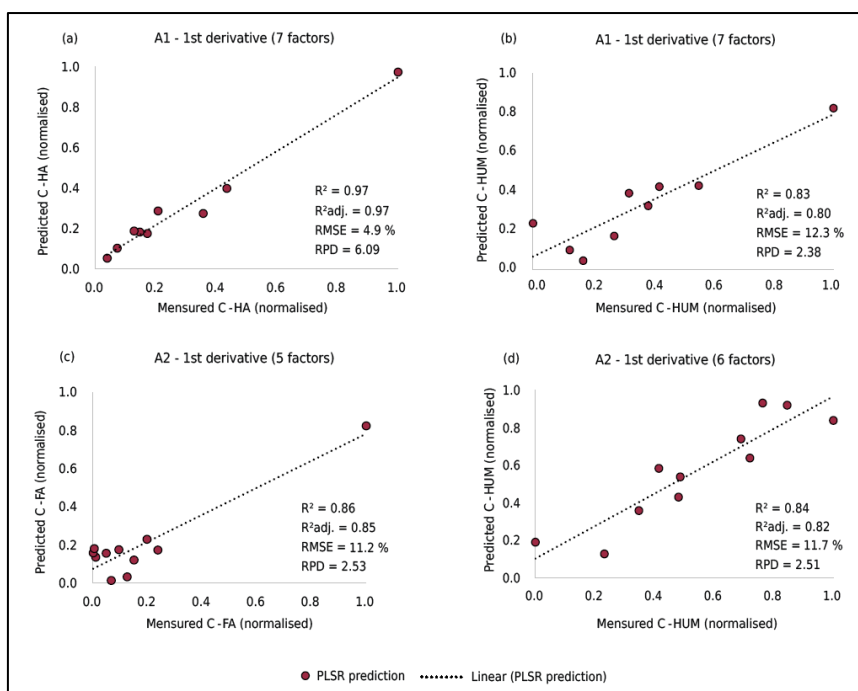
Výsledky měření obsahu HL, HK v nadložním humusu a půdě na chudých půdách s nedostatkem živin (kambizemi modální – KAm) pomocí NIR spektroskopie (Menšík, Kunzová, Nerušil, Pospíšilová,

et al. 2019) udávají regresní koeficienty kalibračního souboru pro HL ($R^2 = 0,96$), pro HK ($R^2 = 0,95$) i pro barevný index $Q_{4/6}$ ($R^2 = 0,91$). Obdobné výsledky regresních koeficientů pro obsah HK ($R^2 = 0,90$) v půdě pod travními porosty (pastva skotu) v Lotyšku potvrzuje studie (Butkute and Šlepetiene 2006).

Tab. 3.1. Spektrální odhady (predikce) Vis–NIR pro půdní organický uhlík (SOC) pomocí různých algoritmů (statistických metod).

Půdní vlastnost	Lokalita /Stát	Systém měření, příprava vzorku	Rozsah spektra (nm)	n_{kal}/n_{val}	Algoritmus (model)	Validace R^2	Citace
Ctot	Francie	LAB, suchý vzorek	1100–2500	159/34	MPLSR	0,87	(Barthès et al. 2008)
SOC	USA	LAB, suchý vzorek	350–2500	376/164	PLSR	0,77	(Morgan et al. 2009)
SOC	Austrálie	LAB, suchý vzorek	350–2500	-	ANN	0,89	(Rossel and Behrens 2010)
SOC	Německo	LAB, suchý vzorek	400–2500	109/40	SVMR	0,89	(Vohland et al. 2011)
SOC	Evropa	LAB, suchý vzorek	350–2500	cca 20000	PLSR	0,79–0,84	(Nocita et al. 2014)
SOC	Francie	LAB, suchý vzorek	350–2500	3048/380	PLSR	0,82	(Clairotte et al. 2016)
SOC	Německo	Čerstvý vzorek půdy	305–2200	98/42	Cubist	0,79	(Morellos et al. 2016)
SOC	Brazílie	LAB, suchý vzorek	400–2500	417/178	WAPLS	0,82	(Dotto et al. 2018)
SOC	Čína	LAB, suchý vzorek	350–2500	291/-	PLSR	0,80–0,97	(Ba et al. 2020)
SOC	Ázerbájdžán	LAB, suchý vzorek	350–2500	70/20	PLSR	0,85	(Amin et al. 2020)
SOM/SOC/	Portugalsko	LAB, suchý	800–2777	165/67	PLSR	0,85	(Serrano et al. 2021)
SOC	Polsko	LAB, suchý vzorek	1000–2500	60/30	PLSR, PCR, ANN	0,89–0,93	(Pudełko and Chodak 2020)

Pozn.: SOC - půdní organický uhlík, SOM - půdní organická hmota; LAB - laboratoř; n - počet vzorků, kal - kalibrace, val - validace, validace R^2 - koeficient determinace mezi měřeními a predikovanými hodnotami v nezávislé validaci, WAPLS - vážený průměr částečných nejmenších čtverců, PLSR - metoda částečných nejmenších čtverců (PLS - Partial Least Square Regression), MPLSR - modifikovaná metoda částečných nejmenších čtverců, PCR - regrese hlavních komponent, ANN - umělé neuronové sítě, SVMR - regrese metodou podpůrných vektorů, Cubist - kubický regresní model

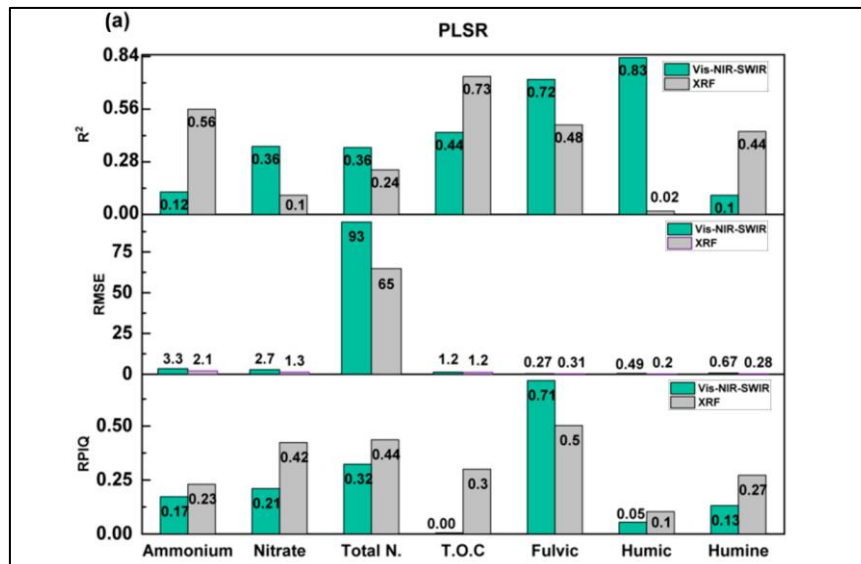


Obr. 3.4. Predikce parametrů kvality SOM v půdě (HA - huminová kyselina, FA - fulvokyselina, HU - humin) NIR spektroskopii (hyperspektrální senzor FieldSpec Pro FR 3 /350–2500 nm/) pomocí modelu PLSR na půdním typu Fluvizem (A1) a Kambiziem (A2) v oblasti Ceará /Brazílie/ (Ribeiro et al. 2023).

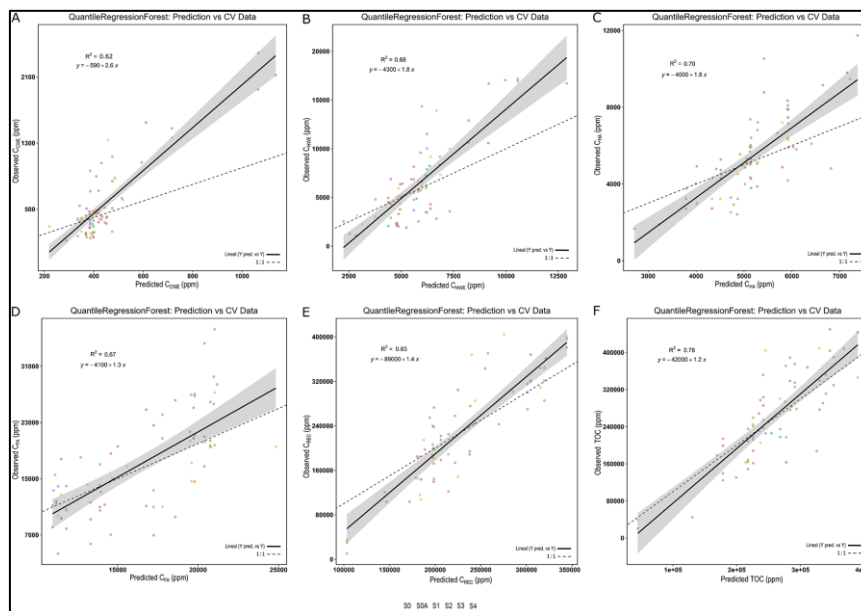
Obdobné výsledky vysokých regresních koeficientů pro obsah HA ($R^2 = 0,87–0,90$) v půdních sedimentech v oblasti Ria de Arousa (severovýchodní Španělsko) uvádí studie (Moros et al. 2008). Dále velmi vysoké koeficienty pro obsah HK ($R^2 = 0,81$) i FK ($R^2 = 0,80$) ale i poměru HK/FK ($R^2 = 0,86$) v kompostu (ale i v průběhu kompostování) uvádí studie (Albrecht et al. 2011) stanovené pomocí NIR spektroskopie. Studie autorů (Ribeiro et al. 2023) dále potvrzuje možnost stanovení HK, FK i huminů

pomocí NIR spektroskopie s vysokými regresními koeficienty validačních souborů pro HK ($R^2 = 0,97$) a FK ($R^2 = 0,86$) na půdním typu Fluvizem a Kambizem v oblasti Ceará (Brazílie) viz obr. 3.4. Obdobně studie autorů Lima *et al.* (2024), Salgado *et al.* (2025) dále potvrzuje možnost stanovení HK, FK pomocí NIR spektroskopie s vysokými regresními koeficienty kalibračních souborů pro HK ($R^2 = 0,70–0,83$) a FK ($R^2 = 0,67–0,72$) v půdách Brazílie i Španělska viz obr. 3.5 a 3.6.

Tyto získané regresní závislosti představují velmi perspektivní předpoklad, že metoda NIRS bude moci být využita jak v systému měření základních půdních vlastností, tak i v nových modelech v oblasti precizního zemědělství (Zemědělství 4.0).



Obr. 3.5. Statistické charakteristiky predikčního modelu PLSR pro predikci parametrů kvality půdy (TOC - celkový organický uhlík, Fulvic - huminová kyselina, Fulvic - fulvokyselina, Humine - humin) v povrchové vrstvě půdy 0–20 cm na experimentální farmě univerzity Oeste /Paulista-UNOESTE, Brazílie/ (Lima *et al.* 2024).

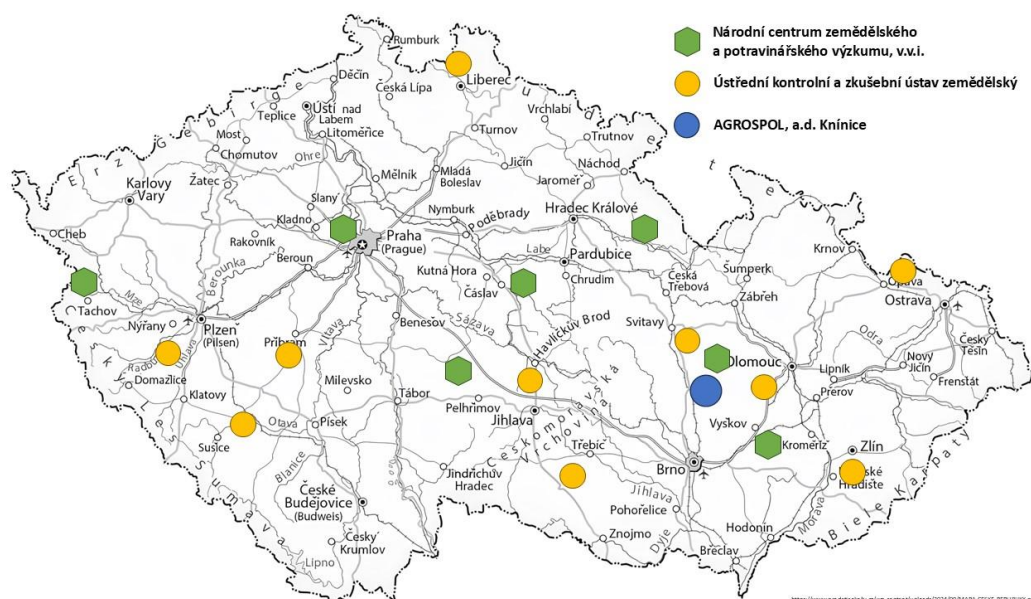


Obr. 3.6. Predikce parametrů kvality SOM v půdě pozorovaných vs. předpovídaných dat (pro nejlepší spektrální transformaci a aplikaci modelu QRF) pro parametry SOM (A) uhlík extrahovaný studenou vodou (CCWE), (B) uhlík extrahovaný horkou vodou (CHWE), (C) uhlík huminových kyselin (CHA), (D) uhlík fulvokyselin (CFA), (E) uhlík rekalcitrantních organických látek (CREC) a (F) celkový organický uhlík (TOC) v oblasti Asturie /pohoří Sierra de los Lagos, severozápadní Španělsko/(Salgado *et al.* 2025).

4. Experimentální část

4.1. Výzkumné lokality (pokusy) a odběr vzorků půdy

Výzkum stanovení parametrů (moderní postupy měření) kvality zemědělských půd pomocí spektroskopické metody (NIRS) byl realizován v různých půdně klimatických podmínkách ČR viz obr. 4.1. Podkladem pro zpracování kalibračních rovnic ke stanovení (predikci) parametrů kvality půdy (SOC, HL, HK, FK a poměr $Q_{4/6}$ atd.) a jejich nezávislé validace byly usušené a přesáté vzorky půdy (jemnozem – velikost částic <2 mm) z dlouhodobých pokusů CARC, v.v.i. (7 lokalit), dále dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ (10 lokalit) a experimentálních polí (provozní pokusy) modelového zemědělského podniku AGROSPOL, a.d. Knínice s různým způsobem využití /orná půda, travní prosty, sady apod./ v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny. Půdními typy výzkumných ploch byly černozemě, hnědozemě, kambizemě apod. (cca 68–75 % zastoupených typů půd v ČR).



Obr. 4.1. Mapa lokalit (výzkumné plochy, provozní plochy) odběrů vzorků půdy v rámci České republiky.

Dlouhodobé výživářské pokusy (RFE), Praha-Ruzyně (CARC, v.v.i.)

Dlouhodobé polní pokusy (založeno v roce 1955) se nachází v západní části Prahy ($50^{\circ}05'15''N$, $14^{\circ}17'28''E$), v nadmořské výšce 338 m. Průměrná roční teplota v oblasti výzkumných ploch je $8,5^{\circ}C$ s průměrnými srážkami 495,8 mm (průměrné hodnoty za období 1954–2014, meteorologická stanice Praha-Ruzyně). Půdním typem je hnědozem modální /HNm/, jílovitohlinitá, na spraši, částečně na křídové opuce, s vyšším obsahem hrubého prachu a nižším obsahem jílnatých částic a jílu. Ornice o mocnosti 26–33 cm přechází subhorizontem 34–54 cm do výrazného ořechovito-prismatického iluviálního horizontu zasahujícího do hloubky 77–80 cm, s přechodem do spraše v hloubce 85–120 cm. Úroveň podzemní vody je přibližně 20 m pod povrchem (Hlisnikovský *et al.* 2023).

RFE se skládají z pěti honů (I-V), každý o rozměrech 144×96 m. Na každém honu je aplikováno 24 variant hnojení ve čtyřech opakováních, celkem se každý hon skládá z 96 pokusných parcelék. Všechny 24 variant hnojení je na parcelkách rozmístěno v náhodném experimentálním uspořádání. Každá parcelka má rozměry 12×12 m a sklizňová plocha představuje plochu 5×5 m.

Vzorky půdy byly odebírány ve všech variantách hnojení a na všech honech (I-V). Půdní vzorky byly odebírány z horizontu Ap (0–30 cm) v období 2012–2022. Celkem bylo odebráno a změřeno cca 720 vzorků (kalibrační soubor byl tvořen 695 vzorky a validační soubor obsahoval 25 vzorků půdy).

Dlouhodobé výživářské pokusy (VOP) - Čáslav, Lukavec, Ivanovice na Hané a dlouhodobé pokusy Pernolec, Kostelec nad Orlicí (DPP) (CARC, v.v.i.)

Dlouhodobé polní pokusy (VOP) byly založeny v roce 1956 a nacházejí se na třech stanovištích v různých půdně-klimatických podmínkách ČR (Hlisnikovský *et al.* 2020). Cílem pokusů je analyzovat vliv různých způsobů hnojení na výnosy, kvalitu produkce a fyzikálně-chemické vlastnosti půdy viz tab.

4.1. VOP pokusy se skládají ze 4 honů. Na každém honu je 12 variant hnojení ve 4 opakováních (randomizovaný blokový design), celkem je na každé lokalitě 192 pokusných parcel. Každá parcela má rozměry 8 × 8 m (64 m²).

Tab. 4.1. Základní výrobní a klimatické podmínky stanovišť VOP pokusů.

Stanoviště	Čáslav	Lukavec	Ivanovice na Hané
Výrobní oblast	Řepařská (Ř1)	Bramborářská (B1)	Řepařská (Ř1)
Nadmořská výška (m n. m.)	263	620	225
Půda			
Půdní typ	Černozem karbonátová /luvická/ (CEc/l)	Kambizem modální (KAm)	Černozem modální (CEm)
Půdní druh	hlinitá	písčito-hlinitá	hlinitá
Hloubka ornice (m)	0,40–0,50	0,15–0,20	0,35–0,45
Klimatické charakteristiky			
Suma ročních srážek (mm)*	593	698	662
Průměrná roční teplota (°C)*	9,4	7,8	9,1
Klimatická oblast	teplá (T4)	mírně teplá (MT2)	teplá (T4)

Pozn.: výrobní oblast dle MZe 2009; půdní typ dle Němeček *et al.* 2011; *dlouhodobý normál (1980–2010); klimatická oblast dle QUITTA za období 1961–2000 (Voženílek and Květoň 2011)

Dlouhodobé polní pokusy (DPP) byly založeny v roce 1972 a nacházejí se na dvou stanovištích /Pernolec a Kostelec nad Orlicí/ (Hlisnikovský *et al.* 2022) viz tab. 4.2. Cílem pokusů je analyzovat účinnost kejdy prasat v různých systémech hnojení na orné půdě na půdní úrodnost a koloběh živin. DPP pokusy byly zachovány na 1 honu. Na honu je 15 variant hnojení ve 4 opakování (randomizovaný blokový design), na každé lokalitě je 60 parcel. Každá parcela má rozměry 8 × 5,5 m (44 m²).

Tab. 4.2. Základní výrobní a klimatické podmínky stanovišť DPP pokusů.

Stanoviště	Pernolec	Kostelec nad Orlicí
Výrobní oblast	Bramborářská (B1)	Řepařská (Ř1)
Nadmořská výška (m n. m.)	530	290
Půda		
Půdní typ	Černozem karbonátová /luvická/ (CEc/l)	Kambizem modální (KAm)
Půdní druh	písčito-hlinitá	hlinitá
Hloubka ornice (m)	0,25–0,35	0,40–0,60
Klimatické charakteristiky		
Suma ročních srážek (mm)*	557	714
Průměrná roční teplota (°C)*	7,5	8,5
Klimatická oblast	mírně teplá (MT2)	mírně teplá (MT5)

Pozn.: výrobní oblast dle MZe 2009; půdní typ dle Němeček *et al.* 2011; *dlouhodobé průměrné srážky a teploty pro Pernolec vycházejí z údajů z let 1977–2014 (37 let) a pro Kostelec z let 1982–2014 (32 let); klimatická oblast dle QUITTA za období 1961–2000 (Voženílek and Květoň 2011)

Vzorky půdy byly odebírány ve všech variantách hnojení na všech lokalitách (Čáslav, Lukavec, Ivanovice, Pernolec a Kostelec). Půdní vzorky byly odebírány z horizontu Ap (0–30 cm) v období 2012–2017 (VOP) a dále 2021–2022 (VOP+DPP). Celkem bylo měřeno v období 2012–2017 cca 820 vzorků půdy (kalibrační soubor 684 vzorků, validační soubor 136 vzorků). V období 2021–2022 bylo odebráno a změřeno cca 120 vzorků (kalibrační soubor byl tvořen 105 vzorky a validační soubor obsahoval 15 vzorků půdy).

Dlouhodobé pokusy v TTP, Jevíčko (DP JEV, CARC, v.v.i.)

Dlouhodobé polní pokusy v TTP byly založeny v roce 1986 na trvalém travním porostu /TTP/ v oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané, Jevíčko /JEV/). Experimentální louka se nachází v nadmořské výšce 342 m n. m., s průměrnou roční teplotou 8,4 °C /vegetační období 14,7 °C/ a průměrnými ročními srážkami 556 mm /vegetační období 369 mm/ (Stanice Jevíčko /1991–2020/ ČHMÚ Ostrava). Půdním typem výzkumných ploch je fluvizem slabě oglejená /FLg'/ a geologickým podkladem území jsou horniny permokarbonu Českého masivu. Experimentální plocha se nachází v nivě Úsobrnského potoka složené z nevápnitých nivních uloženin s hlinitou až jílovitohlinitou zrnitostí s dobrou sorpční schopností. Botanické složení TTP: Luční porost – porostový typ ovsíkový (*Arrhenatheretum*), dominantní travní druhy – ovsík vyvýšený (*Arrhenatherum elatius* /L./ J. Presl et C. Presl), srha laločnatá (*Dactylis glomerata* L.), psárka luční (*Alopecurus pratensis* L.), lipnice luční (*Poa pratensis* L.), kostřava červená (*Festuca rubra* L.) /Menšík and Nerušil 2019/. Dlouhodobé pokusy jsou vedeny formou přesných maloparcelových ploch (kolmo dělené bloky se čtyřmi opakováními, s pěšinami (oddělovacími mezerami) o šířce 0,25 m, které ohraničují parcely a umožňují pohyb sklizňových strojů, kolem pokusu a mezi bloky opakování byly ponechány chodníky o šířce 5,0 m, rozměr pokusné parcely činil 1,25 m x 8 m, tj. 10 m² sklizňová plocha.

Vzorky půdy byly odebírány ve všech variantách hnojení na všech pokusech. Půdní vzorky byly odebírány z horizontu Ad (0–20 cm) v období 2002–2017. Celkem bylo odebráno a změřeno cca 671 vzorků (kalibrační soubor byl tvořen 631 vzorky a validační soubor obsahoval 40 vzorků půdy).

Dlouhodobé pokusy ÚKZÚZ (ČZÚ v Praze)

Vzorky půdy pro stanovení kalibračních rovnic parametrů kvality půdy pochází z dlouhodobých polních pokusů (Vysoká, Staňkov, Chrastava, Horažďovice, Lípa, Jaroměřice a další) v různých půdně-klimatických podmínkách České republiky, které založil v letech 1975–1981 Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský v Brně (Balík *et al.* 2023a; b) viz *tab. 4.3*. Vzorky půdy byly odebírány v pokusech se stupňovanými dávkami dusíku při konstantních hladinách fosforu a draslíku (Kontrola, FYM, FYM + N1P1K1, FYM + N2P2K2, FYM + N3P3K3 apod.).

Půdní vzorky byly odebírány z horizontu Ap (0–30 cm) v období 2021–2022. Celkem bylo odebráno a změřeno cca 139 vzorků (kalibrační soubor byl tvořen 126 vzorky a validační soubor obsahoval 13 vzorků půdy).

Tab. 4.3. Základní charakteristiky dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ (<https://ukzuz.gov.cz/>).

Zkušební stanice	Výrobní oblast	Nadmořská výška (m)	Srážky* (mm)	Teplota* (°C)	Půdní typ	Půdní druh
Horažďovice	Bramborářská	472	585	7,8	KAm	hp
Chrastava	Bramborářská	345	738	8,0	HNI	h
Jaroměřice nad Rokytou	Bramborářská	425	481	8,0	HNm	jh
Lípa	Bramborářská	505	594	7,5	KAg	ph
Pusté Jakartice	Řepařská	295	584	8,3	HNI	h
Staňkov	Bramborářská	370	537	8,1	HNm	h
Hradec nad Svitavou	Bramborářská	465	616	7,4	HNI	h
Věrovany	Řepařská	207	502	8,7	CEI	h
Vysoká	Bramborářská	585	611	7,1	KAg	h
Uherský Ostroh	Kukuřičná	196	521	9,1	KAm	h

*Pozn.: výrobní oblast dle MZe 2009; *dlouhodobý normál (30 let); půdní typ dle Němeček *et al.* 2011: CE - černozem, HN - hnědozem, KA - kambizem; Subtyp: m - modální, l - luvičká, g - oglejená; Půdní druh: hp - hlinito-písčité, ph - písčito-hlinité, h - hlinité, jh - jílovito-hlinité; zdroj dat: <https://ukzuz.gov.cz/>*

Provozní pokusy Boskovická brázda a Dražanská vrchovina (AGROSPOL a.d., Knínice a CARC, v.v.i.)

Zájmové území se nachází v Jihomoravském kraji, v okrese Blansko a dále v Olomouckém kraji, v okrese Prostějov viz *obr. 4.2*. Leží cca 60 km severně od Brna v Boskovické brázdě v nadmořské výšce od 340 do 350 m n. m. a dále v oblasti Dražanské vrchoviny v nadmořských výškách od 600 do

670 m n. m. Území spadá do Brněnského bioregionu 1.24, který má protáhlý tvar od jihu k severu a plochu 807 km² a dále do Dražanského bioregionu 1.52, který zabírá geografický celek Dražanská vrchovina a jižní část celku Zábřežská vrchovina. Bioregion je mírně protažen ve směru S-J a má plochu 1248 m².

Zájmové území patří v regionálním členění georeliéfu České republiky do provincie Česká vysočina, subprovincie Česko-moravská, oblasti Brněnské vrchoviny, celku Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny, podcelku Malá Haná a Konická vrchovina, okrsku Jevíčská sníženina a Štěpánovská planina (Bína and Demek 2012). Okrsek Malá Haná zahrnuje Chrudichromský hřbet a tvoří úzký pruh vyššího terénu mezi Jevíčskou sníženinou a Lysickou sníženinou má plochu 8,98 km². Je tvořený permokarbonskými usazeninami Boskovické brázdy a nejvyšší bod se nazývá Habří 451,2 m n.m. Okrsek Štěpánovské planiny je ukloněn k SZ s SV, vystupují místy suky na spodnokarbonských drobách s izolovanými skalami (Bína and Demek 2012).

Geologickým podložím zájmového území Boskovické brázdy jsou kvarterní hlíny, spraše, písky a štěrky. Další část je tvořena permokarbonskými horninami jako jsou pískovce, slepence a jílovce a okrajová nejmenší část je zastoupena tercierními písky a jíly (www.geoportal.gov.cz). Zájmové území leží v geografickém útvaru Boskovické brázdy, která patří do pánví permokarbonských. Pánve vznikaly v důsledku hercynského vrásnění jako příkopová propadlina v moldanubickém krystaliniku. Výběžek Boskovické brázdy tvoří Červené pískovce a jílovce (lupky), lokálně i vápnité slepence permu (Culek 1995). Pánev je mělká na severu s permskými pískovci a břidlicí s vložkou třetihorních lupků a vápenců. Nejvyšší karbon v permském podloží se vyskytuje pouze v jižní části. Zachované sedimenty jsou větší mocnosti. V oblasti Dražanské vrchoviny většinu území budují jednotvárná souvrství mořského spodního karbonu – kulmu: břidlice, droby i slepence.

Dle fyzicko-geografické diferenciacie zájmové území Boskovické brázdy spadá do sníženin s normálně dlouhým, mírným a mírně suchým létem s černozeměmi, hnědozeměmi a eutrofními hnědými půdami (kambizeměmi) ve 3–4. vegetačním stupni s velmi nízkou lesnatostí. V oblasti Dražanské vrchoviny patří zájmové území do plochých vrchovin s krátkým, mírným až mírně chladným létem s oligotrofními až eutrofními hnědými půdami (kambizeměmi) ve 4. vegetačním stupni, místně i v 5. vegetačním stupni s rozdílnou lesnatostí.

Zájmové území Boskovické brázdy leží v rozlehlých sníženinách s plochým dnem a souvislými sprašovými pokryvy na jílovitých sedimentech, kde vznikly půdní druhy hlinité až jílovitohlinité. V zájmové oblasti proto rozeznáváme několik půdních typů: černozem luvická, černice glejová, hnědozem modální, luvizem glejová, šedozem modální, fluvizem glejová, kambizem modální, kambizem luvická, pararendzina kambická, pelozem karbonátová, glej modální, pseudoglej modální aj. (Němeček *et al.* 2011). V oblasti Dražanské vrchoviny v nejvyšší ploché části bioregionu (nad 600–650 m n.m.) se nacházejí souvislé plochy kambizemí viz *obr. 4.3*.

Tab. 4.4. Dlouhodobé průměrné měsíční a roční teploty (°C) a srážky (mm) ze stanice Jevíčko a Protivanov (1991–2020) dle ČHMÚ Ostrava–Poruba.

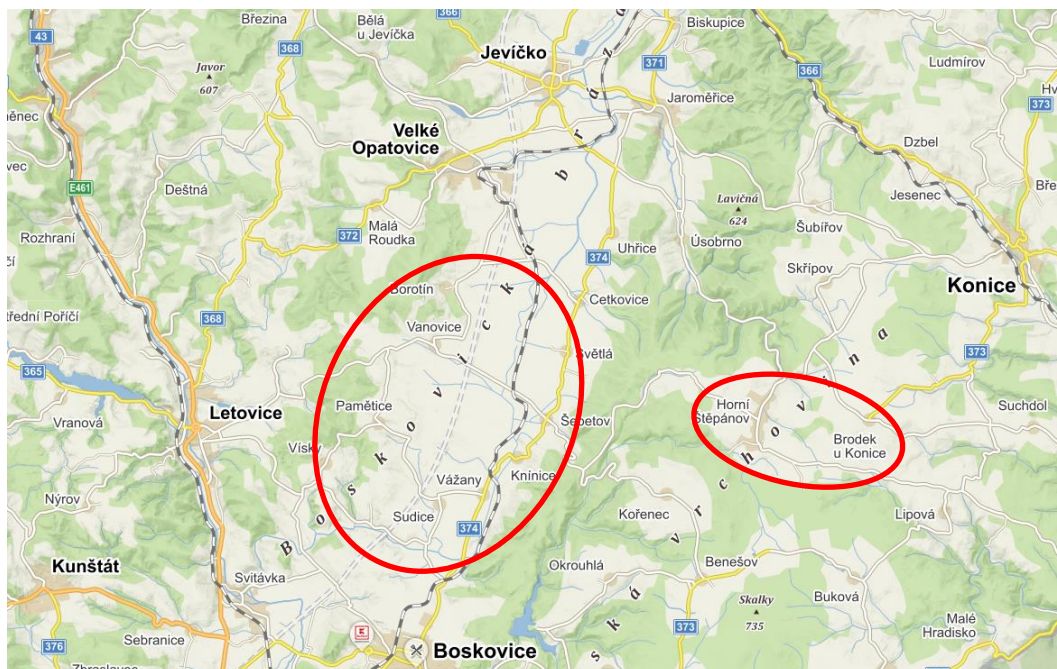
Jevíčko	Měsíc												Rok	Veg. období
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Srážky (mm)	28,7	23,3	35,5	33,8	62,6	68,7	83,3	66,0	54,9	38,9	32,5	30,5	558,5	369,2
Teplota (°C)	-1,9	-0,5	3,1	8,6	13,3	16,8	18,4	17,9	13,1	8,3	3,9	-0,6	8,4	14,7

Protivanov	Měsíc												Rok	Veg. období
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Srážky (mm)	33,9	30,4	43,7	40,2	68,5	72,0	85,3	76,1	62,6	48,2	40,0	36,3	637,2	452,9
Teplota (°C)	-2,8	-1,6	2,0	7,6	12,0	15,5	17,4	17,4	12,4	7,3	2,4	-1,9	7,3	12,8

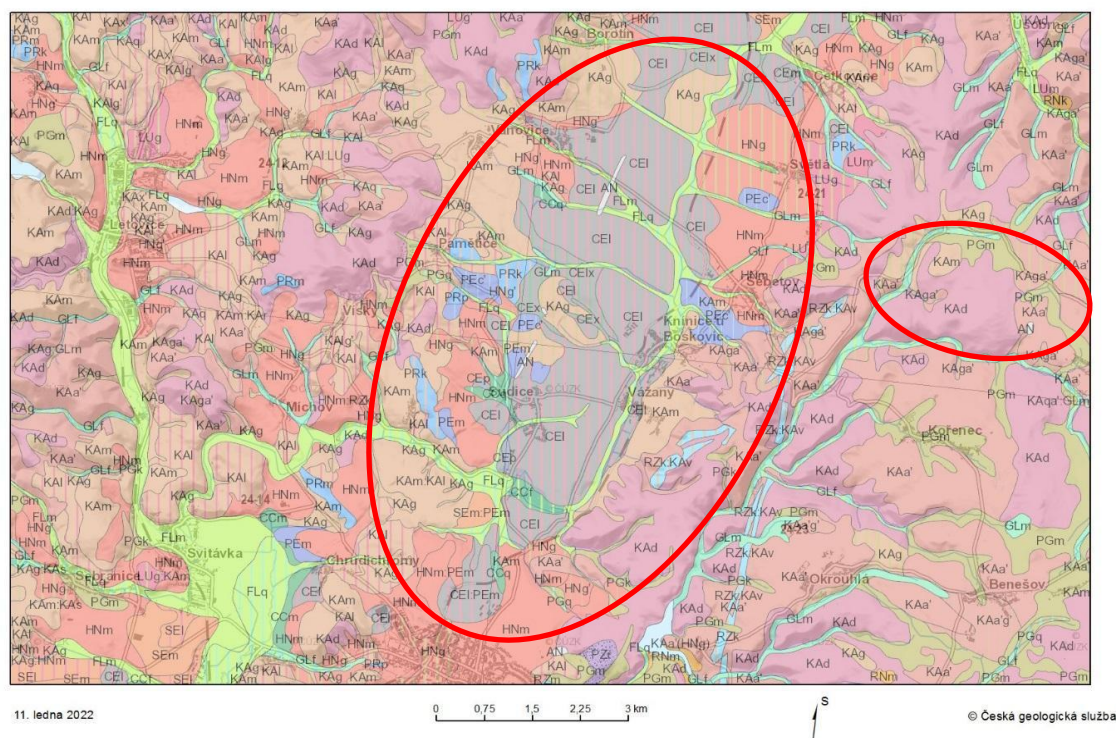
Pozn.: Vegetační období 1.4.–30.9; normál (1991–2020). Zdroj: ČHMÚ Ostrava.

Klimatický region v oblasti Boskovické brázdy dle je mírně teplý, vlhký, nížinný. Podnebí v zájmové oblasti Malé Hané dle klasifikace dle Quitta (Quitt 1971) můžeme v období 1961–2000 zařadit do kategorie (klimatická oblast) mírně teplá /MT8–9/ (Štěpánová 2010). V oblasti Dražanské

vrchoviny je klimatický region chladný a vlhký dle (Culek 1995, 2013) a dle klasifikace Quitta (1971) můžeme v období 1961–2000 zařadit území do kategorie chladné /CH7/. Dlouhodobé průměrné roční teploty vzduchu a roční srážky za období 1991–2020 uvádí *tab. 4.4*.



Obr. 4.2. Mapa zájmového území (upraveno podle <https://mapy.cz/>).



Obr. 4.3. Pedologická mapa zájmového území (upraveno podle <http://mapy.geology.cz/pudy/>).

AGROSPOL, a.d. Knínice – modelový podnik

AGROSPOL, a.d. Knínice hospodaří celkem na 2 215 ha zemědělské půdy (orná 1 929 ha, TTP 180 ha) v chladné řepářské oblasti na sever od Boskovic v Boskovické brázdě a až po katastr Borotín

a v bramborářské výrobní oblasti Horního Štěpánova a Brodka u Konice. Mezi hlavní pěstované plodiny patří obilniny – ozimá pšenice (550 ha), ječmen (150 ha), oves (30 ha), kukuřice (160 ha siláž), okopaniny – cukrovka (160 ha), brambory (5 ha), krmná řepa (2 ha), olejninny – řepka (200 ha), slunečnice (30 ha), pícniny – volečka (140 ha), jetelotravní směsi a žito (GPS, 50 ha), širok (60 ha) a léčivé rostliny – ostropestřec mariánský (60 ha). Dále provozuje sady a školky – višně (38 ha), jablka (7 ha) a švestky (10 ha). Živočišná výroba se zaměřuje na dojný skot - 460 plemenic českého strakatého skotu, jalovičky se používají především do vlastního obratu stáda a býčci (200) se vykrmují do jateční hmotnosti. Prasata – základní stádo 230 prasnic, předvýkrm (1000 kusů, na rošttech), výkrm (2000 kusů, hluboká podestýlka).

Půdní vzorky byly odebírány z horizontu Ap (0–30 cm) v období 2018–2023 (15 experimentálních poli/lokalit). Celkem bylo odebráno a změřeno cca 144 vzorků (kalibrační soubor byl tvořen 130 vzorky a validační soubor obsahoval 14 vzorků půdy).

4.2. Laboratorní analýzy a statistické zpracování dat

Laboratoř CARC, v.v.i. a Mendelova univerzita v Brně (vzorky půdy CARC, v.v.i. a AGROSPOL a.d., Knínice)

Obsah půdního organického uhlíku (SOC) byl stanoven kolorimetricky dle (Sims and Haby 1971), byla použita oxidimetrická titrace podle (Nelson and Sommers 1996). Frakcionace humusových látek byla provedena krátkou frakcionací dle metody Kononové-Belchikové (Kononova 1963). Postup: obsah HK a FK (= součet HL) byl extrahován z 5 g vzorku půdy se 100 ml 0,1 M roztoku NaOH a 0,1 M $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ (1:1, obj./obj.). Uhlík v HL, HK, byl stanoven metodou oxidimetrické titrace. Obsah HK byl vypočten jako rozdíl mezi HL a HK. Barevný index /kvocient/ ($Q_{4/6}$) byl vypočten jako poměr absorbance HL ve spektrálním rozsahu UV-VIS při 465 nm a 665 nm ($= A_{465}/A_{665}$). UV-VIS spektra byly měřeny za použití Varian Carry 50 Probe s optickým vláknem v rozmezí 300–700 nm (Varian Mulgrave, Victoria, Austrálie).

Laboratoř ČZU v Praze (vzorky půdy ÚKZÚZ)

Obsah celkového organického uhlíku (C_{tot}) byl stanoven oxidací (spálením) pomocí analyzátoru CNS Elementar Vario Macro (Elementar Analysensysteme, Hanau-Frankfurt am Main, Německo).

Frakcionace humusových látek (CHS /HL/) byla provedena podle Pospíšilová *et al.* (2016), Kononova (1963) po získání pyrofosfátové extrahovatelné frakce, která představuje sumu uhlíku v huminových kyselinách (CHA /HK/) a fulvokyselinách (CFA /FK/). CHA a CFA byly extrahovány z 5 g půdního vzorku směsným roztokem 0,10 mol.l⁻¹ NaOH (Lach-ner, s.r.o., Neratovice, Česká republika) a 0,10 mol.l⁻¹ $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ (1:20 w/v) (Penta Chemicals Unlimited, Praha, Česká republika). Byly izolovány následující frakce uhlíku: CFA byl získán z roztoku, který byl okyselen zředěnou H_2SO_4 (Lach-ner, Neratovice, Česká republika) na pH 1,0–1,5 a ponechán v klidu po dobu 24 h, a CHA byl získán rozpuštěním dříve vzniklé sraženiny v horkém roztoku 0,05 mol.l⁻¹ NaOH. Před jodometrickou titrací byla sušina vzniklá odpařením každého vzorku rozpuštěna ve směsi 0,067 mol.l⁻¹ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (Lach-ner, s.r.o., Neratovice, Česká republika) a koncentrované H_2SO_4 za zvýšené teploty.

Barevný index /kvocient/ ($Q_{4/6}$) byl analyzován spektrofotometrickou metodou. Půdní vzorky byly extrahovány pomocí pyrofosforečnanu sodného (0,05 M $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) a měřeny stanovením poměru absorbancí při 400 a 600 nm na analyzátoru Lambda 25 UV/Vis (Perkin Elmer, Waltham, MA, USA).

K hodnocení extrahovatelného půdního organického uhlíku byla použita extrakce horkou vodou (CHWC). Půdní vzorky byly vysušeny při 40 °C a extrahovány vodou (1:5, w/v). Suspenze byla vařena po dobu jedné hodiny. CHWC byl stanoven pomocí segmentové průtokové analýzy s využitím infračervené detekce na systému Skalarplus (Skalar, Breda, Nizozemsko).

Index potenciální smáčivosti (PWI) a index aromaticity (iAR) byly stanoveny pomocí DRIFT (difuzní reflexní infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací) spekter. DRIFT spektra byla zaznamenána pomocí infračerveného spektrometru (Nicolet IS10, Waltham, MA, USA). Byla použita spektra s rozsahem 2,50 až 25,0 μm (4000 až 400 cm^{-1}). Jako referenční pozadí bylo použito zlaté zrcadlo (technika měření). Bylo použito 64 skenů s rozlišením 4,00 cm^{-1} a Kubelkovy-Munkovy jednotky. Pro analýzu spekter byl použit software OMNIC 9.2.41 (Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, USA). Pásky alkylových skupin C-H (A: 2948–2920 cm^{-1} a 2864–2849 cm^{-1}) a pásky skupin C=O (B:

1710 a 1640–1600 cm^{-1}) byly použity k určení indexu potenciální smáčivosti ($\text{PWI} = \text{A/B}$) (Ellerbrock *et al.* 2005).

Index aromaticity byl vypočten podle odrazivosti alifatických pásů v rozmezí 3000–2800 cm^{-1} (AL) a aromatického pásu při 1520 cm^{-1} (AR), kde $i\text{AR} = \text{AL}/(\text{AL} + \text{AR})$ (Iqbal *et al.* 2010).

Celkový glomalin (TG) byly stanoven podle Wrightové, Upadhyayi in Sedlář *et al.* (2023). K 1,00 g na vzduchu vysušené půdy (<2 mm) bylo přidáno 8 ml citrátu sodného (Penta Chemicals Unlimited, Praha, Česká republika) (50 mmol.l^{-1} pH 8,0), následovalo zahřátí v autoklávu na 121 °C (60 min), ochlazení a odstředění při 5000 ot/min (15 min). Centrifugace supernatantu stejného vzorku se opakovala 5krát, dokud supernatant přestal vykazovat červenohnědou barvu, která je typická pro glomalin. TG byl stanoven kolorimetricky s použitím hovězího albuminu (BSA) jako standardu pro kvantifikaci a pomocí Bradfordova proteinového testu (obojí od firmy Bio-Rad, Hercules, CA, USA) pro dosažení změny barvy.

Laboratoř NIRS (CARC, v.v.i., VS Jevíčko)

Identické vzorky půdy byly proměřeny na disperzním spektrometru FOSS NIRSystems 6500 instrument (Company NIRSystems, Inc., Silver Spring, USA), umístěné na pracovišti CARC, v.v.i., Praha, VS Jevíčko. Měření vzorků bylo provedeno v malých kruhových kyvetách (*small ring cups*) ve dvou paralelních opakováních. Skenování vzorku bylo nastaveno v režimu reflektance pro oblast 400–2500 nm, tj. ve viditelné a blízké infračervené oblasti spektra, krok snímání 2 nm. Pro vývoj kalibračních rovnic a ověření validačních rovnic včetně grafických výstupů byl využit software WinISI II (Infrasoft International, Inc., USA), verze 1.50. Pro vývoj kalibračních rovnic byla použita metoda částečných nejmenších čtverců PLSR /anglicky *Partial Least Squares*/ (Næsset *et al.* 2005, Wang *et al.* 2006) a modifikovaná metoda částečných nejmenších čtverců /MPLSR/ (Martens and Naes 1992; Cheng and Wu 2006; González-Martín *et al.* 2015; Nawar *et al.* 2023).

Pojem kalibrace je používán k popsání postupu konverze informací o NIR absorpci do hodnot laboratorní referenční metody. Přesnost této konverze se posuzuje na základě směrodatné odchylky kalibrace (SEC) a směrodatné odchylky predikce (standard error of performance, SEP). SEP při úspěšné NIR kalibraci bývá asi dvojnásobně velká ve srovnání se směrodatnou odchylkou při laboratorním stanovení (Míka *et al.* 2008). Kritériem pro výběr kalibrační rovnice je pak SEC a R^2 (koeficient determinace). Posouzení vhodnosti predikčního modelu pro jeho praktické využití je obvykle prováděno podle koeficientu determinace R^2 (viz. tab. 4.5).

Tab. 4.5. Kategorizace získaných kalibračních modelů podle koeficientu determinace (Míka *et al.* 2003; Dvořáček *et al.* 2014; Reda *et al.* 2021).

Kategorie použitelnosti modelu	Rozsah koeficientu determinace R^2
excelentní	> 0,90
použitelný pro běžnou zemědělskou praxi	(0,75) 0,82–0,90
pouze orientační odhad sledovaného znaku	< (0,75) 0,82

Metoda částečných nejmenších čtverců (PLSR – Partial Least Squares Regression) je mnohorozměrná statistická metoda, která umožňuje odhalovat strukturu dat a studovat vztahy mezi více závislými a více vysvětlujícími proměnnými (Abdi 2007; Huang 2018; Maršalová 2019). PLSR je jednou z metod z rodiny lineární regresní analýzy, které využívají prvky faktorové analýzy (Factor analysis – FA) nebo analýzy hlavních komponent (Principal component analysis – PCA) (Wang *et al.* 2006). Zatímco výše zmíněné hledají rovinu minimálního rozptylu mezi závislými nebo nezávislými proměnnými odděleně, PLS analýza kombinuje obě skupiny proměnných, promítne je do společné roviny a teprve ve vzniklé soustavě hledá rovinu minimálního rozptylu. Metoda PLSR v podstatě hledá rovinu mezi nezávislými proměnnými, která zároveň vysvětluje co největší podíl rozptylu závislé (predikované) proměnné (Maršalová 2019). PLSR využívá vícerozměrný prostor a umožňuje nám komprimovat obsáhlá spektrální data. Počet spektrálních proměnných je ve spektrální matici převedeno na menší počet faktorů (faktory PLSR), odstraní se tak nepotřebné spektrální informace. PLSR je vhodná metoda pro nedefinované matrice analyzovaných vzorků a pro případy, kdy dochází k překrytí části spektrálních pásů (Wang *et al.* 2021). Metoda PLSR je založená na kovarianci a je jednou z mnoha metod, které odkazují na modelování strukturálních rovnic (Pirouz 2006). Oproti jiným statistickým

metodám je PLSR schopna počítat s velkými, „zašuměnými“ datovými soubory s vysokým počtem multikolineárních proměnných (Van Roon *et al.* 2014). Výstupy PLSR se skládají ze dvou složek. První složka ukazuje a popisuje vztah mezi tzv. latentními proměnnými¹ a druhá složka poskytuje informaci o vztazích mezi latentními proměnnými a jejich indikátory. Hlavní výhodou metody PLSR je mnohem méně omezujících předpokladů ve srovnání s jinými vícerozměrnými technikami (Pirouz 2012; Van Roon *et al.* 2014). Modifikovaná metoda částečných nejmenších čtverců (MPLSR – Modified Partial Least Squares Regression) je často stabilnější a přesnější než standardní algoritmus PLSR (Zhang and Zhang 2014; Hernández-Jiménez *et al.* 2020; H V. Ramarosan *et al.* 2023). Rozdíl oproti PLSR je, že v MPLSR jsou získaná rezidua NIRS pro každou vlnovou délku, po výpočtu každého faktoru standardizována (dělena směrodatnou odchylkou reziduí pro každou vlnovou délku) před výpočtem další proměnné, resp. faktoru (González-Martín *et al.* 2011).

Vybraná část souboru vzorků s referenčními hodnotami, ponechaná mimo kalibrační soubor, se označuje jako validační soubor /nezávislá validace/ (Míka 1997; Míka *et al.* 2003, 2008) a slouží k ověření kalibračních rovnic. "Nejlepší" rovnice se vybírá na základě SEP a R². Zatímco SEC se vždycky snižuje (tj. zlepšuje) s přidávanými vlnovými délkami, SEP nikoli. Ve skutečnosti SEP většinou dosáhne minima, pak má s přidávanými vlnovými délkami tendenci se znovu zvyšovat tak, jak stoupá nebezpečí *overfitting*. Směrnice přímky mezi "aktuálními" vs. "predikovanými" hodnotami by měla být blízká hodnotě 1,0, což udává, že přímka je postavena k osám x, y pod úhlem 45° (Míka *et al.* 2008; Nerušil *et al.* 2018). Pro dosažení takové hodnoty by měl být průměr a směrodatná odchylka validačního souboru velice podobné kalibračního souboru. Při výběru "nejlepší" kalibrační rovnice se používají všechna tato kritéria, přičemž snaha je dodržet co nejmenší počet *terms* (jako vysvětlitelných proměnných).

4.3. Predikce parametrů kvality půdy

Půdní organický uhlík (SOC), celkový uhlík (Ctot) a celkový dusík (Ntot)

Vývoj kalibračních rovnic byl proveden na různě velkých kalibračních (119–631) i validačních (13–120) souborech dat. Spektra vzorků půdy pro každý jednotlivý parametr vždy v obou souborech (kalibrační/validační) byla velmi podobná (významně se od sebe nelišila).

Tab. 4.6. Kalibrace a predikce parametrů kvality půdy (SOC, Ctot a Ntot) pomocí techniky NIRS.

Parametr	Lokalita	Reg. model	n	Kalibrace			Predikce	
				Průměr	SEC	R ²	SEP	R ²
SOC	RFE	MPLSR	586	1,387	0,051	0,890	0,063	0,826
	VOP	MPLSR	597	1,783	0,062	0,955	0,080	0,925
	DP JEV	MPLSR	554	2,267	0,112	0,904	0,135	0,860
	VOP+DPP	MPLSR	98	1,141	0,082	0,919	0,085	0,912
	AGROSPOL	MPLSR	120	1,597	0,120	0,935	0,164	0,884
Ctot	ÚKZÚZ	MPLSR	119	1,365	0,069	0,935	0,099	0,867
Ntot	VOP	MPLSR	631	0,190	0,009	0,916	0,010	0,891
	JEV	MPLSR	569	0,207	0,013	0,887	0,025	0,829
	ÚKZÚZ	MPLSR	118	0,036	0,006	0,932	0,010	0,815

Pozn.: SOC - půdní organický uhlík, Ctot - celkový organický uhlík, Ntot - celkový dusík; RFE - Praha; VOP - Čáslav, Lukavec, Ivanovice na Hané, DP JEV - Jevíčko, VOP+DPP - Čáslav, Lukavec, Ivanovice na Hané + Pernolec a Kostelec nad Orlicí, AGROSPOL - Boskovická brázda a Dražanská vrchovina (15 lokalit), ÚKZÚZ - dlouhodobé pokusy (10 lokalit); MPLSR - modifikovaná metoda částečných nejmenších čtverců (Modified Partial Least Squares Regression; n - počet vzorků kalibrace, SEC - směrodatná odchylka kalibrace, SEP - směrodatná odchylka predikce, R² - koeficient determinace

Před samotným vývojem kalibrací (vývoj kalibračních rovnic pro predikci parametrů) byla provedena analýza hlavních komponent (PCA). Ve všech případech byla vysvětlená spektrální variabilita vyšší než 90 %. Vývoj kalibračních rovnic byl proveden pouze se spektry vzorků a jejich chemickými parametry. Kalibrace byly prováděny s využitím modifikované metody nejmenších čtverců

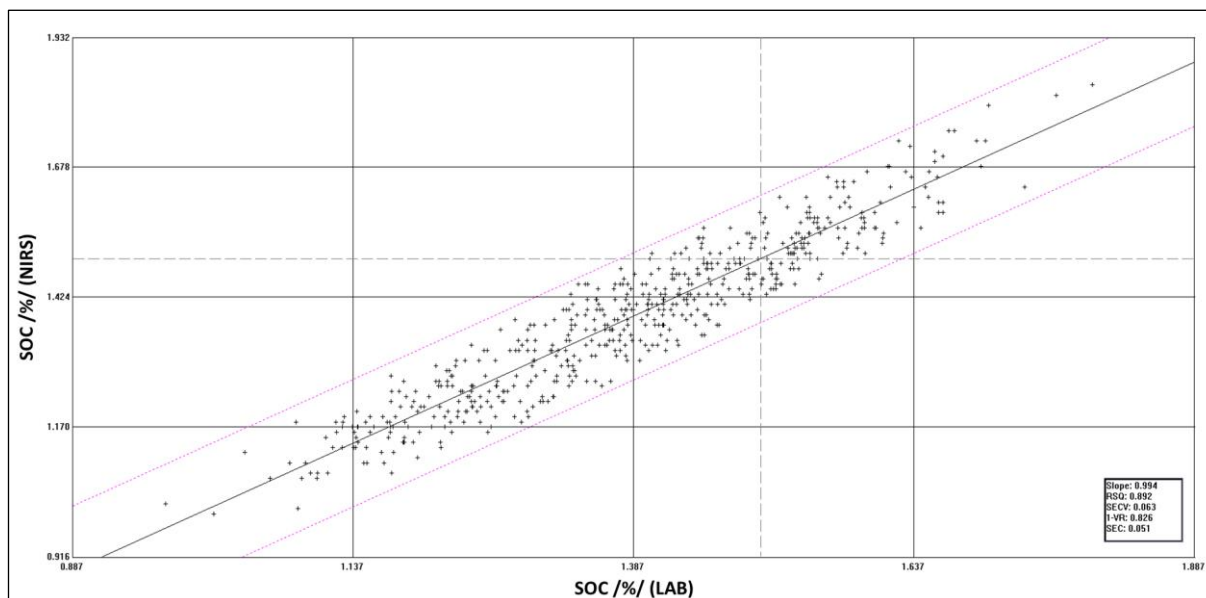
¹ Latentní proměnné jsou nové proměnné, které jsou získané jako lineární kombinace původních proměnných (Abdi and Williams 2013).

(MPLSR), metody nejmenších čtverců (PLSR) i regresí hlavních komponent (PCR). V tab. 4.6 je vždy uvedena metoda kalibrace (regresní model), kde bylo dosaženo nejlepší shody mezi laboratorní metodou a NIRS analýzou (nejlepší parametry regresního modelu kalibrace).

Tab. 4.7. Validace parametrů kvality půdy (SOC, Ctot a Ntot) pomocí techniky NIRS.

Parametr	Lokalita	n	Validace				R ²
			SEP	SEP (C)	BIAS	SLOPE	
SOC	RFE	20	0,054	0,055	-0,010	1,018	0,866
	VOP	102	0,130	0,059	-0,116	0,953	0,970
	DP JEV	38	0,103	0,095	0,044	0,961	0,873
	VOP+DPP	14	0,093	0,095	-0,015	1,034	0,902
	AGROSPOL	13	0,187	0,177	-0,077	0,982	0,878
Ctot	ÚKZÚZ	13	0,095	0,090	0,039	0,875	0,871
Ntot	VOP	120	0,027	0,009	0,025	1,104	0,951
	JEV	31	0,043	0,012	0,041	0,810	0,826
	ÚKZÚZ	13	0,009	0,009	0,004	0,888	0,877

Pozn.: SOC - půdní organický uhlík, Ctot - celkový organický uhlík, Ntot - celkový dusík; RFE - Praha; VOP - Čáslav, Lukavec, Ivanovice na Hané, DP JEV - Jevíčko, VOP+DPP - Čáslav, Lukavec, Ivanovice na Hané + Pernolec a Kostelec nad Orlicí, AGROSPOL - Boskovická brázda a Dražanská vrchovina (15 lokalit), ÚKZÚZ - dlouhodobé pokusy (10 lokalit); n - počet vzorků validace, SEP - směrodatná odchylka predikce, SEP (C) - směrodatná odchylka predikce korigovaná konstantou kalibrační křivky (BIAS), BIAS - konstanta kalibrační křivky, SLOPE - směrnice kalibrační křivky, R² - koeficient determinace

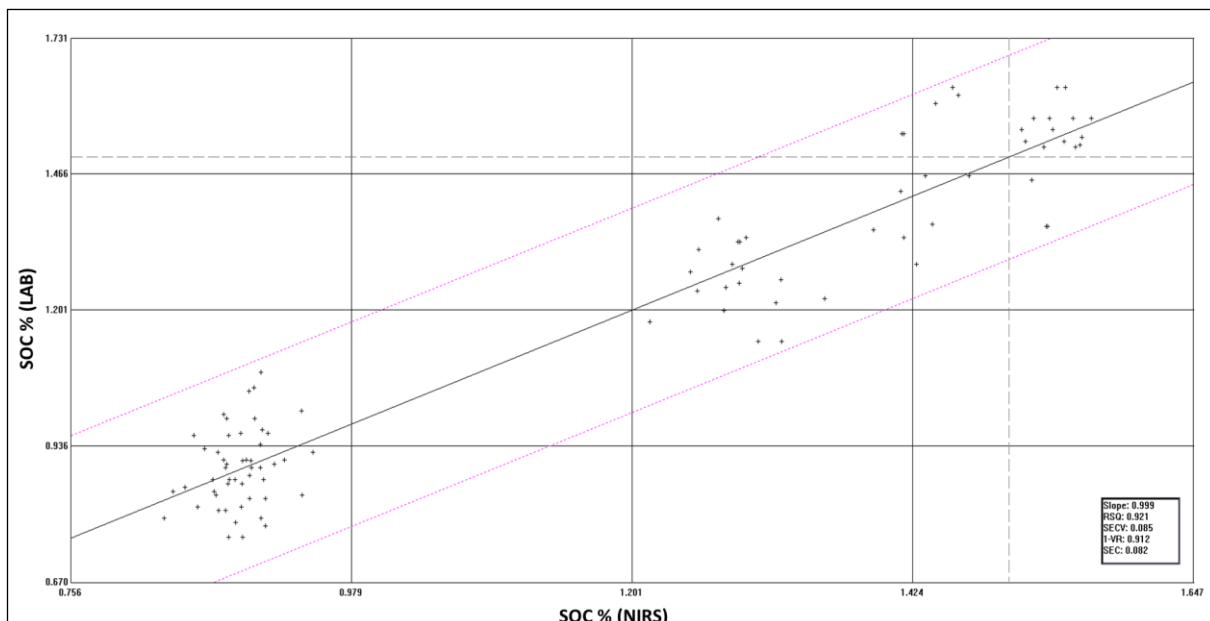


Pozn.: LAB - standardní laboratorní metoda, NIRS - blízká infračervená spektroskopie

Graf 4.1. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah SOC v půdách na lokalitě RFE.

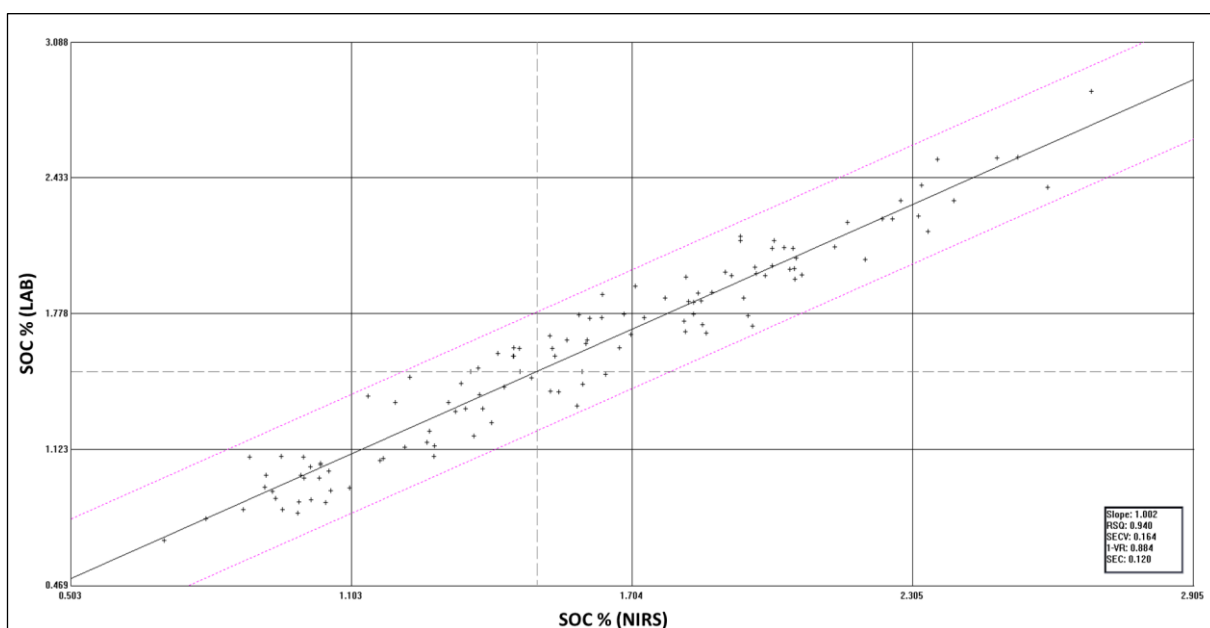
Výsledné statistické parametry kalibrace (regrese) viz tab. 4.6 byly získány pro každý parametr (SOC, Ctot) pomocí výpočtů za využití (1) spektrálních kritérií (H-kritérium /statistika/) nebo (2) chemických kritérií (T-kritérium/statistika/). Anomální spektra byla detekována pomocí Mahalanobisovy vzdálenosti. Riziko chyb ve vyvinutých rovnicích je v praktických podmínkách velmi nízké nebo téměř nulové, když se standardizovaná H statistika (Mahalanobisova vzdálenost²) (Mahalanobis 1936; De Maesschalck *et al.* 2000) používá při rutinní analýze neznámých vzorků (odlišné spektrum neznámého vzorku od průměrného spektra v kalibrační sadě). Vzorky s hodnotou $H > 3$ mohou být považovány za tzv. outliery (vzorky nepatřící do souboru, ze které jsou rovnice vytvořeny), a v tomto případě by rovnice neměly být používány k provádění predikcí (González-Martín *et al.* 2011).

² Mahalanobisova vzdálenost (MV), pravděpodobnostní vzdálenost od průměru. Dá se přirovnat ke vzdálenosti od střední hodnoty jednorozměrného výběru v jednotkách sigma. Velká hodnota MV je málo pravděpodobná, a tedy podezřelá. Spolehlivější pro diagnostiku vybočujících dat je robustní MV založená na M-odhadu střední hodnoty místo průměru, která není ovlivněna vybočujícími daty. (https://www.trilobyte.cz/downloadfree/qcemanual/multivar_an.pdf)



Pozn.: LAB - standardní laboratorní metoda, NIRS - blízká infračervená spektroskopie

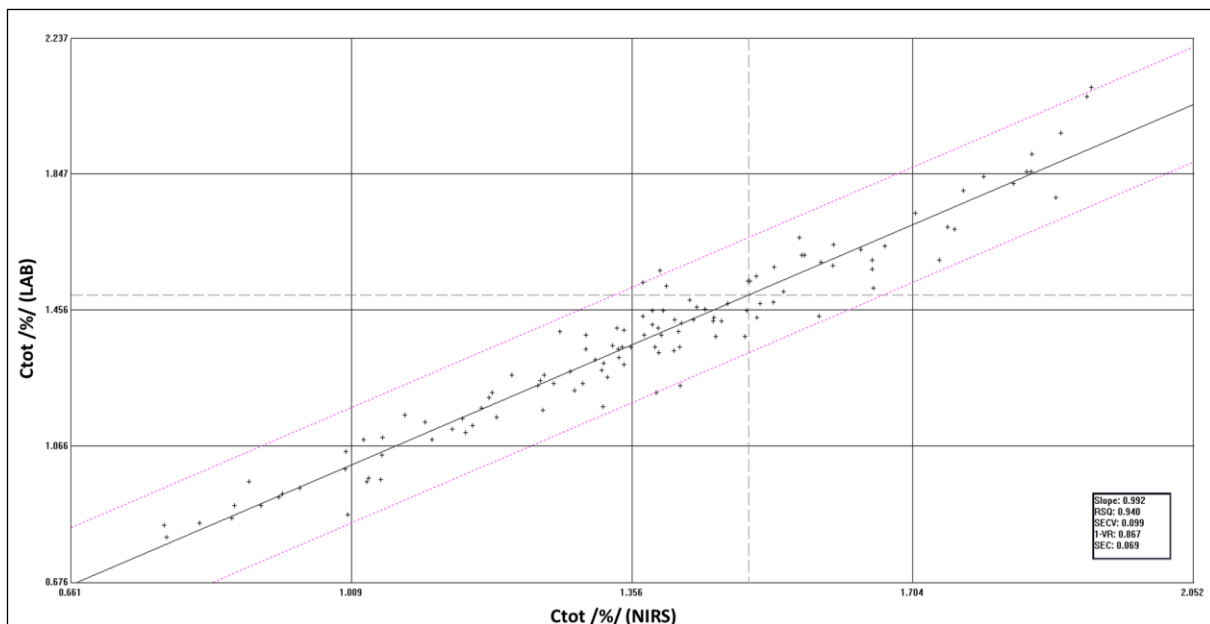
Graf 4.2. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah SOC v půdě na lokalitách VOP+DPP.



Pozn.: LAB - standardní laboratorní metoda, NIRS - blízká infračervená spektroskopie

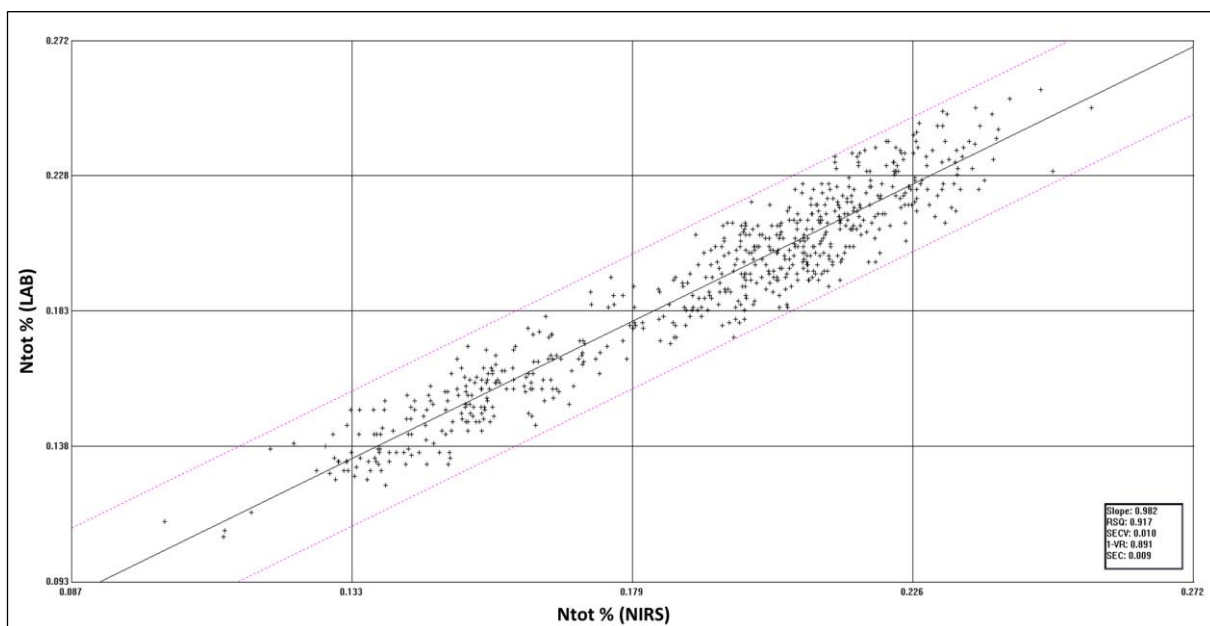
Graf 4.3. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah SOC v půdě v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny (AGROSPOL a.d., Knínice).

Dosažené výsledky přesnosti predikce vybraných parametrů kvality půdy (SOC, Ctot) ověřené na nezávislých validačních souborech (viz tab. 4.7) potvrzují předpoklad vysoké míry shody laboratorní metody se stanovením NIRS viz (tab. 4.6) a dále graf 4.1 až 4.6. Nejvyšších hodnot přesnosti predikce, vyjádřených koeficientem determinace kalibračního souboru bylo dosaženo u parametrů SOC, Ctot a Ntot na lokalitách VOP, ÚKZÚZ a v provozních pokusech AGROSPOL a.d. Knínice, což je v souladu s dosavadními poznatky o přesnosti predikce těchto parametrů u zemědělských půd viz kapitola 3 Současný stav řešení problematiky (tab. 3.1), ale i dle kategorizace kalibračních modelů podle koeficientu determinace viz tab. 4.5 (většinu sledovaných /prezentovaných/ parametrů tak můžeme zařadit do kategorie excelentní /více než 0,9/ a dále použitelný pro běžnou zemědělskou praxi).



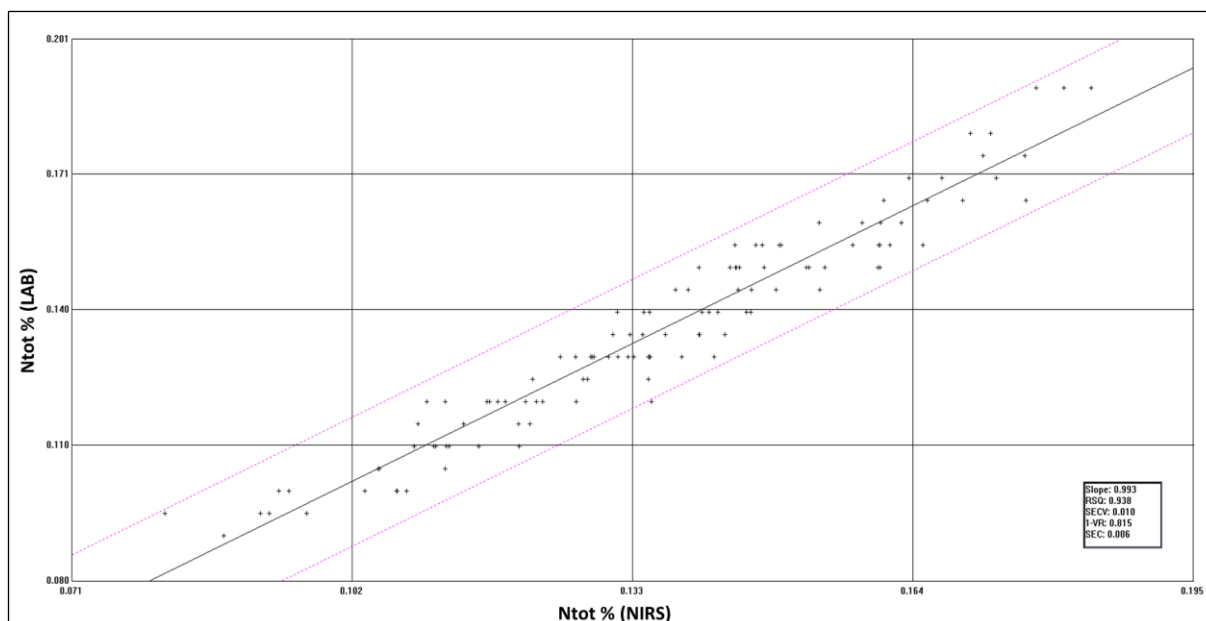
Pozn.: LAB - standardní laboratorní metoda, NIRS - blízká infračervená spektroskopie

Graf 4.4. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah Ctot v půdě na lokalitách ÚKZÚZ.



Pozn.: LAB - standardní laboratorní metoda, NIRS - blízká infračervená spektroskopie

Graf 4.5. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah Ntot v půdě na lokalitách VOP.



Pozn.: LAB - standardní laboratorní metoda, NIRS - blízká infračervená spektroskopie

Graf 4.6. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah Ntot v půdě na lokalitách ÚKZÚZ.

Frakcionace humusových látek a další parametry kvality půdy

a) Dlouhodobé výživářské pokusy a dlouhodobé pokusy CARC a poloprovozní plochy AGROSPOL a.d., Knínice

Minimální, maximální a střední hodnoty koncentrací a směrodatné odchylky chemického složení (HL, HK, FK, $Q_{4/6}$) vzorků půd měřené standardními laboratorními postupy půd v pokusech VOP, DPP a dále z oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané) a Dražanské vrchoviny prezentují *tab. 4.8 a 4.9*. Celkem bylo měřeno cca 120 a 144 vzorků, které byly rozděleny do dvou souborů (skupin), kalibrační (105 a 130 vzorků) a externí (nezávislý) validační (15 a 14 vzorků) soubor viz *tab. 4.8 a 4.9*.

Tab. 4.8. Základní popis kalibračního a validačního souboru vzorků půd dlouhodobých pokusů VOP a DPP.

Kalibrace (n = 105)	Validace (n = 15)							
	Parametr	Min.	Max.	Průměr	SD	Min.	Max.	Průměr
HL (mg.kg ⁻¹)	1,85	5,00	2,99	0,68	1,91	3,90	2,99	0,61
HK (mg.kg ⁻¹)	0,95	2,63	1,56	0,40	0,95	2,21	1,58	0,39
FK (mg.kg ⁻¹)	0,90	2,37	1,43	0,31	0,95	1,69	1,41	0,24
$Q_{4/6}$	3,92	5,45	4,43	0,38	3,89	5,23	4,32	0,42

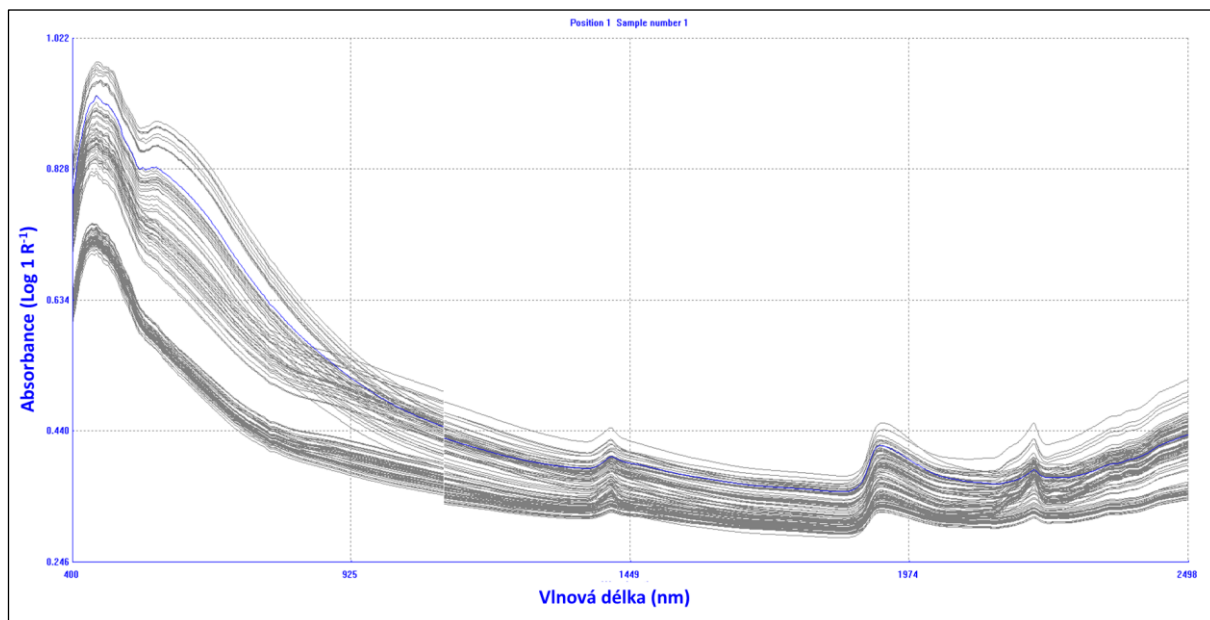
Pozn.: n - počet vzorků; SD - směrodatná odchylka; SOC - půdní organický uhlík, HL - humusové látky, HK - huminové kyseliny, FK - fulvokyseliny, $Q_{4/6}$ - barevný kvocient

Tab. 4.9. Základní popis kalibračního a validačního souboru vzorků půd provozních pokusů z oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané) a Dražanské vrchoviny (experimentální pole AGROSPOL, a.d. Knínice).

Kalibrace (n = 130)	Validace (n = 14)							
	Parametr	Min.	Max.	Průměr	SD	Min.	Max.	Průměr
HL (mg.kg ⁻¹)	1,41	10,48	5,41	2,04	1,93	8,85	5,23	2,25
HK (mg.kg ⁻¹)	1,48	6,38	3,17	1,26	1,85	5,93	3,40	1,16
FK (mg.kg ⁻¹)	1,28	7,03	2,66	0,90	1,64	4,80	2,90	0,95
$Q_{4/6}$	3,11	6,88	5,04	1,15	3,45	6,59	5,16	1,12

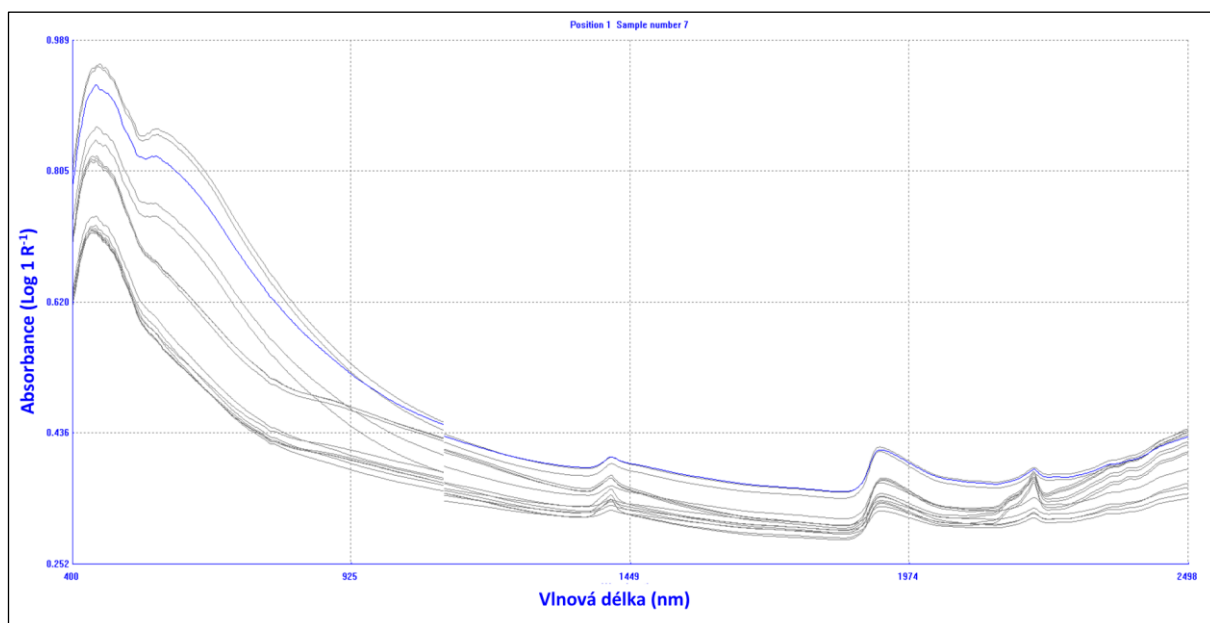
Pozn.: n - počet vzorků; SD - směrodatná odchylka; SOC - půdní organický uhlík, HL - humusové látky, HK - huminové kyseliny, FK - fulvokyseliny, $Q_{4/6}$ - barevný kvocient

Obsah humusových látek /HL/ v půdě v kalibračních souborech byl stanoven v rozpětí od 1,41 do 10,48 mg.kg⁻¹ s průměrnou hodnotou 2,99, resp. 5,41 mg.kg⁻¹. Validační (nezávislý na kalibračním) soubory jsou svými parametry obdobné kalibračním souborům. Obsah (koncentrace) u jednotlivých parametrů kvality SOM se v rámci kalibračních a validačních souborů významně od sebe neodlišují. Svými průměrnými hodnotami jsou si soubory podobné, to odpovídá správnému výběru vzorků pro kalibrační i validační soubory (validační soubory je významně menší oproti kalibračním souborům). Na grafech (grafy 4.7 až 4.10) jsou znázorněna změřená spektra vzorků půdy pro kalibrační a validační soubor. Spektra vzorků půdy v obou souborech jsou podobná (významně se od sebe neliší).



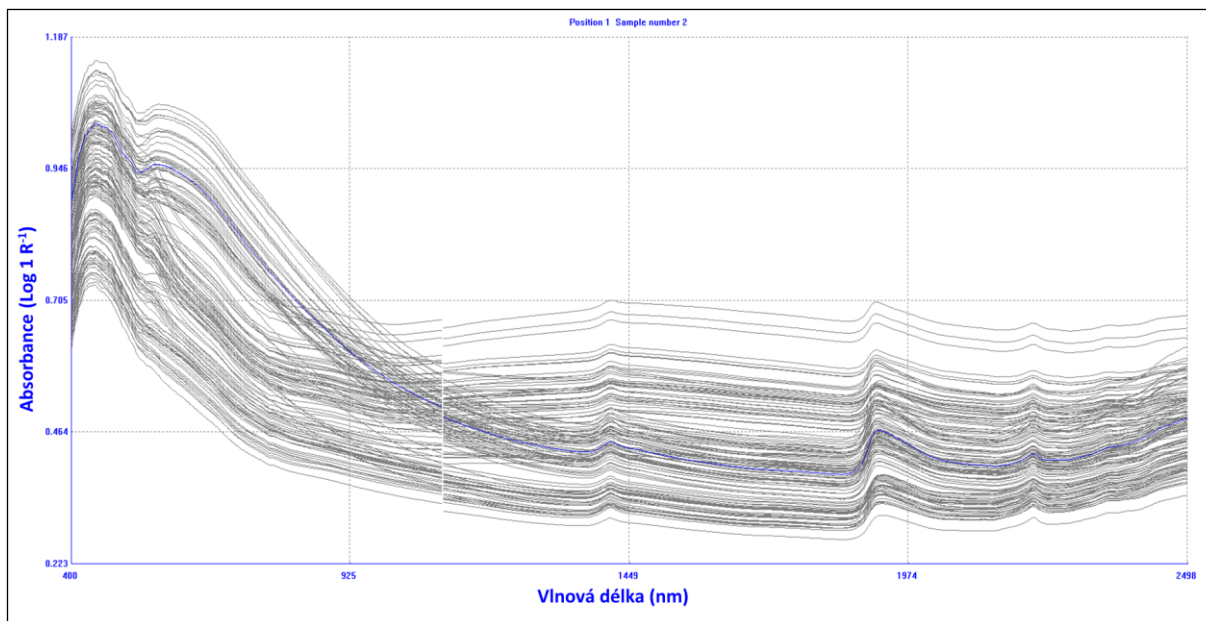
Pozn.: Hodnoty NIR spektrální absorbance ($\log(1/R)$, kde R je odrazivost) měřených vzorků půdy.

Graf 4.7. NIR spektra kalibračního souboru vzorků půd dlouhodobých pokusů VOP a DPP.



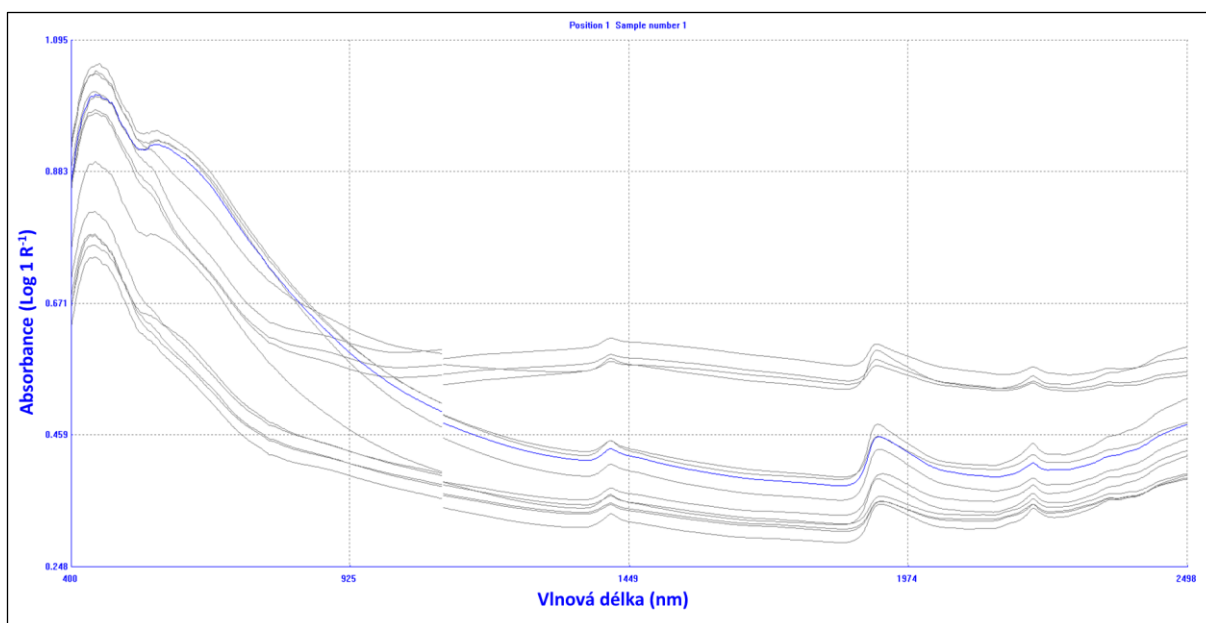
Pozn.: Hodnoty NIR spektrální absorbance ($\log(1/R)$, kde R je odrazivost) měřených vzorků půdy.

Graf 4.8. NIR spektra validačního souboru vzorků půd dlouhodobých pokusů VOP a DPP.



Pozn.: Hodnoty NIR spektrální absorbance ($\log(1/R)$, kde R je odrazivost) měřených vzorků půdy.

Graf. 4.9. NIR spektra kalibračního souboru vzorků půd provozních pokusů z oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané) a Dražanské vrchoviny (experimentální pole AGROSPOL, a.d. Knínice).



Pozn.: Hodnoty NIR spektrální absorbance ($\log(1/R)$, kde R je odrazivost) měřených vzorků půdy.

Graf. 4.10. NIR spektra validačního souboru vzorků půd provozních pokusů z oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané) a Dražanské vrchoviny (experimentální pole AGROSPOL, a.d. Knínice).

Vývoj kalibračních rovnic byl proveden na kalibračních souborech o počtu 105 resp. 130 vzorcích půdy. Před samotným vývojem kalibrací (vývoj kalibračních rovnic pro predikci parametrů) byla provedena analýza hlavních komponent (PCA). Ve všech případech byla vysvětlená spektrální variabilita vyšší než 99 %. Vývoj kalibračních rovnic byl proveden pouze se spektry vzorků a jejich chemickými parametry. Kalibrace byly prováděny s využitím všech tří metod (PCR, PLSR, MPLSR). Výsledné statistické parametry kalibrace (regrese) viz tab. 4.10 byly získány pro každý parametr (HL, HK, FK a $Q_{4/6}$) a lokalitu pomocí výpočtů za využití (1) spektrálních kritérií (H-kritérium /statistika/) nebo (2) chemických kritérií (T-kritérium/statistika/). Anomální spektra byla detekována pomocí Mahalanobisovy vzdálenosti. Riziko chyb ve vyvinutých rovnicích je v praktických podmínkách velmi nízké nebo téměř nulové, když se standardizovaná H statistika (Mahalanobisova vzdálenost) používá

při rutinní analýze neznámých vzorků (odlišné spektrum neznámého vzorku od průměrného spektra v kalibrační sadě). Vzorky s hodnotou $H > 3$ mohou být považovány za tzv. outliery (vzorky nepatřící do souboru, ze které jsou rovnice vytvořeny), a v tomto případě by rovnice neměly být používány k provádění predikcí (González-Martín *et al.* 2011).

Tab. 4.10. Kalibrace a predikce parametrů kvality půdy pomocí techniky NIRS dlouhodobých pokusů VOP, DPP a dále provozních pokusů v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny.

Parametr	Lokalita	Reg. model	n	Kalibrace			Predikce	
				Průměr	SEC	R ²	SEP	R ²
HL	VOP+DPP	MPLSR	92	2,960	0,200	0,911	0,290	0,808
	AGROSPOL	PLSR	109	5,155	0,615	0,906	0,862	0,809
HK	VOP+DPP	MPLSR	95	1,151	0,150	0,830	0,150	0,816
	AGROSPOL	MPLSR	118	2,074	0,349	0,917	0,584	0,766
FK	VOP+DPP	MPLSR	81	1,410	0,130	0,767	0,170	0,612
	AGROSPOL	MPLSR	110	2,689	0,271	0,895	0,424	0,735
Q _{4/6}	VOP+DPP	MPLSR	96	4,423	0,110	0,913	0,135	0,869
	AGROSPOL	PLSR	112	4,947	0,210	0,967	0,287	0,938

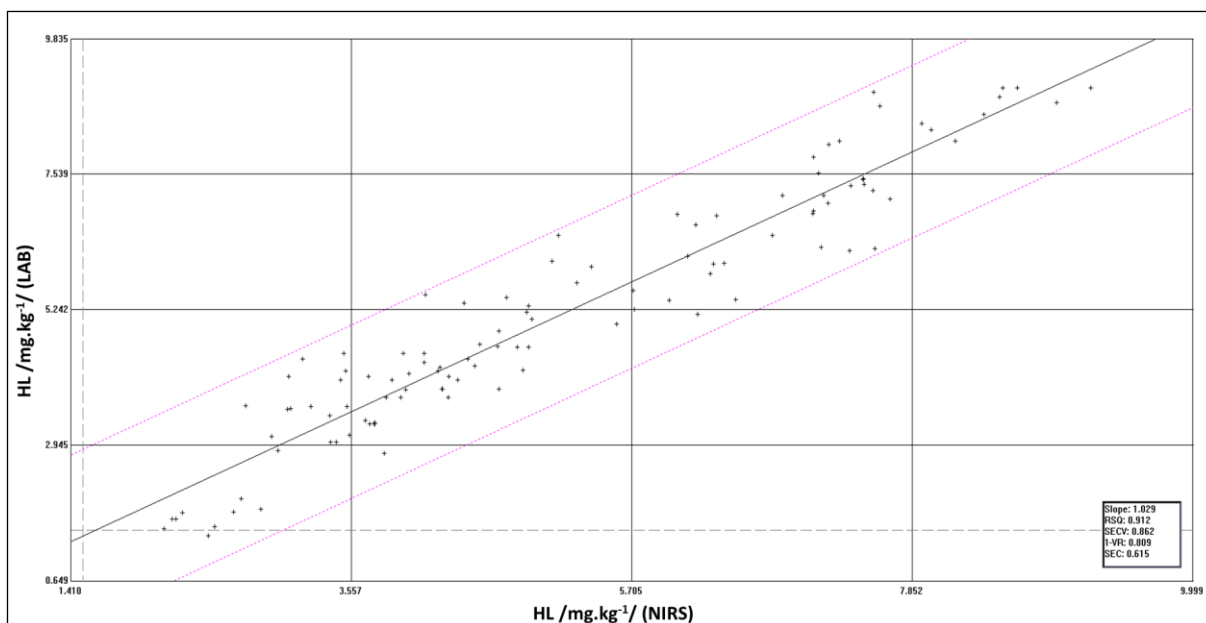
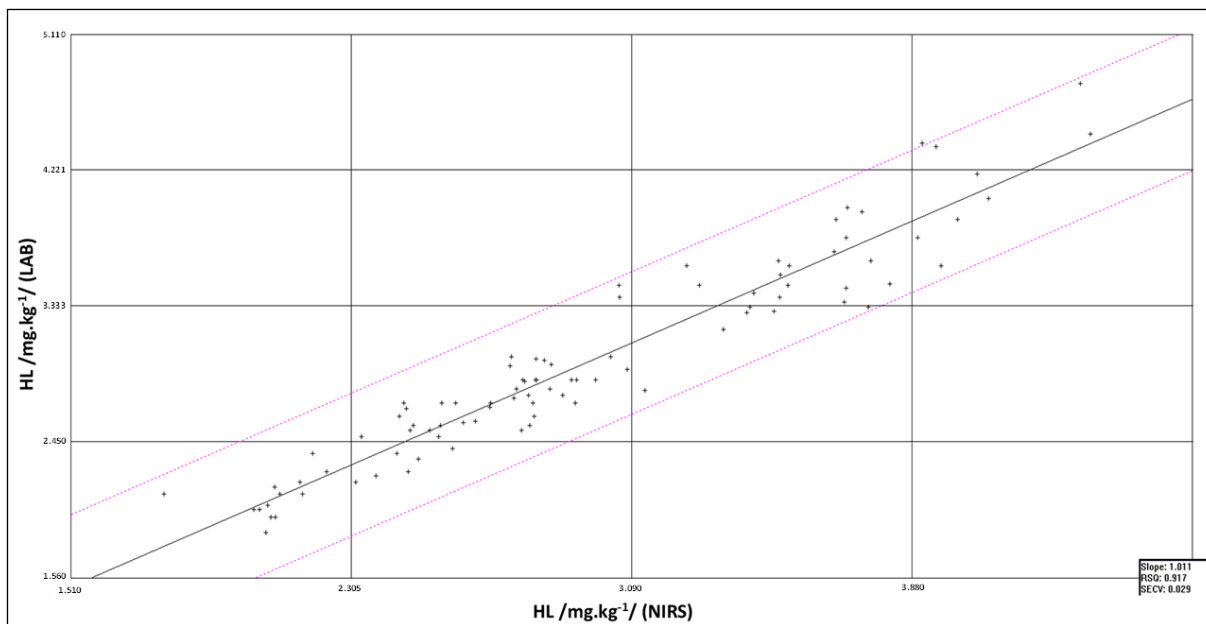
Pozn.: HL - humusové látky, HK - huminové kyseliny, FK - fulvokyseliny, Q_{4/6} - barevný kvocient; VOP+DPP - Čáslav, Lukavec, Ivanovice na Hané + Pernolec a Kostelec nad Orlicí, AGROSPOL - Boskovická brázda a Dražanská vrchovina (15 lokalit); MPLSR - modifikovaná částečných nejmenších čtverců (Modified Partial Least Squares Regression, PLSR - metoda částečných nejmenších čtverců (Partial Least Squares Regression); n - počet vzorků kalibrace, SEC - směrodatná odchylka kalibrace, SEP - směrodatná odchylka predikce, R² - koeficient determinace

Dosažené výsledky přesnosti predikcí obsahu HL, HK, FK, Q_{4/6} v půdě na lokalitách VOP+DPP a experimentálních polích zemědělského družstva AGROSPOL, a.d. Knínice ověřené na nezávislých validačních souborech vzorků shodného charakteru (n = 14 a 15) potvrzují předpoklad vysoké míry shody klasické laboratorní metody se stanovením NIRS metodou regrese MPLSR a PLSR /kalibrace: R² = 0,77 až 0,97 viz tab. 4.10/. Validace vyvinutých kalibračních rovnic měla parametry koeficientu determinace (R² = 0,78 až 0,92) viz tab. 4.11. Směrnice přímky se blíží hodnotě 1,0 (od 0,8 /Q_{4/6}/ do 1,2 /FK/). Průkazné závislosti parametrů kvality půdy jsou uvedeny na grafech (graf 4.11-4.14). Metoda PCR má nižší vypovídací hodnotu oproti metodám MPLSR a PLSR. Uvedené regresní parametry kalibračního dle dosaženého koeficientu determinace jsou u všech hodnocených parametrů v provozních pokusech excelentní (R² = 0,90 a více) a tedy použitelné pro běžnou zemědělskou praxi, resp. sledování kvality přírodního prostředí (Dvořáček, Prohasková *et al.* 2014). Nižší koeficient determinace byl zaznamenán u pokusů VOP+DPP u parametru FK (R² = 0,77) a HK (R² = 0,83).

Tab. 4.11. Validace parametrů kvality půdy pomocí techniky NIRS dlouhodobých pokusů VOP, DPP a dále provozních pokusů v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny.

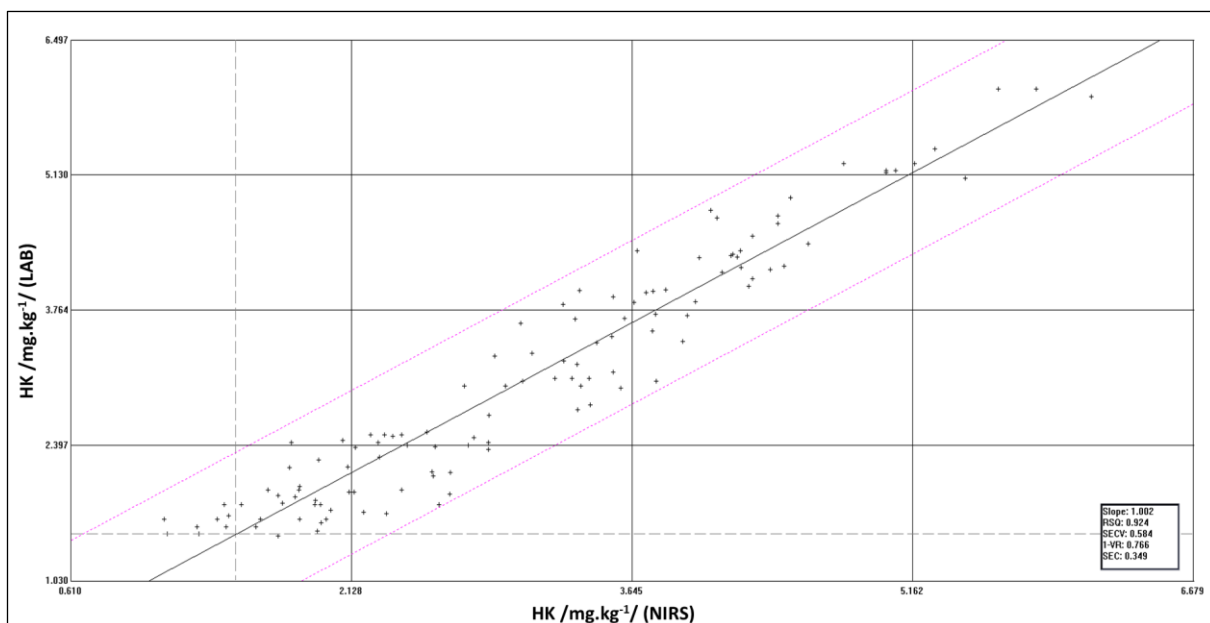
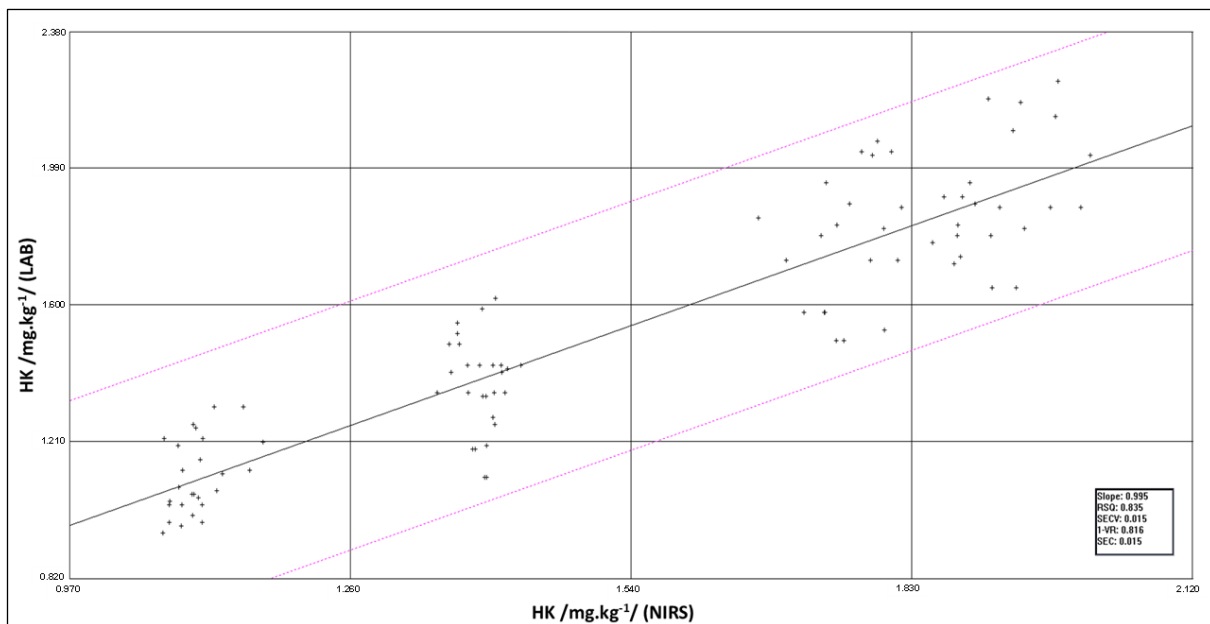
Parametr	Lokalita	n	Validace				
			SEP	SEP (C)	BIAS	SLOPE	R ²
HL	VOP+DPP	13	0,270	0,270	-0,050	0,768	0,848
	AGROSPOL	13	0,642	0,665	-0,061	1,094	0,919
HK	VOP+DPP	14	0,140	0,140	0,000	1,004	0,849
	AGROSPOL	13	0,466	0,467	-0,129	0,933	0,853
FK	VOP+DPP	13	0,130	0,120	-0,060	0,949	0,780
	AGROSPOL	14	0,446	0,451	-0,101	1,184	0,795
Q _{4/6}	VOP+DPP	14	0,165	0,157	-0,067	1,060	0,872
	AGROSPOL	12	0,371	0,380	-0,075	0,893	0,909

Pozn.: HL - humusové látky, HK - huminové kyseliny, FK - fulvokyseliny, Q_{4/6} - barevný kvocient; VOP+DPP - Čáslav, Lukavec, Ivanovice na Hané + Pernolec a Kostelec nad Orlicí, AGROSPOL - Boskovická brázda a Dražanská vrchovina (15 lokalit); n - počet vzorků validace, SEP - směrodatná odchylka predikce, SEP (C) - směrodatná odchylka predikce korigovaná konstantou kalibrační křivky (BIAS), BIAS - konstanta kalibrační křivky, SLOPE - směrnice kalibrační křivky, R² - koeficient determinace



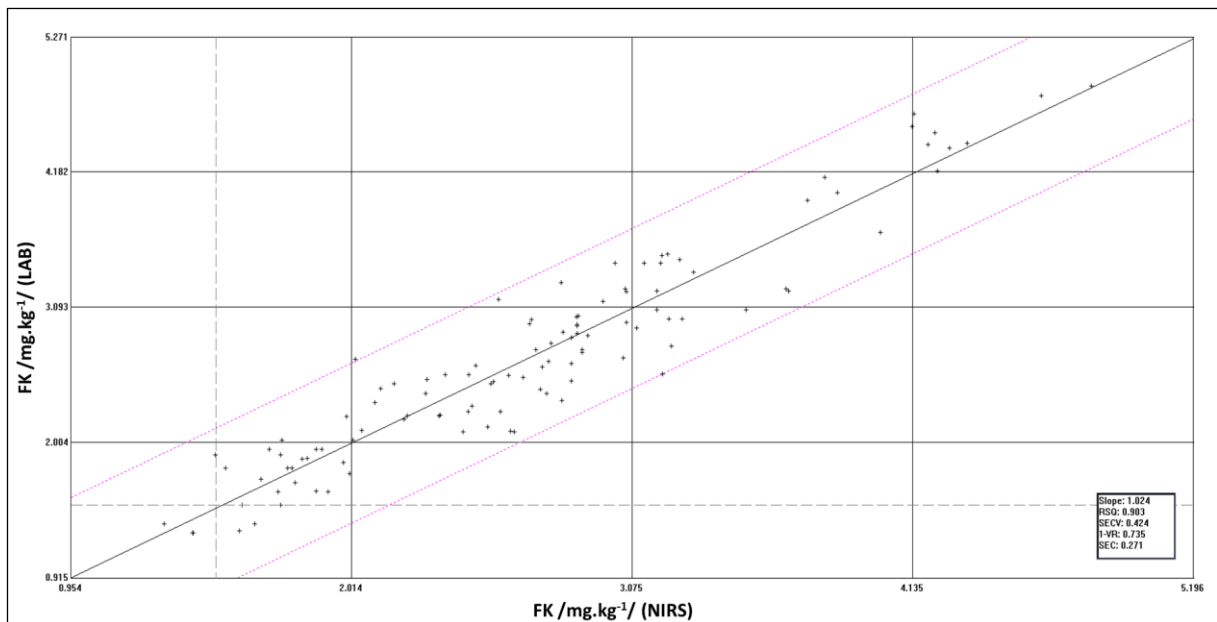
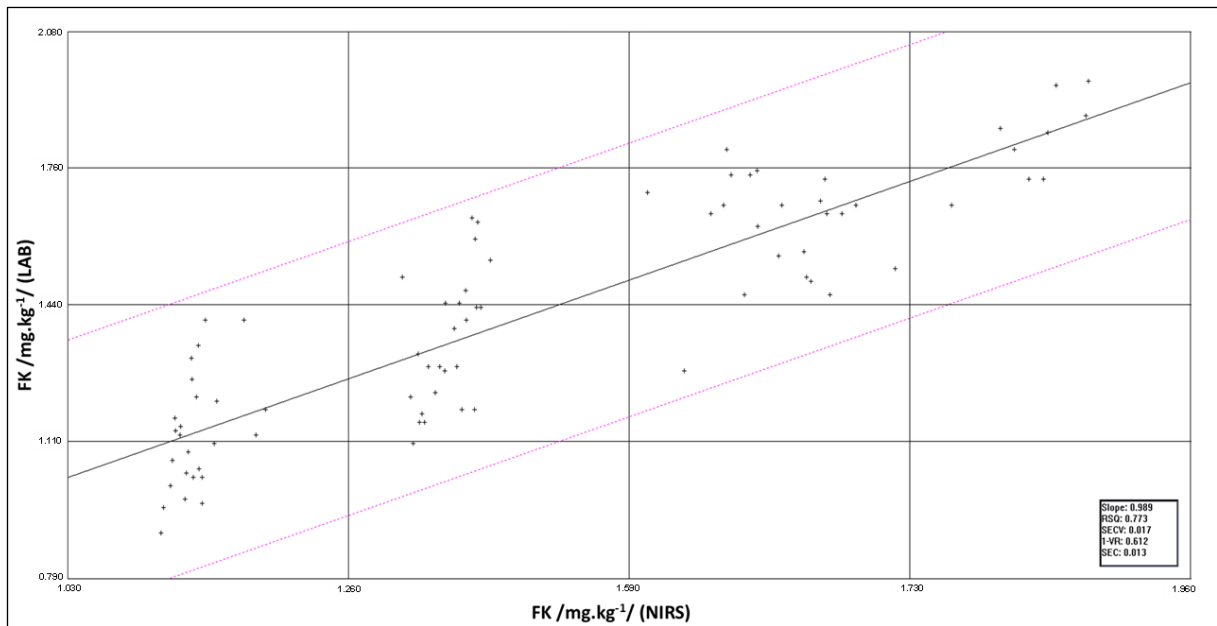
Pozn.: LAB - standardní laboratorní metoda, NIRS - blízká infračervená spektroskopie

Graf 4.11. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah HL v půdě dlouhodobých pokusů VOP, DPP (nahore) a dále provozních pokusů v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny (dole).



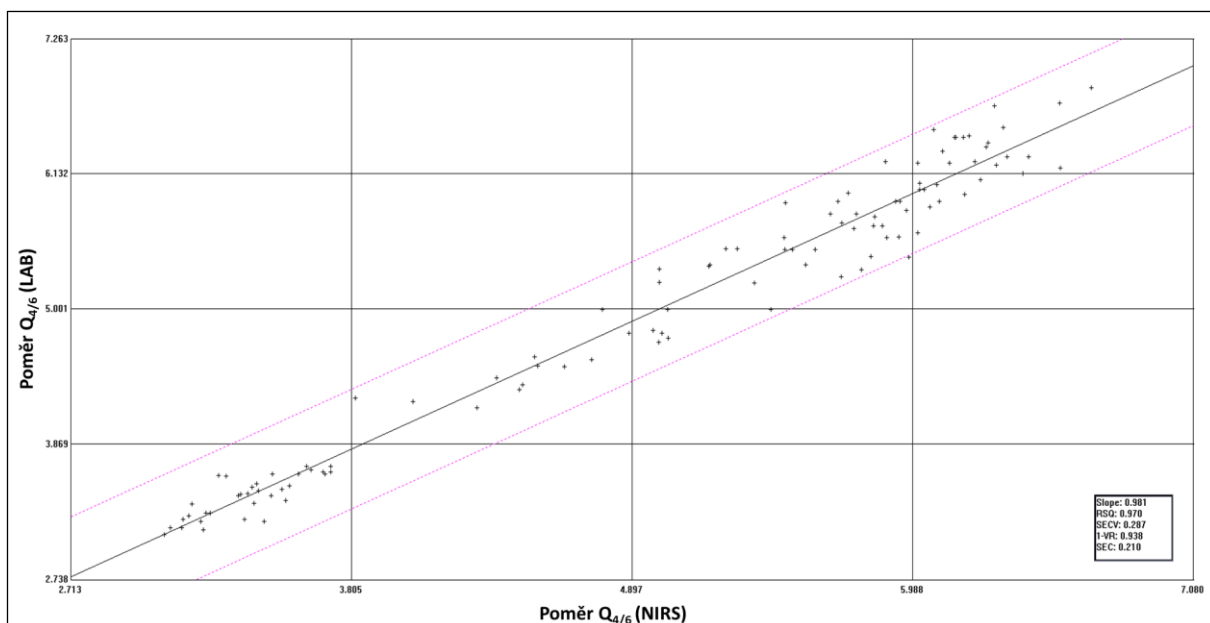
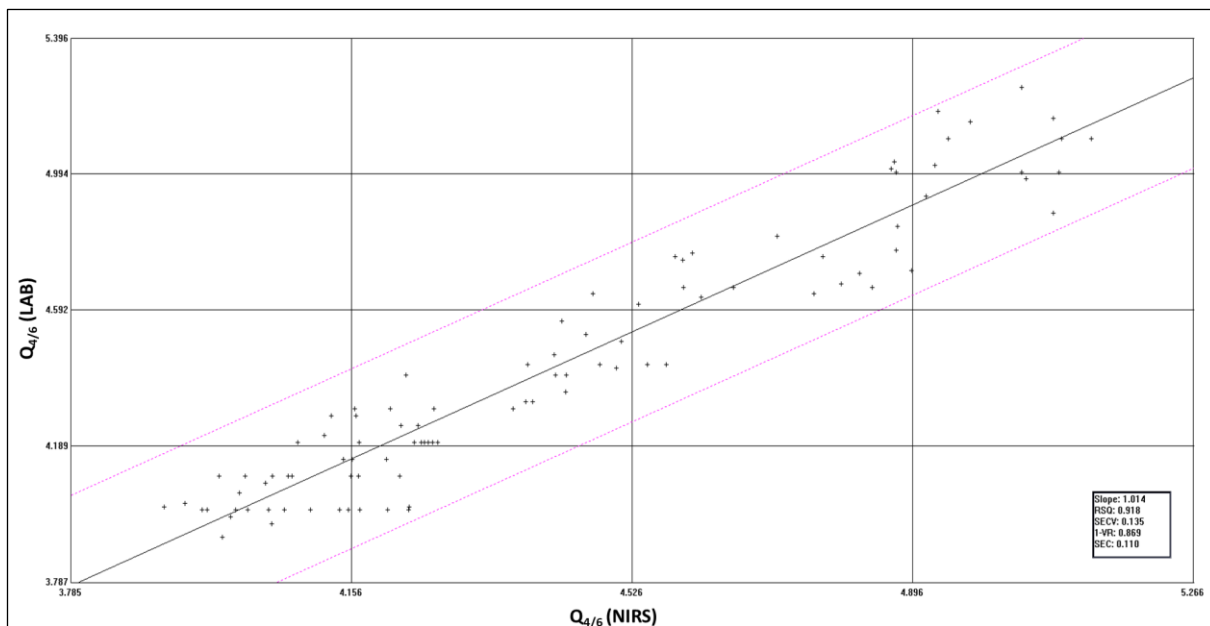
Pozn.: LAB - standardní laboratorní metoda, NIRS - blízká infračervená spektroskopie

Graf 4.12. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah HK v půdě dlouhodobých pokusů VOP, DPP (nahore) a dále provozních pokusů v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny (dole).



Pozn.: LAB - standardní laboratorní metoda, NIRS - blízká infračervená spektroskopie

Graf 4.13. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah FK v půdě dlouhodobých pokusů VOP, DPP (nahore) a dále provozních pokusů v oblasti Boskovické brázdy a Drahanové vrchoviny (dole).



Pozn.: LAB - standardní laboratorní metoda, NIRS - blízká infračervená spektroskopie

Graf 4.14. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro poměr $Q_{4/6}$ v půdě dlouhodobých pokusů VOP, DPP (nahore) a dále provozních pokusů v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny (dole).

b) Dlouhodobé pokusy ÚKZÚZ

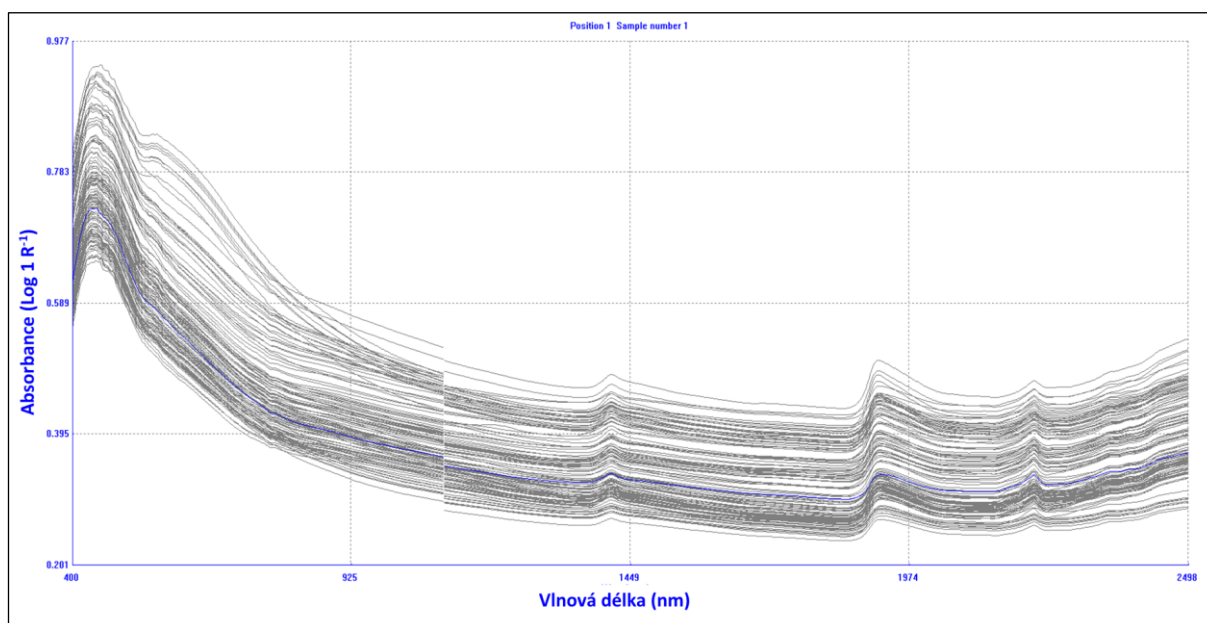
Minimální, maximální a střední hodnoty koncentrací a směrodatné odchylky chemického složení (CHS, CHA, CFA, $Q_{4/6}$, CHWC, TG a další) vzorků půd měřené standardními laboratorními postupy půd v pokusech ÚKZÚZ jsou uvedeny v tab. 4.12. Celkem bylo měřeno cca 139 vzorků, které byly rozděleny do dvou souborů (skupin), kalibrační (126 vzorků) a externí (nezávislý) validační (13 vzorků) soubor.

Obsah (koncentrace) u jednotlivých parametrů kvality SOM se v rámci kalibračních a validačních souborů významně od sebe neodlišují (validační soubor je svými parametry obdobný kalibračnímu souboru). Svými průměrnými hodnotami jsou si soubory také podobné, to odpovídá správnému výběru vzorků pro kalibrační i validační soubory (validační soubor je významně menší oproti kalibračnímu souboru). Na grafech (grafy 4.15 a 4.16) jsou uvedena měřená spektra vzorků půdy pro kalibrační a validační soubor. Spektra vzorků půdy v obou souborech jsou podobná (významně se od sebe neliší).

Tab. 4.12. Základní popis kalibračního a validačního souboru vzorků půd z dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ.

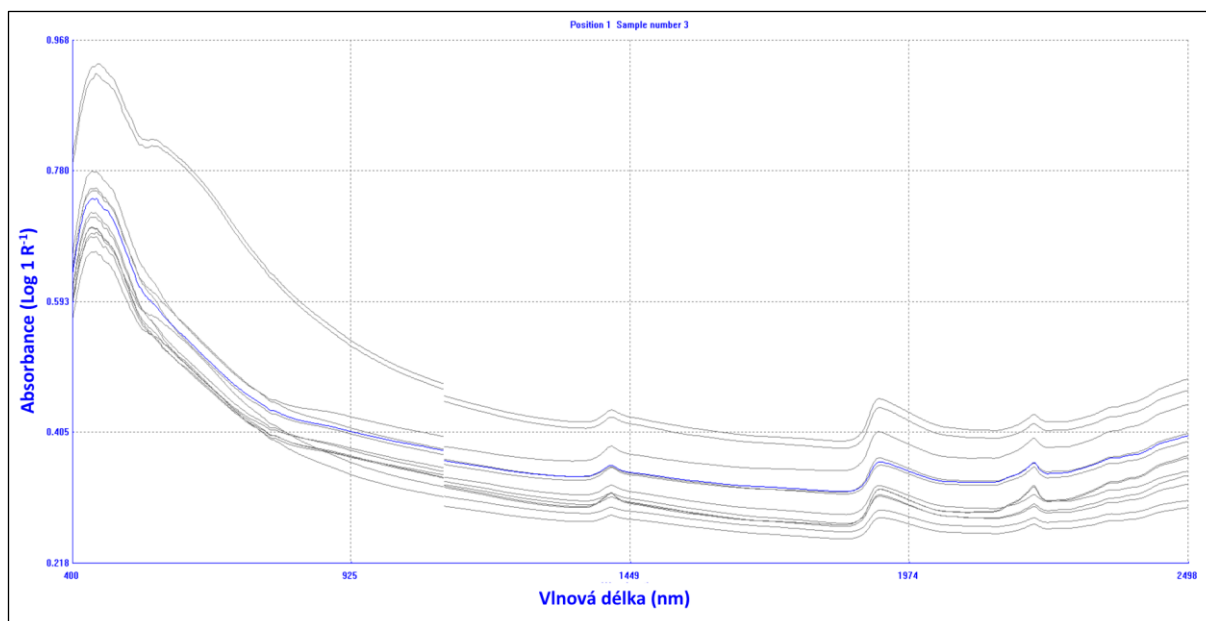
Parametr	Kalibrace (n = 126)				Validace (n = 13)			
	Min.	Max.	Průměr	SD	Min.	Max.	Průměr	SD
CHS /HL/ (%)	0,19	0,61	0,41	0,09	0,35	0,60	0,45	0,08
CHA /HK/ (%)	0,06	0,35	0,15	0,05	0,09	1,19	0,23	0,29
CFA /FK/ (%)	0,10	0,31	0,20	0,05	0,14	0,28	0,22	0,05
Q _{4/6}	4,66	8,78	6,37	1,20	4,96	8,88	6,50	1,33
CHWC (mg.kg ⁻¹)	226,50	836,60	448,23	100,72	310,70	615,30	454,44	75,10
TG (mg.kg ⁻¹)	1569,80	6080,50	2755,46	845,27	1977,00	5531,20	3031,97	1042,93
iAR	0,02	0,06	0,04	0,01	0,03	0,05	0,04	0,01
PWI	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,00

Pozn.: n - počet vzorků; SD - směrodatná odchylka; CHS (HL) - humusové látky, CHA (HK) - huminové kyseliny, CFA (FK) - fulvokyseliny, Q_{4/6} - barevný kvocient, CHWC - organický uhlík stanovený v horké vodě, TG - celkový obsah glomalinu, iAR - index aromaticity, PWI - index potenciální smáčivosti



Pozn.: Hodnoty NIR spektrální absorbance ($\log(1/R)$, kde R je odrazivost) měřených vzorků půdy.

Graf 4.15. NIR spektra kalibračního souboru vzorků půd z dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ.



Pozn.: Hodnoty NIR spektrální absorbance ($\log(1/R)$, kde R je odrazivost) měřených vzorků půdy.

Graf. 4.16. NIR spektra validačního souboru vzorků půd z dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ.

Vývoj kalibračních rovnic byl proveden na kalibračních souborech o 105 a 130 vzorcích půdy. Vysvětlená spektrální variabilita pomocí PCA byla vyšší než 90 %. Postup vývoje kalibrací (anomální spektra, hledání outlierů, vývoj kalibračních rovnic pro predikci parametrů apod.) byl obdobný jako v případě dlouhodobých pokusů VOP+DPP a provozních pokusů viz *oddíl a*). Kalibrace byly prováděny s využitím modifikované metody nejmenších čtverců (MPLSR), metody nejmenších čtverců (PLSR) i regresí hlavních komponent (PCR).

Tab. 4.13. Kalibrace a predikce parametrů kvality půdy pomocí techniky NIRS z dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ.

Parametr	Lokalita	Reg. model	n	Kalibrace			Predikce	
				Průměr	SEC	R ²	SEP	R ²
CHS /HL/		MPLSR	110	0,401	0,026	0,915	0,046	0,745
CHA /HK/		MPLSR	113	0,144	0,013	0,928	0,223	0,779
CFA /FK/		MPLSR	122	0,202	0,015	0,914	0,020	0,840
Q _{4/6}	ÚKZÚZ	MPLSR	122	6,347	0,226	0,965	0,317	0,930
CHWC		MPLSR	117	439,260	38,542	0,815	53,489	0,650
TG		MPLSR	118	2672,102	251,227	0,887	389,512	0,723
iAR		MPLSR	112	0,038	0,002	0,942	0,005	0,729
PWI		MPLSR	116	0,019	0,001	0,938	0,003	0,762

Pozn.: CHS (HL) - humusové látky, CHA (HK) - huminové kyseliny, CFA (FK) - fulvokyseliny, Q_{4/6} - barevný kvocient, CHWC - organický uhlík stanovený v horké vodě, TG - celkový obsah glomalinu, iAR - index aromaticity, PWI - index potenciální smáčivosti; ÚKZÚZ - dlouhodobé pokusy (10 lokalit); MPLSR - modifikovaná částečných nejmenších čtverců (Modified Partial Least Squares Regression, PLSR - metoda částečných nejmenších čtverců (Partial Least Squares Regression); n - počet vzorků kalibrace, SEC - směrodatná odchylka kalibrace, SEP - směrodatná odchylka predikce, R² - koeficient determinace

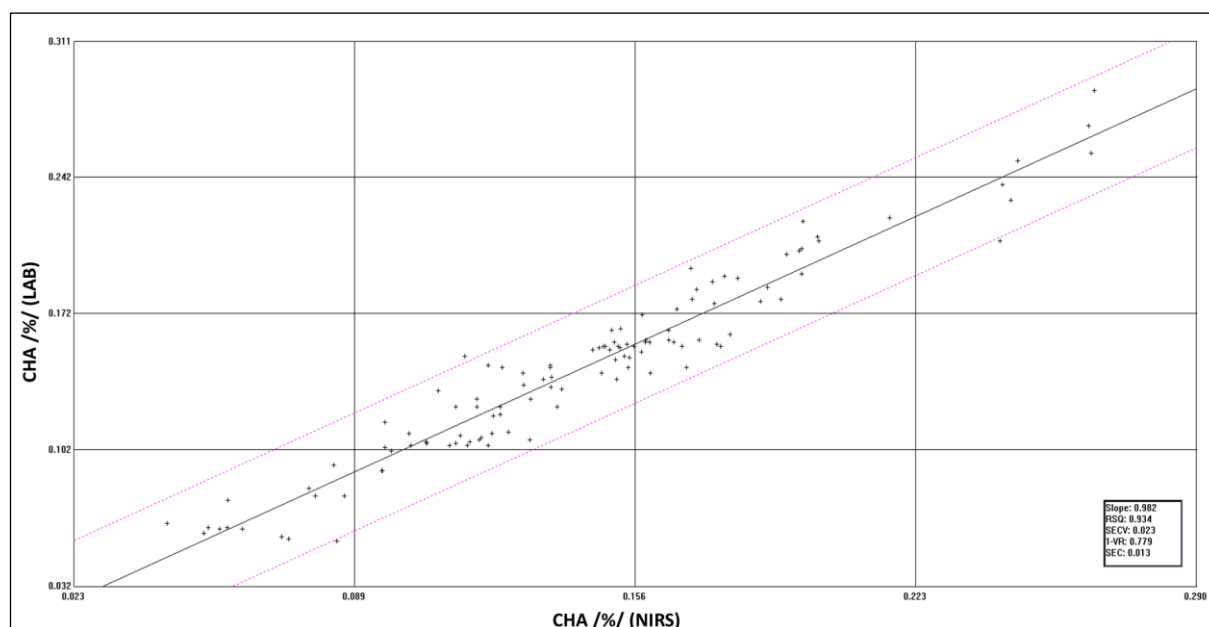
Dosažené výsledky přesnosti predikcí obsahu CHS, CHA, CFA, Q_{4/6}, CHWC, TG a dalších parametrů v půdě z dlouhodobých pokusů ověřené na nezávislých validačních souborech vzorků shodného charakteru (n = 13) potvrzují předpoklad vysoké míry shody klasické laboratorní metody se stanovením NIRS metodou regrese MPLSR /kalibrace: R² = 0,82 až 0,97 viz *tab. 4.13*/. Validace vyvinutých kalibračních rovnic měla parametry koeficientu determinace (R² = 0,74 až 0,94) viz *tab. 4.14*. Směrnice přímky se blíží hodnotě 1,0 (od 0,8 /CHA/ do 1,1 /CHWC/). Vybrané průkazné závislosti parametrů kvality půdy jsou uvedeny na grafech (*graf 4.17-4.20*). U metody PCR se potvrdila nižší vypovídací hodnot oproti metodě MPLSR, resp. PLSR. Uvedené regresní parametry kalibračního souboru dle dosaženého koeficientu determinace jsou u většiny hodnocených parametrů v dlouhodobých pokusech ÚKZÚZ excelentní (R² = 0,90 a více) a tedy použitelné pro běžnou

zemědělskou praxí, resp. sledování kvality přírodního prostředí (Dvořáček *et al.* 2014). Nižší koeficient determinace byl zaznamenán u parametru CHWC a TG ($R^2 = 0,82$ a $0,89$).

Tab. 4.14. Validace parametrů kvality půdy pomocí techniky NIRS z dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ.

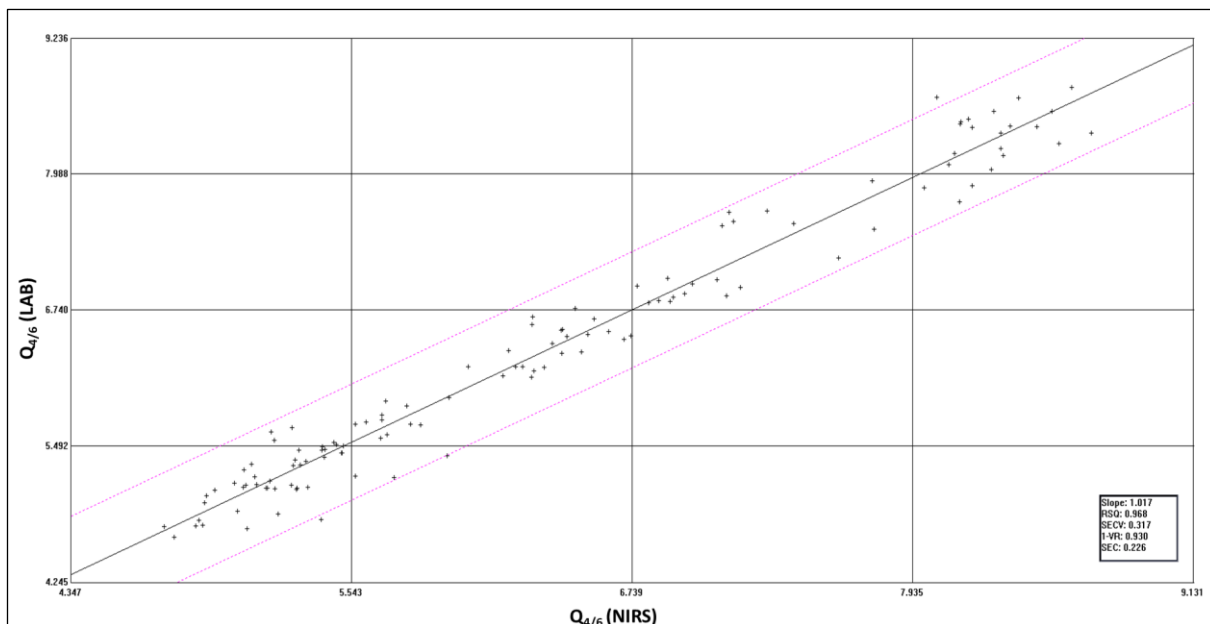
Parametr	Lokalita	n	Validace				R^2
			SEP	SEP (C)	BIAS	SLOPE	
CHS /HL/	ÚKZÚZ	10	0,031	0,031	0,009	1,054	0,827
CHA /HK/		10	0,010	0,200	0,004	0,862	0,834
CFA /FK/		11	0,016	0,017	-0,001	1,004	0,889
$Q_{4/6}$		13	0,329	0,338	-0,053	1,029	0,936
CHWC		10	47,174	30,060	37,579	1,052	0,859
TG		11	371,699	389,400	17,672	0,969	0,742
iAR		11	0,003	0,003	0,001	0,873	0,877
PWI		12	0,002	0,001	0,001	0,913	0,896

Pozn.: CHS (HL) - humusové látky, CHA (HK) - huminové kyseliny, CFA (FK) - fulvokyseliny, $Q_{4/6}$ - barevný kvocient, CHWC - organický uhlík stanovený v horké vodě, TG - celkový obsah glomalinu, iAR - index aromaticity, PWI - index potenciální smáčivosti; ÚKZÚZ - dlouhodobé pokusy (10 lokalit); n - počet vzorků validace, SEP - směrodatná odchylka predikce, SEP (C) - směrodatná odchylka predikce korigovaná konstantou kalibrační křivky (BIAS), BIAS - konstanta kalibrační křivky, SLOPE - směrnice kalibrační křivky, R^2 - koeficient determinace



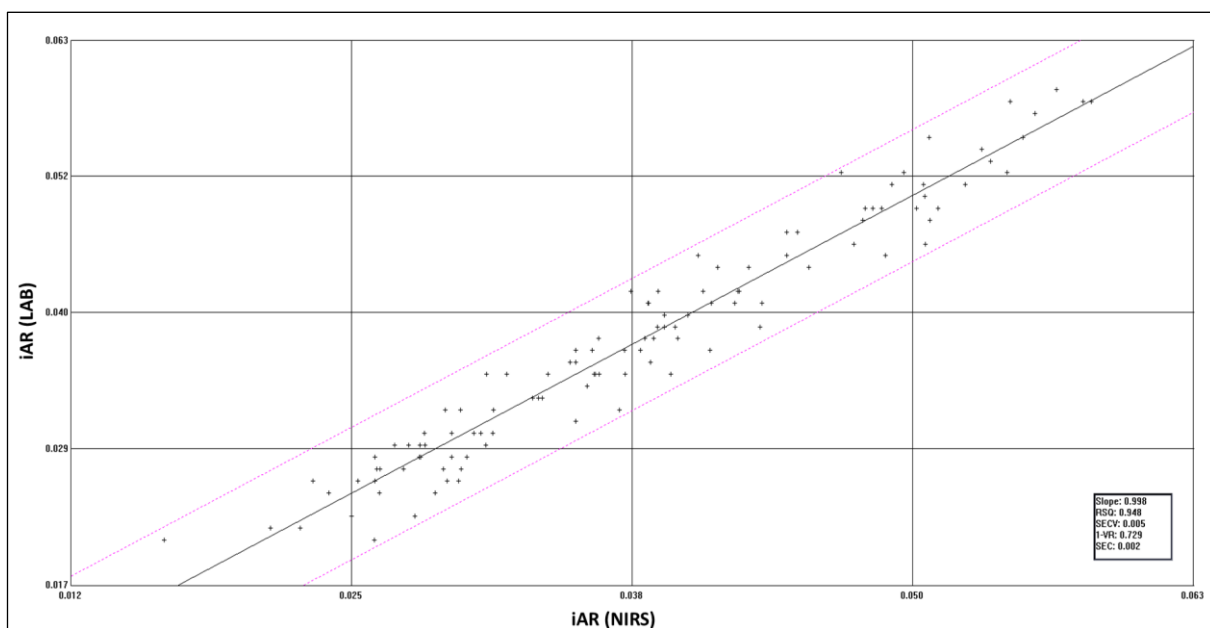
Pozn.: LAB - standardní laboratorní metoda, NIRS - blízká infračervená spektroskopie

Graf 4.17. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah CHA (HK) v půdě z dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ.



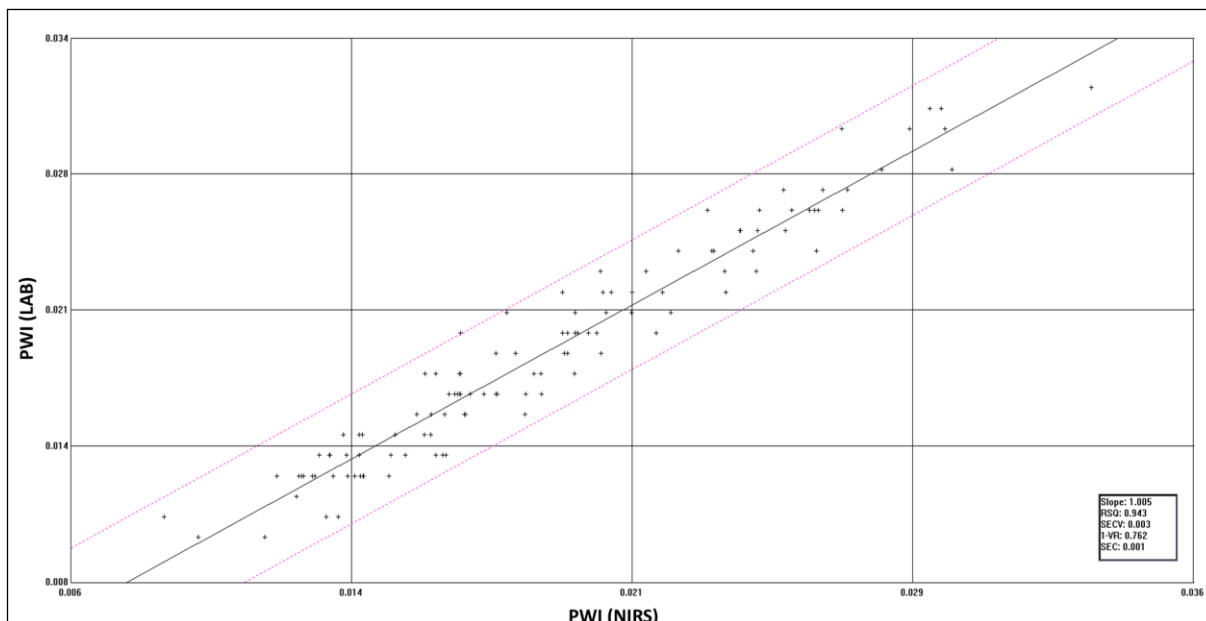
Pozn.: LAB - standardní laboratorní metoda, NIRS - blízká infračervená spektroskopie

Graf 4.18. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro poměr $Q_{4/6}$ v půdě z dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ.



Pozn.: LAB - standardní laboratorní metoda, NIRS - blízká infračervená spektroskopie

Graf 4.19. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro index aromaticity (iAR) v půdě z dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ.



Pozn.: LAB - standardní laboratorní metoda, NIRS - blízká infračervená spektroskopie

Graf 4.20. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro index potenciální smáčivosti (PWI) v půdě z dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ.

4.4. Diskuse

Půda je dynamický a stále se vyvíjející živý systém (mění se v prostoru i v čase, ale i v celé své škále) a dále představuje neobnovitelný a limitovaný zdroj (Karlen *et al.* 1997; Lal 2020b; Sharma *et al.* 2024), na kterém je člověk existenčně závislý a který plní v krajinném ekosystému nejen produkční, ale i další ekologické a sociální funkce (ČGS 2022, MŽP 2022), včetně funkce podporující život lidí (EEA 2023). Aby bylo možné v současných podmínkách obhospodařovat půdu trvale udržitelným způsobem (Smith and Powlson 2007; Pereira *et al.* 2018), a také ji v případě potřeby chránit, je zapotřebí mít a sbírat data o kvalitě a zdraví půdy (Bünemann *et al.* 2018; Lehmann *et al.* 2020; Batjes *et al.* 2024) v reálném čase (EEA 2023), za účelem analýzy hospodaření na půdě, ale i ve vztahu k probíhající globální změně klimatu /rychle se měnící podmínky prostředí/ (Lal 2011; Agovino *et al.* 2019). Protože pouze půda, která splňuje definici kvalitní a zdravé půdy (John W. Doran 2002), poskytuje veškeré své ekosystémové služby (produkční, ekologické a sociální funkce) podle svých nejlepších možností (EEA 2023).

Současné požadavky na analýzu kvality půdy ve vysokém rozlišení a s vysokou přesností, pro charakterizaci prostorové variability, je možné plnit jen analýzou (stanovením) velkého množství vzorků pro získání podrobných pokrytí dat o kvalitě a zdraví půdy (Tajik *et al.* 2020), což je časově náročné a nákladné při použití standardních (klasických) laboratorních metod (Menšík 2010; Brevik *et al.* 2016; Menšík *et al.* 2022). Proto je nutné hledat nákladově efektivní, vhodný a spolehlivý přístup (nové metody a postupy) s nižšími dopady na přírodní (životní) prostředí k odhadu kvalitativních parametrů v půdě. V tomto smyslu nově získávají důležitost moderní analýzy pomocí techniky dálkového průzkumu země (Fang *et al.* 2018; Zepp *et al.* 2021; Mouazen *et al.* 2021; Vaudour *et al.* 2022; Žížala *et al.* 2022; Kok *et al.* 2024; Bartsch *et al.* 2025), ale i laboratorní a přenosné přístroje, využívající viditelnou a blízkou infračervenou oblast elektromagnetického záření (Araújo *et al.* 2013; Recena *et al.* 2019; Aguiar *et al.* 2021; Ramarosan *et al.* 2023; Piccini *et al.* 2024; Lima *et al.* 2024; Salgado *et al.* 2025; Dai *et al.* 2025; Safanelli *et al.* 2025).

Ve světovém měřítku je viditelná a blízká infračervená spektroskopie (NIRS) již běžně využívána jako nedestruktivní, velmi rychlá, ekologicky nezávadná a levná technika pro měření a analýzu chemického složení půdy (predikce kvalitativních parametrů půdy) s vysokou přesností ve srovnání s klasickými (laboratorními) metodami mokré chemie (Taylor *et al.* 2004; Waiser *et al.* 2007; Viscarra Rossel and Behrens 2010; Viscarra Rossel and Webster 2011; Rouillon and Taylor 2016). Vis-NIR spektrometry jsou stále častěji využívány pro predikci nebo odhad půdních vlastností, ale i pro monitoring přírodního (životního) prostředí (Fystro 2002; Vågen *et al.* 2006; Gomez *et al.* 2012; Nocita

et al. 2013; An *et al.* 2014, 2015; Beltrame *et al.* 2016; Lin *et al.* 2017; Xu *et al.* 2019, 2024; Lazzaretti *et al.* 2020; Zhang and Hartemink 2020; Javadi *et al.* 2021; Clingensmith and Grunwald 2022; Gozukara, Acar, *et al.* 2022; Qingya *et al.* 2022; Xiao *et al.* 2023; Metzger *et al.* 2024; Santasup *et al.* 2024; Dai *et al.* 2025). V České republice doposud k rozvoji NIRS pro měření (zjišťování) kvalitativních parametrů půdy ve velkém měřítku, včetně praktických aplikací prozatím nedošlo (Menšík *et al.* 2022).

Podrobné znalosti dynamiky koncentrací SOM, resp. SOC a dále i humusových frakcí (HK, FK), ale i obsahu dusíku (N) v přírodním prostředí můžou pomoci porozumět tokům a výměně uhlíku, mezi atmosférou a půdním prostředím, dále sekvestrací uhlíku i přístupností živin v půdě pro rostliny (Conant *et al.* 2005; Rahul Datta *et al.* 2020; Tang *et al.* 2023; Hicks Pries *et al.* 2024).

Kalibrační rovnice pro měření obsahu SOC, Ctot, HL, HK, FK, CHWC, TG apod. v půdě pomocí blízké infračervené spektroskopie (techniky NIRS) zpracované na základě vzorků odebraných z různých oblastí ČR (dlouhodobé polní pokusy, provozní výzkumné plochy apod. viz *kap. 4.1*) dosáhly vysoké míry shody laboratorní metody se stanovením pomocí NIRS (vyjádřeno koef. determinace R^2 pro kalibraci SOC /Ctot/: $R^2 = 0,89-0,96$, Ntot: $R^2 = 0,89-0,93$; validaci SOC /Ctot/: $R^2 = 0,87-0,97$, Ntot: $R^2 = 0,83-0,95$). Dále pro frakcionaci humusových látek (HL, HK, FK): kalibrace $R^2 = 0,77-0,93$; validace $R^2 = 0,78-0,92$. U parametru barevný kvocient ($Q_{4/6}$) bylo dosaženo velmi vysoké shody s laboratorní metodou (kalibrace $R^2 = 0,91-0,97$; validace $R^2 = 0,87-0,94$) a dále i u parametrů iAR a PWI kalibrace $R^2 = 0,93-0,94$; validace $R^2 = 0,88-0,89$). Zjištěné výsledky přesnosti predikce pro SOC (Ctot), Ntot a dále HL, HK, FK, $Q_{4/6}$ dosažené v této studii, potvrzují vysokou míru shody s výsledky celé řady výzkumných prací ze současné doby, které jsou podrobně uvedeny v *kap. 3* (část *Půda a predikce parametrů obsahu a kvality SOM pomocí techniky NIRS*), kde R^2 validačních souborů pro SOC (Ctot) se pohybuje od 0,77 do 0,93. Některé další experimentální práce prezentují také příznivě vysokou přesnost predikce ($R^2 = 0,61-0,92$) pro Ctot resp. SOC se spektry Vis-NIR (Duda *et al.* 2017; Sepúlveda *et al.* 2021; Reda *et al.* 2021). Ve světové literatuře, ale můžeme najít i studie s nižšími přesnostmi pro Ctot, resp. SOC ($R^2 = 0,38$) pomocí vis-NIR spekter např. O'Rourke *et al.* (2016). Pro hodnocení frakcionace humusových látek (predikce pomocí NIRS) jsou naše výsledky plně v souladu s uvedenými výzkumnými pracemi viz podrobně (Moros *et al.* 2008; Albrecht *et al.* 2011; Menšík, Kunzová, Nerušil, Pospíšilová, *et al.* 2019; Ribeiro *et al.* 2023 a další).

Na základě výsledků dosažených v našem výzkumu a jejich porovnáním s jinými pracemi můžeme říci, že půdní organickou hmotu (SOM) v půdě lze predikovat pomocí Vis-NIR spekter /NIRS/ s přijatelně vysokou přesností. Toto tvrzení lze podpořit i dalšími publikovanými studiemi, např. Gozukara *et al.* (2022), Hong *et al.* (2022) aj. Půdní organická hmota (SOM) má přesně definovaných oblastech a vlnových délkách Vis-NIR spekter vysokou absorpční schopností díky přítomným vazbám N–H, C–H a C–O, a proto ji lze dobře predikovat pomocí Vis-NIR spekter (Bartholomeus *et al.* 2008; Viscarra Rossel and Webster 2011; Gholizadeh *et al.* 2013; Serrano *et al.* 2021). Obsah a kvalita organické hmoty výrazně ovlivňují tvar a povahu spekter odrazivosti půdy (Amin *et al.* 2020). Obecně se spektrální odrazivost snižuje s nárůstem obsahu organické hmoty (Gholizadeh *et al.* 2013). Tohoto se využívá při vývoji modelů (predikcí) pomocí vícerozměrných kalibrací (Hanrahan *et al.* 2004). V *kap. 3* (část *Půda a predikce parametrů obsahu a kvality SOM pomocí techniky NIRS*) jsou vždy u jednotlivých citací uvedeny i statistické metody použité při vývoji kalibrací pro daný parametr. Pro vývoj kalibračních rovnic, uvedených v *kap. 4. Výsledky*, byla použita především modifikovaná metoda regrese nejmenších čtverců /MPLSR/ (Cheng and Wu 2006; Jaconi *et al.* 2017; Ahmadi *et al.* 2021). V NIR spektroskopii ale existuje velké množství metod (algoritmů) vícerozměrných kalibrací, které se v případě většiny námi vyvinutých kalibrací ukazují jako vhodnější (vyšší koeficient determinace a lepší parametry směrnice přímky) oproti metodě částečné regrese nejmenších čtverců (PLSR). Tyto rozdíly jsou dány získanými rezidui NIRS, měřeními pro každou vlnovou délku, a při výpočtu každého faktoru jsou tato rezidua standardizována (dělena směrodatnou odchylkou reziduí pro každou vlnovou délku) před výpočtem další proměnné, resp. faktoru (González-Martín *et al.* 2011). To potvrzují i další obdobné studie zabývající se vývojem kalibrací pro měření SOC a Ntot pomocí NIRS (Jaconi *et al.* 2017; Recena *et al.* 2019; H V Ramarosan *et al.* 2023), které využívají metodu MPLSR. Na základě představených výsledků, můžeme přesto konstatovat, že metoda MPLSR se jeví, jako jedna z nejlepších statistických metod pro vícerozměrné kalibrace při vývoji predikcí pro SOM a další parametry kvality půdy v ČR.

4.5. Potenciál NIR analýzy a výhled

Moderní způsoby měření pomocí NIRS technologií mohou poskytovat vysoce kvalitní (dostatečně přesné) údaje o parametrech kvality půdy v zemědělských půdách v reálném čase (princip precizního zemědělství – efektivní, přesný a rychlý způsob měření), protože na základě zjištěných výsledků (viz *kap. 4.3*) lze konstatovat, že představená metoda je dostatečně přesná, pracovní bezpečná a nemá negativní vliv na přírodní (životní) prostředí (není spotřebováván žádný materiál a nevznikají žádné chemické odpady).

Praktické využití NIRS v laboratořích začalo již před více než šedesáti lety, ale stále tato metoda (technologie) představuje perspektivní trend v hodnocení půd, ale i zemědělských produktů apod. (NIR spektroskopie ještě není běžně rozšířená v zemědělských laboratořích v ČR).

Ačkoliv metodika vznikla s využitím referenčních údajů ze zájmových území s relativně menší rozlohou s omezeným počtem půdních typů, na základě probíhajícího výzkumu v národních i mezinárodních projektech můžeme předpokládat, že při rozšíření kalibračního i validačního modelu o širší spektrum vzorků různých půdních typů z celého území ČR, se bude přesnost predikce parametrů kvality půdy s aplikací vícerozměrné robustní kalibrace dále zvyšovat a bude na velmi vysoké úrovni.

5. Závěr

Blízká infračervená spektroskopie (NIRS) je moderní laboratorní metoda vhodná pro velké série měření. NIRS stanovuje složky (parametry) analyzovaného materiálu (vzorku půdy) z jednoho měření (vysušený a přesátý vzorek). NIRS analýza je sekundární instrumentální metoda, kde je o něco nižší přesnost měření ve srovnání s klasickou laboratorní (referenční) analýzou. Precizním regresním modelováním s využitím vhodných vícerozměrných kalibrací (MLR, PCR, PLSR, MPLSR) a ve světě používaných predikčních modelů (RF, SVMR, ANN apod.) včetně využití umělé inteligence (AI) lze dospět k velmi hodnotným výsledkům predikce parametrů kvality půdy (viz *kap. 3*). Kalibrační rovnice pro měření obsahu SOC, C_{tot}, HL, HK, FK, CHWC, TG apod. v půdě pomocí techniky NIRS zpracované na základě vzorků odebraných z různých oblastí ČR (dlouhodobé polní pokusy, provozní výzkumné plochy apod.) dosáhly vysoké míry shody laboratorní metody se stanovením pomocí NIRS (vyjádřeno koeficientem determinace R^2 pro kalibraci SOC /C_{tot}: $R^2 = 0,89–0,96$, N_{tot}: $R^2 = 0,89–0,93$; validaci SOC /C_{tot}: $R^2 = 0,87–0,97$, N_{tot}: $R^2 = 0,83–0,95$). Dále pro frakcionaci humusových látek (HL, HK, FK): kalibrace $R^2 = 0,77–0,93$; validace $R^2 = 0,78–0,92$. U parametru barevný kvocient ($Q_{4/6}$) bylo dosaženo velmi vysoké shody s laboratorní metodou (kalibrace $R^2 = 0,91–0,97$; validace $R^2 = 0,87–0,94$) a dále i u parametrů iAR a PWI kalibrace $R^2 = 0,93–0,94$; validace $R^2 = 0,88–0,89$) viz podrobně *kap. 4.3*. a *4.4*. Velmi významný vliv na přesnost predikce má počet vzorků (čím více vzorků stanovení, tím lepší parametry kalibrace) a dále heterogenní podmínky (druh půdy, klimatické podmínky apod.). Pro analýzu NIRS je potřebné malé množství vzorku půdy (cca 5–10 g). Výhodou je bezpečnost práce a ekologická nezávadnost měření (není spotřebováván žádný materiál a nevznikají žádné chemické odpady). Měření je dostatečně rychlé (cca 2–5 minut, podle nastavení přístroje), přesné, pracovní bezpečné, nemá negativní vliv na životní prostředí a je velmi levné.

6. Ekonomický přínos metodiky

Rozbory půdy, resp. výsledky stanovení kvalitativních znaků (parametrů) půdní organické hmoty (HL, HK, FK apod.) ve standardních, resp. referenčních laboratořích nejsou na rozdíl od predikce technikou NIR dostupné ve velmi krátké době do několika hodin max. do 1 dne (laboratorní analýza jednoho vzorku trvá v závislosti na počtu stanovených parametrů průměrně 5–8 dní). Naopak metoda NIRS má velmi krátkou dobu stanovení (cca 2–5 minuty) a poskytuje dostatečně přesné informace.

Z ekonomického pohledu je přínosem NIR spektroskopie efektivnost a rychlost prováděných měření (rozborů) při výrazném snížení ceny analýzy jednoho vzorku (velmi nízké nebo žádné náklady) na spotřební materiál. Rentabilita metody NIRS je pak tím vyšší, čím náročnější a dražší je referenční metoda laboratorního stanovení, zvláště pokud budou měřeny velké série vzorků.

Pro porovnání celkové ceny rozboru vzorků půdy pomocí referenčních metod v rozsahu výše uvedených parametrů (viz. *kap. 4*), byly použity údaje fy Laboratoř MORAVA s.r.o. (<https://www.laborator-morava.cz/>), která dané parametry stanovuje (stanovení oxidovatelného uhlíku,

humusu, případně jeho kvality /HK/FK – poměr huminových a fulvokyselin, frakcionace humusu, poměr $Q_{4/6}$). Cena jednoho takového stanovení v rozsahu pěti parametrů obsah SOC, HL, HK, FK a $Q_{4/6}$ včetně přípravy vzorku (homogenizace) a mletím (přeséváním) činí s DPH (21 %) přibližně 950–1050 Kč. Při kalkulaci ceny stanovení shodného počtu parametrů metodou NIRS, provedeného v CARC, v.v.i. byla zjištěna cena s DPH cca 350–375 Kč. To v porovnání s referenční laboratorní metodou představuje snížení nákladů na provedení rozboru ve výši cca 64–66 %.

7. Srovnání novosti postupů a uplatnění metodiky

Zemědělské praxi (prvovýrobě) jsou zpřístupňovány nejnovější poznatky, perspektivy a využití přístrojové techniky NIRS při stanovení parametrů kvality půdní organické hmoty (HL, HK, FK, $Q_{4/6}$ apod.). Metodika navazuje na certifikované/schválené metodiky zaměřené na praktické aplikace NIR spektroskopie v zemědělské praxi od autorů (Míka and Paul 1989; Míka 1997; Míka, Kohoutek *et al.* 1998; Míka, Smítal *et al.* 1998; Míka *et al.* 1999, 2008; Kunzová *et al.* 2018; Nerušil *et al.* 2018; Menšík *et al.* 2019; Menšík *et al.* 2019; Menšík and Nerušil 2021) a dále monografie (Menšík *et al.* 2022) Tato studie je zaměřena na aplikaci NIRS v oblasti hodnocení kvalitativních parametrů půdy (frakcionace humusových látek apod.). Nové, rychlé a přesné metody měření kvality půdy (např. NIRS, XRF) mají v současné době velký předpoklad, aby se uplatnily v precizním zemědělství (Zemědělství 4.0) zejména s ohledem na rychlost stanovení, přesnost i ekologickou nezávadnost měření. Metodika je určena pro zemědělské podniky (rychlé a přesné stanovení parametrů kvality půdy) hospodařících v územích s obdobnými půdně-klimatickými podmínkami, dále pro laboratoře i uživatelům v zemědělském výzkumu (včetně vysokých škol) a ve státních institucích.

8. Seznam publikací, které předcházely metodice

J_{imp} (Článek v odborném periodiku obsažený v databázi WoS)

- Pospíšilová L., Plisková J., Jaques V.A.J., Zikmund T., Sedlák L., Eichmeier A., Klement A., Kodešová R., Borůvka L., Kaiser J., Menšík L. 2024. Computed tomographic visualisation and 2D/3D microscopic evaluation of soil macro- and micromorphology. *Soil and Water Research* 19: 176–189. <https://doi.org/10.17221/47/2024-SWR>
- Hlisenkovský 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*, 13: 802. <https://doi.org/10.3390/plants13060802>
- 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>
- Menšík L., Hlisenkovský L., Nerušil P., Kunzová E. 2021. Comparison of the Concentration of Risk Elements in Alluvial Soils Determined by pXRF In Situ, in the Laboratory, and by ICP-OES. *Agronomy*, 11(5):938. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050938>
- 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>
- 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(4):779. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040779>
- Hlisenkovský 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>

J_{rec, ost} (Článek v odborném periodiku)

- Plisková J., Pospíšilová L., Nerušil P., Menšík L., Sedlák 2024. Vliv heterogenních hnojiv na půdní organickou hmotu u intenzivně obhospodařovaných travních porostů. *Úroda*. 77(12-Vědecká příloha časopisu *Úroda* 12/2024), 291–298. ISSN 0139-6013. <https://cirkular.cz/troubsko/sbornik2024.pdf>

Menšík L., Hlisnikovský L., Holík L., Nerušil P., Kunzová E. 2020. Possibilities of Determination of Risk Elements in Alluvial Agriculture Soils in the Mže and Otava River Basins by X-Ray Fluorescence Spectrometry. Agriculture (Poľnohospodárstvo), 66(1): 15–23.

B (Monografie)

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.

Menšík L., Hangen E., Kunzová E., Schilling B., Nerušil P., Hlisnikovský L., Čermák, P. 2022. Bestimmung von Kohlenstoff-, Stickstoff- und Schwermetallgehalten in Böden des böhmisch-bayerischen Grenzgebiets mittels naher Infrarot-Spektroskopie (NIRS). Monografie. Vydání: první. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., 2022. 90 stran. ISBN 978-80-7427-405-3.

Nmet (Certifiková/schválená metodika)

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.

Z_{tech} (Ověřená technologie)

Menšík L. ml., Pospíšilová L., Nerušil P., Plisková J., Kunzová E., Ryant P., Madaras M., Menšík L. st., Černý J., Balík J. 2023. Vývoj kalibračních rovnic k predikci obsahu a kvality půdní organické hmoty (SOM) pomocí NIR spektroskopie v půdách v oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané) a Dražanské vrchoviny. Ověřená technologie. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. - VS Jevíčko, 27 s.

Menšík L., Hlisnikovský L., Kunzová E., Nerušil P., Plisková J., Klír J. 2023. Moderní postupy měření parametrů kvality zemědělských půd pomocí spektroskopických (NIRS) a spektrometrických (XRF) metod. Ověřená technologie. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. - VS Jevíčko, 34 s.

Menšík L., Nerušil P., Plisková J., Kunzová E. 2023. Vývoj kalibračních rovnic k predikci půdní reakce (pH) pomocí NIRS v půdách trvalých travních porostů (TTP) v oblasti Boskovické brázdy. Ověřená technologie. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. - VS Jevíčko, 23 s.

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. Ověřená technologie. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. - VS Jevíčko, 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). Ověřená technologie. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha 6 - Ruzyně, 21 s.

Menšík L., Kunzová E., Nerušil P., Hlisnikovský L. 2019. Vývoj kalibračních rovnic k predikci obsahu uhlíku a dusíku v půdě na půdním typu hnědozem pomocí blízké infračervené spektroskopie (NIRS). Ověřená technologie. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. - VS Jevíčko, 16 s.

Konference, Workshop (M, W)

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

Ostatní výsledky (O)

Abstrakt ve sborníku s ISBN

Plisková J., Ešmír A., Pospíšilová L., Nerušil P., Menšík L. 2024. Effect of amending soil by exogenous materials on soil aggregate stability and humic substances content and quality. In: 6th International Symposium of Soil Physics, Book of Abstracts. CULS Prague, p. 35. ISBN 978-80-213-3355-0.

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 dni 2024 - Udržitelnost půdy v kontexte národních a evropských iniciativ. Zborník abstraktov. Liptovský Ján 18.–20. september 2024. Bratislava: NPPC – Výzkumný ústav pôdozvedectva a ochrany pôdy, Societas pedologica slovacica, o.z., s. 20. ISBN 978-80-8163-053-8.

- Menšík L., Šimon T., Nerušil P., Hlisnikovský L., Plisková J., Haberle J., Kunzová E., Madaras M. 2023. Moderní spektroskopické a spektrometrické metody v zemědělském výzkumu a praxi se zaměřením na půdu. In: Menšík, L., Kunzová, E., Madaras, M. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnicích 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., Hlisnikovský L., Kunzová E., Plisková J., Nerušil P., Hangen E., Schilling B. 2022. Moderní postupy měření parametrů kvality půdy (uhlík, dusík, rizikové prvky a živiny) pomocí XRF a NIRS technologií v Česko-Bavorském příhraničí. In Čermák, P., Sáňka, M., Kunzová, E., Hangen, E., Schilling, B., Eds. Dopad zemědělské činnosti na kvalitu půdy a znečištění životního prostředí kontaminanty v česko-bavorském pohraničí. Sborník abstraktů z mezinárodní konference. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha 6 - Ruzyně: Praha, s. 33–36 ISBN 978-80-7427-371-1.
- 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 brázy a Dražanské vrchoviny. In Menšík, L., Kunzová, E., Madaras, M. 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, 2022, s. 21–22. ISBN 978-80-7427-401-5.
- Menšík L., Nerušil P. 2022. Historie a současnost využití spektroskopických metod pro analýzu pícnin, krmiv a půdy na Výzkumné stanici Jevíčko. In Menšík, L., Kunzová, E., Hlisnikovský, L. 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, s. 14. ISBN 978-80-7427-383-4.
- Menšík L., Kunzová E., Nerušil P., Hlisnikovský L., Hangen E., Schilling B. 2022. Vývoj kalibračních rovnic pro rychlé a přesné měření parametrů kvality půdy pomocí NIRS v česko-bavorském příhraničí. In Menšík, L., Kunzová, E., Hlisnikovský, L. 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, s. 17. ISBN 978-80-7427-383-4.
- Menšík L., Hlisnikovský L., Kunzová E., Plisková J., Nerušil P., Hangen E., Schilling B. 2022. Moderní postupy měření parametrů kvality půdy (uhlík, dusík, rizikové prvky a živiny) pomocí XRF a NIRS technologií v česko-bavorském příhraničí. In Čermák P., Sáňka M., Kunzová E., Schilling B., Hangen E. Dopad zemědělské činnosti na kvalitu půdy a znečištění životního prostředí kontaminanty v česko-bavorském pohraničí. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha – Ruzyně. s. 33–34. ISBN 978-80-7427-371-1.

Přednášky pro praxi

- Menšík L., Kunzová E., Madaras M. 2024. Péče o půdu, úrodnost a struktura půdy, organická hmota v půdě: Kvalita a zdraví půdy (Soil Health): význam a funkce pro agroekosystémy v současných měnicích se podmínkách prostředí. Den otevřených dveří na Biofarmě Sasov, 30. září 2024, Sasov (CZ).
- Menšík L., Pospíšilová L., Kunzová E., Hlisnikovský L., Šimon T., Plisková J., Nerušil P., Klír J., Madaras M. 2023. Význam půdní organické hmoty pro udržení úrodnosti půdy „Kvantita a kvalita organické hmoty v agroekosystémech“. Školení pro poradce „Kompostování“, 15.11.2023, ÚZEI, ZERA, Náměšť nad Oslavou (CZ).
- Menšík L., Nerušil P., Pospíšilová L., Kunzová E., Hlisnikovský L., Kulhavý J. 2020. Rychlé stanovení obsahu uhlíku a humusových látek v půdě různých ekosystémů pomocí NIR spektroskopie. Přednáška na odborném semináři, 6. 3. 2020, SVŠ Valtice (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 měnicích se podmínkách prostředí – SOM (půdní organická hmota) /online/. 12. 12. 2020, Praha (CZ).

Sborník

- Menšík L., Kunzová E., Madaras M. Současné hospodaření na zemědělské půdě v měnicích 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.

Literatura

- Abdi H. 2007. Partial Least Square Regression PLS-Regression In: Salkind N, ed. *Encyclopedia of Measurement and Statistics*. Thousand Oaks, California: SAGE.

- Abdi H, Williams LJ. 2013.** Partial Least Squares Methods: Partial Least Squares Correlation and Partial Least Square Regression In: Reisfeld B, Mayeno AN, eds. *Computational Toxicology. Methods in Molecular Biology, vol 930*. Totowa, NJ: Humana Press, 549–579.
- Achard FK. 1786.** Chemische Untersuchung des Torfs (Chemical investigation of peats). *Crell's Chem Ann (in German)* **2**: 391–403.
- 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.
- Aguiar NO, Novotny EH, Oliveira AL, Rumjanek VM, Olivares FL, Canellas LP. 2013.** Prediction of humic acids bioactivity using spectroscopy and multivariate analysis. *Journal of Geochemical Exploration* **129**: 95–102.
- Aguiar MI de, Ribeiro LPD, Ramos AP Dos, Cardoso EL. 2021.** Soil characterization by near-infrared spectroscopy and principal component analysis. *REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA* **52**: 1–9.
- Ahmadi A, Emami M, Daccache A, He L. 2021.** Soil properties prediction for precision agriculture using visible and near-infrared spectroscopy: A systematic review and meta-analysis. *Agronomy* **11**.
- Aiken GR, Mcknight DM, Wershaw RL, Maccarthy P. 1985.** Humic substances in soil, sediment, and water. *Soil Science* **142**: 323.
- Albrecht R, Le Petit J, Terrom G, Périssol C. 2011.** Comparison between UV spectroscopy and nirs to assess humification process during sewage sludge and green wastes co-composting. *Bioresource Technology* **102**: 4495–4500.
- 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.
- An X, Li M, Zheng L, Liu Y, Sun H. 2014.** A portable soil nitrogen detector based on NIRS. *Precision Agriculture* **15**: 3–16.
- An X, Li M, Zheng L, Sun H. 2015.** Eliminating the interference of soil moisture and particle size on predicting soil total nitrogen content using a NIRS-based portable detector. *Computers and Electronics in Agriculture* **112**: 47–53.
- Approaches A. 2019.** Agroecological Approaches to Sustainable Intensification. *Sustainable Food and Agriculture*: 179–184.
- Araújo SR, Demattê JAM, Bellinaso H. 2013.** Analysing the effects of applying agricultural lime to soils by VNIR spectral sensing: a quantitative and quick method. *International Journal of Remote Sensing* **34**: 4570–4584.
- Ba Y, Liu J, Han J, Zhang X. 2020.** Application of Vis-NIR spectroscopy for determination the content of organic matter in saline-alkali soils. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* **229**: 117863.
- 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.
- Balontayová E, Hreško J, Petlušová V, Petluš P, Dębska 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.
- Balontayová E, Petlušová V, Petluš P, Hreško J, Koco Š. 2024.** Soil organic carbon and its labile fractions in the conditions of water erosion on arable land of Chernozems area. *Soil and Water Research* **19**: 90–99.
- Banach-Szott M, Debska B, Tobiasova E. 2021.** Properties of humic acids depending on the land use in different parts of Slovakia. *Environmental Science and Pollution Research* **28**: 58068–58080.
- Barthès BG, Brunet D, Hien E, et al. 2008.** Determining the distributions of soil carbon and nitrogen in particle size fractions using near-infrared reflectance spectrum of bulk soil samples. *Soil Biology and Biochemistry* **40**: 1533–1537.
- Barthès BG, Kouakoua E, Clairotte M, et al. 2019.** Performance comparison between a miniaturized and a conventional near infrared reflectance (NIR) spectrometer for characterizing soil carbon and nitrogen. *Geoderma* **338**: 422–429.
- Bartholomeus HM, Schaepman ME, Kooistra L, Stevens A, Hoogmoed WB, Spaargaren OSP. 2008.** Spectral reflectance based indices for soil organic carbon quantification. *Geoderma* **145**: 28–36.
- Bartsch B dos A, Rosin NA, Rosas JTF, et al. 2025.** Space-time mapping of soil organic carbon through remote sensing and machine learning. *Soil and Tillage Research* **248**: 106428.
- Batjes NH, Ceschia E, Heuvelink GBM, et al. 2024.** Towards a modular, multi-ecosystem monitoring, reporting and verification (MRV) framework for soil organic carbon stock change assessment. *Carbon Management* **15**.
- Baveye PC, Wander M. 2019.** The (bio)chemistry of soil humus and humic substances: Why is the “new view” still considered novel after more than 80 years? *Frontiers in Environmental Science* **7**: 1–6.

- Beltrame KK, Souza AM, Coelho MR, Winkler TCB, Souza WE, Valderrama P. 2016.** Soil organic carbon determination using NIRS: Evaluation of dichromate oxidation and dry combustion analysis as reference methods in multivariate calibration. *Journal of the Brazilian Chemical Society* **27**: 1527–1532.
- Ben-Dor E, Inbar Y, Chen Y. 1997.** The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400–2500 nm) during a controlled decomposition process. *Remote Sensing of Environment* **61**: 1–15.
- Bína J, Demek J. 2012.** *Z nížin do hor: geomorfologické jednotky České republiky*. Praha: Academia.
- 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.
- Bonfante A, Basile A, Bouma J. 2020.** Targeting the soil quality and soil health concepts when aiming for the United Nations Sustainable Development Goals and the EU Green Deal. *SOIL* **6**: 453–466.
- Bouma J. 2014.** Soil science contributions towards Sustainable Development Goals and their implementation: Linking soil functions with ecosystem services. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **177**: 111–120.
- Brady NC, Weil RR. 2008.** *The Nature and Properties of Soil*. Upper River, New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Brevik EC, Calzolari C, Miller BA, et al. 2016.** Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions. *Geoderma* **264**: 256–274.
- Bünemann EK, Bongiorno G, Bai Z, et al. 2018.** Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* **120**: 105–125.
- Burns DA, Ciurczak EW (Eds.). 2007.** *Handbook of Near-Infrared Analysis*. CRC Press.
- Butkute B, Šlepetiene A. 2006.** Application of near infrared reflectance spectroscopy for the assessment of soil quality in a long-term pasture. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **37**: 2389–2409.
- ČGS. 2022.** *Kontaminace, degradace a eroze půd*. Česká Geologická Služba [online]. 2022 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/extranet/vav/analyza-zranitelnosti-krajiny/kontaminace-pud>.
- Chen X, Chen HYH, Chen C, et al. 2020.** Effects of plant diversity on soil carbon in diverse ecosystems: a global meta-analysis. *Biological Reviews* **95**: 167–183.
- Cheng B, Wu X. 2006.** An modified PLSR method in prediction. *Journal of Data Science* **4**: 257–274.
- Chinilin A V., Vindeker G V., Savin IY. 2023.** Vis-NIR Spectroscopy for Soil Organic Carbon Assessment: A Meta-Analysis. *Eurasian Soil Science* **56**: 1605–1617.
- Clairotte M, Grinand C, Kouakoua E, et al. 2016.** National calibration of soil organic carbon concentration using diffuse infrared reflectance spectroscopy. *Geoderma* **276**: 41–52.
- Clingensmith CM, Grunwald S. 2022.** Predicting Soil Properties and Interpreting Vis-NIR Models from across Continental United States. *Sensors* **22**.
- Conant RT, Paustian K, Del Grosso SJ, Parton WJ. 2005.** Nitrogen pools and fluxes in grassland soils sequestering carbon. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **71**: 239–248.
- Culek M. 1995.** *Biogeografické členění České republiky*. Praha: Enigma.
- Culek M. 2013.** *Biogeografické regiony České republiky*. Brno: Masarykova univerzita.
- Dai L, Wang Z, Zhuo Z, Ma Y, Shi Z, Chen S. 2025.** Prediction of soil organic carbon fractions in tropical cropland using a regional visible and near-infrared spectral library and machine learning. *Soil and Tillage Research* **245**.
- Das B, Chakraborty D, Singh VK, et al. 2023.** Partial least square regression based machine learning models for soil organic carbon prediction using visible–near infrared spectroscopy. *Geoderma Regional* **33**: e00628.
- Davies T. 2011.** Happy 90 th Birthday to Karl Norris, Father of NIR Technology. *NIR news* **22**: 3–16.
- De Rosa D, Ballabio C, Lugato E, Faziolo 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**.
- Directorate-General for Environment Proposal. 2023.** *Directive on Soil Monitoring and Resilience*. https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-directive-soil-monitoring-and-resilience_en (2023).
- Doran J W. 2002.** Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **88**: 119–127.
- Doran John W. 2002.** Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **88**: 119–127.
- Dotto AC, Dalmolin RSD, ten Caten A, Grunwald S. 2018.** A systematic study on the application of scatter-corrective and spectral-derivative preprocessing for multivariate prediction of soil organic carbon by Vis-NIR spectra. *Geoderma* **314**: 262–274.
- 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**.
- Duda BM, Weindorf DC, Chakraborty S, et al. 2017.** Soil characterization across catenas via advanced proximal sensors. *Geoderma* **298**: 78–91.
- Dudek M, Labaz B, Kabala C. 2021.** Comparison of sequential extraction techniques and fractional composition of humic substances in chernozems and phaeozems of Poland - A review. *Soil Science Annual* **72**: 1–11.

- Dvořáček V, Prohasková A, Štočková L. 2014.** *Efektivní využití blízké infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací pro hodnocení technologických vlastností pšenice. Metodika pro praxi. Praha.*
- Ebrahimzadeh G, Yaghmaeian Mahabadi N, Khosravi Aqdam K, Asadzadeh F. 2021.** Predicting spatial distribution of soil organic matter using regression approaches at the regional scale (Eastern Azerbaijan, Iran). *Environmental Monitoring and Assessment* **193**: 615.
- EEA. 2023.** *Soil monitoring in Europe — Indicators and thresholds for soil health assessments. European Environment Agency, Luxembourg: Publications Office of the European Union. 186 p. ISBN: 978-92-9480-538-6.*
- Ellerbrock RH, Gerke HH, Bachmann J, Goebel M-O. 2005.** Composition of Organic Matter Fractions for Explaining Wettability of Three Forest Soils. *Soil Science Society of America Journal* **69**: 57.
- Fabrizi D, Chiavari G, Galletti GC. 1996.** Characterization of soil humin by pyrolysis/(methylation)-gas chromatography/mass spectrometry: structural relationships with humic acids. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **37**: 161–172.
- Fang Y, Xu L, Peng J, Wang H, Wong A, Clausi DA. 2018.** Retrieval and mapping of heavy metal concentration in soil using time series landsat 8 imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* **42**: 335–340.
- Fystro G. 2002.** The prediction of C and N content and their potential mineralisation in heterogeneous soil samples using Vis-NIR spectroscopy and comparative methods. *Plant and Soil* **246**: 139–149.
- Gannouni S, Rebai N, Abdeljaoued S. 2012.** A Spectroscopic Approach to Assess Heavy Metals Contents of the Mine Waste of Jalta and Bougrine in the North of Tunisia. *Journal of Geographic Information System* **4**: 242–253.
- Gholizadeh A, Borůvka L, Saberioon M, Vašát R. 2013.** Visible, Near-Infrared, and Mid-Infrared Spectroscopy Applications for Soil Assessment with Emphasis on Soil Organic Matter Content and Quality: State-of-the-Art and Key Issues. *Applied Spectroscopy* **67**: 1349–1362.
- Godfray HCJ, Beddington JR, Crute IR, et al. 2010.** Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science* **327**: 812–818.
- Gomez C, Lagacherie P, Coulouma G. 2012.** Regional predictions of eight common soil properties and their spatial structures from hyperspectral Vis-NIR data. *Geoderma* **189–190**: 176–185.
- Gong X, Li Y, Wang Y, Wang R, Yuan X. 2019.** Near infrared spectrometry of humic acid content in fertilizers at different levels of granularity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **227**.
- 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.
- González-Martín MI, Escuredo O, Revilla I, et al. 2015.** Determination of the mineral composition and toxic element contents of propolis by near infrared spectroscopy. *Sensors (Switzerland)* **15**: 27854–27868.
- González-Martín I, Hernández-Hierro JM, Revilla I, Vivar-Quintana A, Lobos Ortega I. 2011.** The mineral composition (Ca, P, Mg, K, Na) in cheeses (cow's, ewe's and goat's) with different ripening times using near infrared spectroscopy with a fibre-optic probe. *Food Chemistry* **127**: 147–152.
- Goydaragh MG, Taghizadeh-Mehrjardi R, Jafarzadeh AA, Triantafyllis J, Lado M. 2021.** Using environmental variables and Fourier Transform Infrared Spectroscopy to predict soil organic carbon. *CATENA* **202**: 105280.
- Gozukara G, Acar M, Ozlu E, Dengiz O, Hartemink AE, Zhang Y. 2022.** A soil quality index using Vis-NIR and pXRF spectra of a soil profile. *Catena* **211**: 105954.
- Gozukara G, Zhang Y, Hartemink AE. 2022.** Using pXRF and vis-NIR spectra for predicting properties of soils developed in loess. *Pedosphere* **32**: 602–615.
- 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.
- 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.
- Guo X, Liu H, Wu S. 2019.** Humic substances developed during organic waste composting: Formation mechanisms, structural properties, and agronomic functions. *Science of The Total Environment* **662**: 501–510.
- Han A, Lu X, Qing S, et al. 2021.** Rapid determination of low heavy metal concentrations in grassland soils around mining using Vis-NIR spectroscopy: A case study of Inner Mongolia, China. *Sensors* **21**.
- Hanrahan G, Udeh F, Patil DG. 2004.** Chemometrics and Statistics - Multivariate Calibration Techniques. *Encyclopedia of Analytical Science: Second Edition*: 27–32.
- 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.
- Hayes MHB, Mylotte R, Swift RS. 2017.** Humin In: 47–138.
- Heil K, Schmidhalter U. 2021.** An evaluation of different nir-spectral pre-treatments to derive the soil parameters c and n of a humus-clay-rich soil. *Sensors* **21**: 1–24.

- Hernández-Jiménez M, Hernández-Ramos P, Martínez-Martín I, Vivar-Quintana AM, González-Martín I, Revilla I. 2020.** Comparison of artificial neural networks and multiple regression tools applied to near infrared spectroscopy for predicting sensory properties of products from quality labels. *Microchemical Journal* **159**: 105459.
- Hicks Pries CE, Ryals R, Zhu B, et al. 2024.** The Deep Soil Organic Carbon Response to Global Change. *Annual Review of Ecology* **20**: 56.
- Hlisnikovský L, Menšík L, Čermák P, Křížová K, Kunzová E. 2022.** Long-Term Effect of Pig Slurry and Mineral Fertilizer Additions on Soil Nutrient Content, Field Pea Grain and Straw Yield under Winter Wheat–Spring Barley–Field Pea Crop Rotation on Cambisol and Luvisol. *Land* **11**: 187.
- Hlisnikovský L, Menšík L, Kunzová E. 2020.** The Development of Winter Wheat Yield and Quality under Different Fertilizer Regimes and Soil-Climatic Conditions in the Czech Republic. *Agronomy* **10**: 1160.
- Hlisnikovský L, Menšík L, Kunzová E. 2023.** Development and the Effect of Weather and Mineral Fertilization on Grain Yield and Stability of Winter Wheat following Alfalfa—Analysis of Long-Term Field Trial. *Plants* **12**: 1392.
- Hong Y, Munnaf MA, Guerrero A, et al. 2022.** Fusion of visible-to-near-infrared and mid-infrared spectroscopy to estimate soil organic carbon. *Soil and Tillage Research* **217**: 105284.
- Horta A, Malone B, Stockmann U, et al. 2015.** Potential of integrated field spectroscopy and spatial analysis for enhanced assessment of soil contamination: A prospective review. *Geoderma* **241–242**: 180–209.
- Hu Q, Thomas BW, Powlson D, et al. 2023.** Soil organic carbon fractions in response to soil, environmental and agronomic factors under cover cropping systems: A global meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **355**: 108591.
- Huang Z. 2018.** Partial least squares regression analysis to factor of influence for ecological footprint. *Cluster Computing* **5**: 1–9.
- Huck C, Bec KH (Eds.). 2020.** *Advances in Near Infrared Spectroscopy and Related Computational Methods*. MDPI.
- Iqbal MK, Shafiq T, Hussain A, Ahmed K. 2010.** Effect of enrichment on chemical properties of MSW compost. *Bioresource Technology* **101**: 5969–5977.
- Jaconi A, Don A, Freibauer A. 2017.** Prediction of soil organic carbon at the country scale: stratification strategies for near-infrared data. *European Journal of Soil Science* **68**: 919–929.
- Jansen SA, Malaty M, Nwabara S, et al. 1996.** *Structural modeling in humic acids*.
- Javadi SH, Munnaf MA, Mouazen AM. 2021.** Fusion of Vis-NIR and XRF spectra for estimation of key soil attributes. *Geoderma* **385**.
- Kabelka D, Konvalina P, Kopecný M, Klenotová E, Šíma J. 2025.** Assessment of Soil Organic Matter and Its Microbial Role in Selected Locations in the South Bohemia Region (Czech Republic). *Land* **14**.
- Kagan K, Goraj W, Kuźniar A, et al. 2024.** Exploring the Synergy between Humic Acid Substances, Dehydrogenase Activity and Soil Fertility. *Agronomy* **14**.
- 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.
- Keesstra SD, Bouma J, Wallinga J, et al. 2016.** The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations sustainable development goals. *SOIL* **2**: 111–128.
- Keesstra S, Mol G, de Leeuw J, et al. 2018.** Soil-related sustainable development goals: Four concepts to make land degradation neutrality and restoration work. *Land* **7**.
- Kleber M, Lehmann J. 2019.** Humic Substances Extracted by Alkali Are Invalid Proxies for the Dynamics and Functions of Organic Matter in Terrestrial and Aquatic Ecosystems. *Journal of Environmental Quality* **48**: 207–216.
- Ko HJ, Choi HL, Park HS, Lee HW. 2004.** Prediction of Heavy Metal Content in Compost Using Near-infrared Reflectance Spectroscopy. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* **17**: 1736–1740.
- Kok M, Sarjant S, Verweij S, Vaessen SFC, Ros GH. 2024.** On-site soil analysis: A novel approach combining NIR spectroscopy, remote sensing and deep learning. *Geoderma* **446**.
- Kononova MM. 1963.** *Organičeskoje veščestvo počvy: jeho priroda, svojstva i metody izucenija*. Moskva: AN SSSR.
- Kopecný M, Kolář L, Perná K, et al. 2022.** Fractionation of Soil Organic Matter into Labile and Stable Fractions. *Agronomy* **12**: 73.
- Kunzová E, Menšík L, Nerušil P. 2018.** Možnosti stanovení rizikových prvků v půdě v povodí řeky Eger-Ohře pomocí blízké infračervené spektroskopie (NIRS) – předběžné výsledky. In: Ilavská B, ed. *PEDOLOGICKÉ DNI 2018. Sborník abstraktů z mezinárodní vědecké konference*. Bratislava, 63.
- 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. 2011.** Soil Health and Climate Change: An Overview In: 3–24.
- Lal R. 2020a.** Soil organic matter content and crop yield. *Journal of Soil and Water Conservation* **75**: 27A LP-32A.
- Lal R. 2020b.** Managing soils for resolving the conflict between agriculture and nature: The hard talk. *European Journal of Soil Science* **71**: 1–9.
- Lal R. 2021.** Soil management for carbon sequestration. *South African Journal of Plant and Soil* **38**: 231–237.
- Lazzaretti BP, Silva LS da, Drescher GL, Dotto AC, Britzke D, Nörnberg JL. 2020.** Prediction of soil organic matter and clay contents by near-infrared spectroscopy - NIRS. *Ciência Rural* **50**: 1–8.
- 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.
- Lehmann J, Kleber M. 2015.** The contentious nature of soil organic matter. *Nature* **528**: 60–8.
- Leone AP, Viscarra-Rossel RA, Amenta P, Buondonno A. 2012.** Prediction of Soil Properties with PLSR and vis-NIR Spectroscopy: Application to Mediterranean Soils from Southern Italy. *Current Analytical Chemistry* **8**: 283–299.
- Lichtenberg E. 2024.** Thinking about soil health: A conceptual framework. *Soil Security* **14**.
- Lima BC de, Demattê JAM, Santos CH dos, et al. 2024.** The Use of Vis-NIR-SWIR Spectroscopy and X-ray Fluorescence in the Development of Predictive Models: A Step forward in the Quantification of Nitrogen, Total Organic Carbon and Humic Fractions in Ferralsols. *Remote Sensing* **16**.
- Lin ZD, Wang YB, Wang RJ, et al. 2017.** Improvements of the Vis-NIRS Model in the Prediction of Soil Organic Matter Content Using Spectral Pretreatments, Sample Selection, and Wavelength Optimization. *Journal of Applied Spectroscopy* **84**: 529–534.
- Lorenz K, Lal R. 2018.** *Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems*. Cham: Springer International Publishing.
- Luo J, Wang Y, Lou WL, Zhou XL, Tian YX. 2020.** Rapid, nondestructive and simultaneous predictions of soil content in wuling mountain area using near infrared spectroscopy. *Applied Ecology and Environmental Research* **18**: 889–899.
- Madejová J. 2003.** FTIR techniques in clay mineral studies. *Vibrational Spectroscopy* **31**: 1–10.
- De Maesschalck R, Jouan-Rimbaud D, Massart DL. 2000.** The Mahalanobis distance. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* **50**: 1–18.
- Mahalanobis PC. 1936.** On the Generalized Distance in Statistics. *Proceedings of the National Institute of Science of India* **2**: 49–55.
- 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.
- Malý S, Siebielec G. 2015.** *Testování exogenní organické hmoty pro bezpečnou aplikaci na půdu*. Brno: Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský.
- Manley M. 2014.** Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: Non-destructive analysis of biological materials. *Chemical Society Reviews* **43**: 8200–8214.
- Maršálová K. 2019.** Neurozobrazování a odhalování skrytých vzorů v heterogenních souborech dat.
- Marten G, Shenk J, Barton F. 1989.** Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS): analysis of forage quality. *U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook* **643**: 1–110.
- Martens H, Naes T. 1992.** *Multivariate calibration*. Chichester, England: John Wiley & Sons.
- Meena RS, Lal R. 2018.** Legumes and Sustainable Use of Soils In: *Legumes for Soil Health and Sustainable Management*. Singapore: Springer Singapore, 1–31.
- Meissl K, Smidt E, Schwanninger M, Tintner J. 2008.** Determination of Humic Acids Content in Composts by Means of Near- and Mid-Infrared Spectroscopy and Partial Least Squares Regression Models. *Applied Spectroscopy* **62**: 873–880.
- Melillo JM, Steudler PA, Aber JD, et al. 2002.** Soil Warming and Carbon-Cycle Feedbacks to the Climate System. *Science* **298**: 2173–2176.
- De Melo BAG, Motta FL, Santana MHA. 2016.** Humic acids: Structural properties and multiple functionalities for novel technological developments. *Materials Science and Engineering C* **62**: 967–974.
- Menšík L. 2010.** Frakcionace humusových látek lesních půd.
- Menšík L, Hlisenikovský 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, Kulhavý J. 2011.** Frakcionace humusových látek lesních půd na příkladu kambizemí v oblasti Dražanské vrchoviny In: Sobocká J, ed. *Diagnostika, klasifikácia a mapovanie pôd*. Bratislava: Výskumný ústav pôdozvedectva a ochrany pôdy, 62–70.

- 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.* Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.
- Menšík L, Kunzová E, Nerušil P, Hlisnikovský L. 2019.** *Vývoj kalibračních rovnic k predikci obsahu uhlíku a dusíku v půdě na půdním typu hnědozem pomocí blízké infračervené spektroskopie (NIRS). Ověřená technologie.* Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha 6 - Ruzyně.
- Menšík L, Kunzová E, Nerušil P, Pospíšilová L, Hlisnikovský L, Kulhavý J. 2019.** Possibilities of Determination of Soil Organic Matter content and its quality using Near Infrared Spectroscopy in different ecosystems In: Perminova I, ed. *Book of Abstracts, Fifth International Conference of CIS IHSS on Humic Innovative Technologies - Humic substances and living systems (HIT-2019).* Moscow, Russia: CIS IHSS, 47.
- Menšík L, Nerušil P. 2019.** *Production, qualitative and stand changes of permanent grassland in relation to the intensity of utilization and fertilization level in the Malá Haná region.* Praha: Crop Research Institute, Praha 6 - Ruzyně.
- 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. Ověřená technologie.* Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha 6 - Ruzyně.
- 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 Grassland Research Station Jevíčko in the Czech Republic In: *18th International Symposium Forage Conservation. Conference proceedings.* Brno: Mendel University in Brno, 190–197.
- Metzger K, Liebisch F, Herrera JM, Guillaume T, Walder F, Bragazza L. 2024.** The use of visible and near-infrared spectroscopy for in-situ characterization of agricultural soil fertility: A proposition of best practice by comparing scanning positions and spectrometers. *Soil Use and Management* **40**: 1–13.
- Míka V. 1997.** *Využití infračervené spektroskopie (NIRS) pro hodnocení kvality rostlinných výrobků.* Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací, Praha.
- Míka V, Kohoutek A, Pozdíšek J, Bartko A, Smítal F, Nerušil P. 1998.** Index of negative action of phenols (IANP) and its prediction in meadow plants using spectroscopy in near infrared region (NIRS). *Rostlinná výroba* **44**: 561–564.
- Míka V, Nerušil P, Kohoutek A. 2008.** *Spektroskopie v blízké infračervené oblasti (NIR). Výběr praktických aplikací v zemědělství.* Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha 6 - Ruzyně.
- Míka V, Paul C. 1989.** Hodnocení kvality objemné píče spektroskopii v blízké infračervené oblasti (NIRS). *Rostlinná výroba* **35**: 1109–1114.
- Míka V, Pozdíšek J, Tillmann P, Nerušil P, Buchgraber K, Gruber L. 2003.** Development of NIR calibration valid for two different grass sample collections. *Czech Journal of Animal Science* **48**: 419–424.
- Míka V, Smítal F, Nerušil P. 1998.** Prediction of botanical composition of grasslands using spectroscopy in near infrared region (NIRS). *Rostlinná výroba* **44**.
- Míka V, Smítal F, Nerušil P. 1999.** Evaluation of quality parameters in silage mais variety trials using NIRS technique In: *Maize and maize silage production.* MZLU Brno, 54–55.
- Morellos A, Pantazi X-E, Moshou D, et al. 2016.** Machine learning based prediction of soil total nitrogen, organic carbon and moisture content by using VIS-NIR spectroscopy. *Biosystems Engineering* **152**: 104–116.
- Morgan CLS, Waiser TH, Brown DJ, Hallmark CT. 2009.** Simulated in situ characterization of soil organic and inorganic carbon with visible near-infrared diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma* **151**: 249–256.
- Moros J, Herbello-Hermelo P, Moreda-Piñeiro A, Bermejo-Barrera P, Garrigues S, De La Guardia M. 2008.** Screening of humic and fulvic acids in estuarine sediments by near-infrared spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* **392**: 541–549.
- Mouazen AM, Kuang B. 2016.** On-line visible and near infrared spectroscopy for in-field phosphorous management. *Soil and Tillage Research* **155**: 471–477.
- Mouazen AM, Nyarko F, Qaswar M, Tóth G, Gobin A, Moshou D. 2021.** Spatiotemporal Prediction and Mapping of Heavy Metals at Regional Scale Using Regression Methods and Landsat 7. *Remote Sensing* **13**: 4615.
- 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**: 105469.
- Munnaf MA, Mouazen AM. 2021.** Development of a soil fertility index using on-line Vis-NIR spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture* **188**: 106341.
- Muselík J. 2012.** Aplikace blízké infračervené spektroskopie ve farmaceutické analýze. *Chemické Listy* **106**: 10–15.
- MŽP. 2022.** *Ochrana půdy. Ministerstvo životního prostředí ČR [online]. 2022 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/ochrana_pudy.*

- Nawar S, Mohamed ES, Essam-Eldeen Sayed S, Mohamed WS, Rebouh NY, Hammam AA. 2023.** Estimation of key potentially toxic elements in arid agricultural soils using Vis-NIR spectroscopy with variable selection and PLSR algorithms. *Frontiers in Environmental Science* **11**.
- Nelson DW, Sommers LE. 1996.** Total carbon, organic carbon, and organic matter In: Sparks DL *et al.*, ed. *Methods of Soil Analysis. Part 3*. 961–1010.
- Němeček J, Mühlhanselová M, Macků J, Vavříček D, Novák P. 2011.** *Taxonomický klasifikační systém půd*. Praha: ČZU v Praze.
- Neružil P, Menšík L, Jambor V. 2016.** *Využití blízké infračervené spektroskopie ke stanovení výživné hodnoty hybridů kukuřice, určených k výrobě kukuřičné siláže*. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha – Ruzyně.
- Neružil P, Menšík L, Jambor V. 2018.** *Vývoj kalibračních rovnic k predikci parametrů výživné hodnoty konzervované kukuřičné siláže pomocí techniky NIRS*. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha 6 - Ruzyně.
- Ng W, Minasny B, Jeon SH, McBratney A. 2022.** Mid-infrared spectroscopy for accurate measurement of an extensive set of soil properties for assessing soil functions. *Soil Security* **6**: 100043.
- Nocita M, Stevens A, Noon C, van Wesemael B. 2013.** Prediction of soil organic carbon for different levels of soil moisture using Vis-NIR spectroscopy. *Geoderma* **199**: 37–42.
- Nocita M, Stevens A, Toth G, Panagos P, van Wesemael B, Montanarella L. 2014.** Prediction of soil organic carbon content by diffuse reflectance spectroscopy using a local partial least square regression approach. *Soil Biology and Biochemistry* **68**: 337–347.
- Nocita M, Stevens A, van Wesemael B, et al. 2015.** Soil Spectroscopy: An Alternative to Wet Chemistry for Soil Monitoring In: *Advances in Agronomy*. 139–159.
- Norris KH. 1992.** Early History of near Infrared for Agricultural Applications. *NIR news* **3**: 12–13.
- Olk DC, Bloom PR, De Nobili M, et al. 2019.** Using Humic Fractions to Understand Natural Organic Matter Processes in Soil and Water: Selected Studies and Applications. *Journal of Environmental Quality* **48**: 1633–1643.
- O'Rourke SM, Minasny B, Holden NM, McBratney AB. 2016.** Synergistic Use of Vis-NIR, MIR, and XRF Spectroscopy for the Determination of Soil Geochemistry. *Soil Science Society of America Journal* **80**: 888–899.
- Ouni Y, Ghnaya T, Montemurro F, Abdelly C, Lakhdar A. 2014.** The role of humic substances in mitigating the harmful effects of soil salinity and improve plant productivity. *International Journal of Plant Production* **8**: 353–374.
- Ozaki Y, Huck C, Tsuchikawa S, Engelsens SB (Eds.). 2021.** *Near-Infrared Spectroscopy*. Singapore: Springer Singapore.
- Panagos P, Borrelli P, Jones A, Robinson DA. 2024.** A 1 billion euro mission: A Soil Deal for Europe. *European Journal of Soil Science* **75**.
- Peng W, Berry EM. 2019.** The Concept of Food Security In: *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*. Elsevier, 1–7.
- Pereira P, Bogunovic I, Muñoz-Rojas M, Brevik EC. 2018.** Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science & Health* **5**: 7–13.
- Piccini C, Metzger K, Debaene G, et al. 2024.** In-field soil spectroscopy in Vis–NIR range for fast and reliable soil analysis: A review. *European Journal of Soil Science* **75**.
- Piccolo A. 1996.** Humus and Soil Conservation In: Piccolo A, ed. *Humic Substances in Terrestrial Ecosystems*. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 225–264.
- Piccolo A. 2001.** THE SUPRAMOLECULAR STRUCTURE OF HUMIC SUBSTANCES. *Soil Science* **166**: 810–832.
- 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.
- Pirouz DM. 2006.** An Overview of Partial Least Squares. *SSRN Electronic Journal*.
- Pirouz DM. 2012.** An Overview of Partial Least Squares. *SSRN Electronic Journal*: 1–16.
- Pospíšilová E, Tesařová M. 2009.** *Organický uhlík obhospodařovaných půd*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- Pospíšilová L, Vlček V, Hybler V, Hábová M, Jandák J. 2016.** *Standard analytical methods and evaluation criteria of soil physical, agrochemical, biological and hygienic parameters*. Brno: Mendel University in Brno: Folia Universitatis Agriculturae at Silviculturae Mendelianae Brunensis.
- 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.
- Pudělko A, Chodak M. 2020.** Estimation of total nitrogen and organic carbon contents in mine soils with NIR reflectance spectroscopy and various chemometric methods. *Geoderma* **368**.

- Qi M, Chen S, Wei Y, et al. 2024.** Using visible-near infrared spectroscopy to estimate whole-profile soil organic carbon and its fractions. *Soil and Environmental Health* **2**.
- Qingya W, Li F, Jiang X, et al. 2022.** Quantitative analysis of soil cadmium content based on the fusion of XRF and Vis-NIR data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* **226**: 104578.
- Quitt E. 1971.** *Klimatické oblasti Československa*. Brno: GgÚ ČSAV.
- Rahul Datta, Ram Swaroop Meena, Shamina Imran Pathan, Maria Teresa Ceccherini. 2020.** *Carbon and Nitrogen Cycling in Soil*. Singapore: Springer Singapore.
- Ramaroson H V., Becquer T, Razafimahatratra H, Razakavololona A, Rabeharisoa L, Rakotondrazafy AFM. 2023.** Prediction of Phosphorus Sorption Index and Availability by NIR and MIR in Soils in Madagascar. *Land* **12**.
- Ramirez-Lopez L, Behrens T, Schmidt K, Stevens A, Demattê JAM, Scholten T. 2013.** The spectrum-based learner: A new local approach for modeling soil vis-NIR spectra of complex datasets. *Geoderma* **195–196**: 268–279.
- 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.
- Recena R, Fernández-Cabanás VM, Delgado A. 2019.** Soil fertility assessment by Vis-NIR spectroscopy: Predicting soil functioning rather than availability indices. *Geoderma* **337**: 368–374.
- Reda R, Saffaj T, Derrouz H, et al. 2021.** Comparing CalReg performance with other multivariate methods for estimating selected soil properties from Moroccan agricultural regions using NIR spectroscopy. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* **211**.
- Reddy SB, Nagaraja MS, Raj TSP, Dhumgond P, Vignesh NS. 2012.** Soil Humic and Fulvic Acid Fractions Under Different Land Use Systems. **99**: 507–510.
- Ribeiro SG, de Oliveira MRR, Lopes LM, et al. 2023.** Reflectance spectroscopy in the prediction of soil organic carbon associated with humic substances. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* **47**: 1–22.
- Rice JA. 2001.** HUMIN. *Soil Science* **166**.
- 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.
- Rockström J, Williams J, Daily G, et al. 2017.** Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio* **46**: 4–17.
- Van Roon P, Zakizadeh J, Chartier S. 2014.** Partial Least Squares tutorial for analyzing neuroimaging data. *The Quantitative Methods for Psychology* **10**: 200–215.
- Rossel RAV, Behrens T. 2010.** Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma* **158**: 46–54.
- Rouillon M, Taylor MP. 2016.** Can field portable X-ray fluorescence (pXRF) produce high quality data for application in environmental contamination research? *Environmental Pollution* **214**: 255–264.
- Rouliá M. 2024.** Humic Substances: Importance for Agriculture, Affinity and Interactions with Soil Amendments and Pollutants. *Agronomy* **14**.
- Rusmayandi G, Indriyani, Hertini ES, Harahap MAK, Nugroho RJ. 2023.** Climate Change, Agricultural Production, Food Security, and Livelihoods of Rural Communities in Rural Districts: A Qualitative Approach. *West Science Interdisciplinary Studies* **1**: 9–17.
- Safanelli JL, Hengl T, Parente LL, et al. 2025.** Open Soil Spectral Library (OSSL): Building reproducible soil calibration models through open development and community engagement (B Das, Ed.). *PLOS ONE* **20**: e0296545.
- Salgado L, Forján R, Rodríguez-Pérez JR, et al. 2025.** Soil Organic Carbon Fractionation Assessment in Areas with High Fire Activity Using Diffuse Spectroscopy and Tree-Based Machine Learning Algorithms. *Earth Systems and Environment*.
- Santasup N, Theanjumpol P, Santasup C, et al. 2024.** Development of near-infrared spectroscopy (NIRS) for estimating organic matter, total carbon, and total nitrogen in agricultural soil. *MethodsX* **13**.
- Schellekens J, Buurman P, Kalbitz K, et al. 2017.** Molecular Features of Humic Acids and Fulvic Acids from Contrasting Environments. *Environmental Science and Technology* **51**: 1330–1339.
- Schnitzer M, Monreal CM. 2011.** Quo Vadis Soil Organic Matter Research? A Biological Link to the Chemistry of Humification In: 143–217.
- Sedlář 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**.
- Sepúlveda M de los Á, Hidalgo M, Araya J, et al. 2021.** Near-infrared spectroscopy: Alternative method for assessment of stable carbon isotopes in various soil profiles in Chile. *Geoderma Regional* **25**.
- Serrano J, Shahidian S, da Silva JM, et al. 2021.** Evaluation of near infrared spectroscopy (Nirs) for estimating soil organic matter and phosphorus in mediterranean montado ecosystem. *Sustainability (Switzerland)* **13**: 1–16.

- Shahrayini E, Shafizadeh-Moghadam H, Noroozi AliA, Eghbal MK. 2022.** Multiple-depth modeling of soil organic carbon using visible–near infrared spectroscopy. *Geocarto International* **37**: 1393–1407.
- Sharma Pooja, Sharma Parul, Thakur N. 2024.** Sustainable farming practices and soil health: a pathway to achieving SDGs and future prospects. *Discover Sustainability* **5**.
- Shi Z, Ji W, Viscarra Rossel RA, Chen S, Zhou Y. 2015.** Prediction of soil organic matter using a spatially constrained local partial least squares regression and the Chinese vis-NIR spectral library. *European Journal of Soil Science* **66**: 679–687.
- 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.
- Siesler HW, Ozaki Y, Kawata S, Heise HM (Eds.). 2001.** *Near-Infrared Spectroscopy*. Wiley.
- Siesler HW, Ozaki Y, Kawata S, Heise HM (Eds.). 2002.** *Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH.
- Simpson AJ, McNally DJ, Simpson MJ. 2011.** NMR spectroscopy in environmental research: From molecular interactions to global processes. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy* **58**: 97–175.
- Sims JR, Haby VA. 1971.** Simplified colorimetric determination of soil organic matter. *Soil Science* **112**: 137–141.
- Skokanová M, Dercová K. 2008.** Humínové kyseliny. Pôvod a štruktúra. *Chemické listy* **102**: 262–268.
- Skybová M. 2006.** Humínové kyseliny - prínos pre environmentálny výskum. *Acta Montanistica Slovaca* **11**: 362–366.
- Smith P, Powlson DS. 2007.** Sustainability of Soil Management Practices - a Global Perspective In: *Soil Biological Fertility*. Dordrecht: Springer Netherlands, 241–254.
- Song G, Hayes MHB, Novotny EH, Simpson AJ. 2011.** Isolation and fractionation of soil humin using alkaline urea and dimethylsulphoxide plus sulphuric acid. *Naturwissenschaften* **98**: 7–13.
- Soriano-Disla JM, Janik LJ, Viscarra Rossel RA, Macdonald LM, McLaughlin MJ. 2014.** The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties. *Applied Spectroscopy Reviews* **49**: 139–186.
- Sotáková S. 1982.** *Organická hnota a úrodnosť pôdy*. Bratislava: Príroda 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**: 1–12.
- Stenberg B. 2010.** Effects of soil sample pretreatments and standardised rewetting as interacted with sand classes on Vis-NIR predictions of clay and soil organic carbon. *Geoderma* **158**: 15–22.
- Stenberg B, Viscarra Rossel RA, Mouazen AM, Wetterlind J. 2010.** Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science In: *Advances in Agronomy*. Elsevier Inc, 163–215.
- Štěpánová M. 2010.** Mapy podnebí Česka v prostředí Google maps.
- Stevens A, Nocita M, Tóth G, Montanarella L, van Wesemael B. 2013.** Prediction of Soil Organic Carbon at the European Scale by Visible and Near InfraRed Reflectance Spectroscopy. *PLoS ONE* **8**: e66409.
- Stevenson FJ. 1994.** *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. John Wiley and Sons.
- Sutton R, Sposito G. 2005.** Critical Review Molecular Structure in Soil Humic Substances: The New View. *Environmental Science & Technology* **39**: 9009–9015.
- Tajik S, Ayoubi S, Zeraatpisheh M. 2020.** Digital mapping of soil organic carbon using ensemble learning model in Mollisols of Hyrcanian forests, northern Iran. *Geoderma Regional* **20**: e00256.
- Tang B, Rocci KS, Lehmann A, Rillig MC. 2023.** Nitrogen increases soil organic carbon accrual and alters its functionality. *Global Change Biology* **29**: 1971–1983.
- Taylor PD, Ramsey MH, Potts PJ. 2004.** Balancing Measurement Uncertainty against Financial Benefits: Comparison of In Situ and Ex Situ Analysis of Contaminated Land. *Environmental Science & Technology* **38**: 6824–6831.
- Tekin Y, Tumsavas Z, Mouazen AM. 2012.** Effect of Moisture Content on Prediction of Organic Carbon and pH Using Visible and Near-Infrared Spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal* **76**: 188–198.
- 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.
- Uddin MdK, Saha BK, Wong VNL, Patti AF. 2025.** Organo-mineral fertilizer to sustain soil health and crop yield for reducing environmental impact: A comprehensive review. *European Journal of Agronomy* **162**: 127433.
- Vågen T-G, Shepherd KD, Walsh MG. 2006.** Sensing landscape level change in soil fertility following deforestation and conversion in the highlands of Madagascar using Vis-NIR spectroscopy. *Geoderma* **133**: 281–294.

- Vaudour E, Gholizadeh A, Castaldi F, et al. 2022.** Satellite Imagery to Map Topsoil Organic Carbon Content over Cultivated Areas: An Overview. *Remote Sensing* **14**: 1–22.
- Veerman C, Pinto Correia T, Bastioli C, et al. 2020.** *Caring for soil is caring for life – Ensure 75% of soils are healthy by 2030 for food, people, nature and climate – Report of the Mission board for Soil health and food.* Publications Office.
- Viscarra Rossel RA, Behrens T. 2010.** Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma* **158**: 46–54.
- Viscarra Rossel RA, Walvoort DJJ, McBratney AB, Janik LJ, Skjemstad JO. 2006.** Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma* **131**: 59–75.
- Viscarra Rossel RA, Webster R. 2011.** Discrimination of Australian soil horizons and classes from their visible-near infrared spectra. *European Journal of Soil Science* **62**: 637–647.
- Visser S, Keesstra S, Maas G, de Cleen M, Molenaar C. 2019.** Soil as a basis to create enabling conditions for transitions towards sustainable land management as a key to achieve the SDGs by 2030. *Sustainability (Switzerland)* **11**.
- Vlachová K. 2007.** Vliv huminových látek na toxicitu komplexní vzorků ze životního prostředí.
- Vohland M, Besold J, Hill J, Fründ H-C. 2011.** Comparing different multivariate calibration methods for the determination of soil organic carbon pools with visible to near infrared spectroscopy. *Geoderma* **166**: 198–205.
- Voltr V, Menšík L, Hlisnikovský L, Hruška M, Pokorný E, Pospíšilová L. 2021.** The Soil Organic Matter in Connection with Soil Properties and Soil Inputs. *Agronomy* **11**: 779.
- Voženílek V, Květoň V. 2011.** *Klimatické oblasti Česka: klasifikace podle Quitta za období 1961-2000 = Climatic regions of the Czech Republic : Quitt's classification during years 1961-2000. M.A.P.S. (Maps and Atlas Product Series). 1:500 000.* Olomouc: Univerzita Palackého.
- Waiser TH, Morgan CLS, Brown DJ, Hallmark CT. 2007.** In Situ Characterization of Soil Clay Content with Visible Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal* **71**: 389–396.
- Waksman SA. 1938.** Humus: origin, chemical composition, and importance in nature. : xiv, 526 p.
- Wang HW, Wu ZB, Meng J. 2006.** *Partial Least Squares Regression: Linear and Nonlinear Methods.* Beijing: National Defence Industry Press.
- Wang X, Yang C, Zhou M. 2021.** Partial least squares improved multivariate adaptive regression splines for visible and near-infrared-based soil organic matter estimation considering spatial heterogeneity. *Applied Sciences (Switzerland)* **11**: 1–16.
- Waruru BK, Shepherd KD, Ndegwa GM, Sila A, Kamoni PT. 2015.** Application of mid-infrared spectroscopy for rapid characterization of key soil properties for engineering land use. *Soils and Foundations* **55**: 1181–1195.
- Weber J, Jamroz E, Kocowicz A, et al. 2022.** Optimized isolation method of humin fraction from mineral soil material. *Environmental Geochemistry and Health* **44**: 1289–1298.
- Weber J, Jamroz E, Mielnik L, et al. 2024.** Changes in Soil Humin Macromolecular Structure Resulting from Long-Term Catch Cropping. *Molecules* **29**.
- Wood SA, Blankinship JC. 2022.** Making soil health science practical: guiding research for agronomic and environmental benefits. *Soil Biology and Biochemistry* **172**: 108776.
- Workman J, Shenk J. 2015.** Understanding and Using the Near-Infrared Spectrum as an Analytical Method In: 1–10.
- Xiao D, Huang J, Li J, et al. 2023.** Inversion study of soil organic matter content based on reflectance spectroscopy and the improved hybrid extreme learning machine. *Infrared Physics & Technology* **128**: 104488.
- Xu J, Liu Y, Yan C, Yuan J. 2024.** Estimation of Soil Organic Matter Based on Spectral Indices Combined with Water Removal Algorithm. *Remote Sensing* **16**: 2065.
- Xu Z, Zhao X, Guo X, Guo J. 2019.** Deep Learning Application for Predicting Soil Organic Matter Content by VIS-NIR Spectroscopy. *Computational Intelligence and Neuroscience* **2019**.
- Yang H, Mouazen AM. 2012.** Vis / Near- and Mid- Infrared Spectroscopy for Predicting Soil N and C at a Farm Scale. *Infrared Spectroscopy-Life and Biomedical Sciences* **10**: 185–211.
- 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.
- 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.
- Zepp S, Heiden U, Bachmann M, Wiesmeier M, Steininger M, van Wesemael B. 2021.** Estimation of soil organic carbon contents in croplands of bavaria from scmap soil reflectance composites. *Remote Sensing* **13**.

- Zhang Z, Chen Q, Xu K, et al. 2024.** Selective Modifier-Assisted Humic Acid Extraction: Implications for Soil Quality Enhancement. *Environmental Science & Technology* **58**: 9896–9907.
- Zhang Z, Ding J, Zhu C, et al. 2021.** Strategies for the efficient estimation of soil organic matter in salt-affected soils through Vis-NIR spectroscopy: Optimal band combination algorithm and spectral degradation. *Geoderma* **382**: 114729.
- Zhang Y, Hartemink AE. 2020.** Data fusion of vis-NIR and PXRF spectra to predict soil physical and chemical properties. *European Journal of Soil Science* **71**: 316–333.
- Zhang Y, Zhang L. 2014.** A modified PLS regression model for quality prediction In: *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*. IEEE, 1383–1387.
- Zhao D, Arshad M, Wang J, Triantafilis J. 2021.** Soil exchangeable cations estimation using Vis-NIR spectroscopy in different depths: Effects of multiple calibration models and spiking. *Computers and Electronics in Agriculture* **182**: 105990.
- Zhou W, Xiao J, Li H, et al. 2023.** Soil organic matter content prediction using Vis-NIRS based on different wavelength optimization algorithms and inversion models. *Journal of Soils and Sediments* **23**: 2506–2517.
- Zhu J, Jin Y, Zhu W, Lee DK. 2024.** VIS-NIR spectroscopy and environmental factors coupled with PLSR models to predict soil organic carbon and nitrogen. *International Soil and Water Conservation Research*.
- Žižala D, Minařík R, Skála J, et al. 2022.** High-resolution agriculture soil property maps from digital soil mapping methods, Czech Republic. *Catena* **212**.

Seznam obrázků, tabulek, grafů, zkratk a symbolů

Seznam obrázků

- Obr. 1.1. Degradace půdy v EU podle přehledu stavu půdy /Soil Health Dashboard/ (Panagos *et al.* 2024).
- Obr. 3.1. Schéma tvorby humusových látek v půdě (upraveno dle Kononova 1963; Sotáková 1982; Stevenson 1994; Ouni *et al.* 2014; Guo *et al.* 2019; Tiwari *et al.* 2023).
- Obr. 3.2. Rozdělení organických látek v půdě a klasifikace humusových látek (Brady, Weil 2008, vlevo) a frakcionace půdní organické hmoty /SOM/ (Stevenson 1994; Sparks 2003, vpravo).
- Obr. 3.3. Schéma NIR analýzy.
- Obr. 3.4. Predikce parametrů kvality SOM v půdě (HA - huminová kyselina, FA - fulvokyselina, HUM - humin) NIR spektroskopii (hyperspektrální senzor FieldSpec Pro FR 3 /350–2500 nm/) pomocí modelu PLSR na půdním typu Fluvizem (A1) a Kambiziem (A2) v oblasti Ceará /Brazílie/ (Ribeiro *et al.* 2023).
- Obr. 3.5. Statistické charakteristiky predikčního modelu PLSR pro predikci parametrů kvality půdy (TOC - celkový organický uhlík, Fulvic - huminová kyselina, Fulvic - fulvokyselina, Humine - humin) v povrchové vrstvě půdy 0–20 cm na experimentální farmě univerzity Oeste /Paulista-UNOESTE, Brazílie/ (Lima *et al.* 2024).
- Obr. 3.6. Predikce parametrů kvality SOM v půdě pozorovaných vs. předpovídaných dat (pro nejlepší spektrální transformaci a aplikaci modelu QRF) pro parametry SOM (A) uhlík extrahovaný studenou vodou (CCWE), (B) uhlík extrahovaný horkou vodou (CHWE), (C) uhlík huminových kyselin (CHA), (D) uhlík fulvokyselin (CFA), (E) uhlík rekalitrantních organických látek (CREC) a (F) celkový organický uhlík (TOC) v oblasti Asturie /pohoří Sierra de los Lagos, severozápadní Španělsko/ (Salgado *et al.* 2025).
- Obr. 4.1. Mapa lokalit (výzkumné plochy, provozní plochy) odběrů vzorků půdy v rámci České republiky.
- Obr. 4.2. Mapa zájmového území (upraveno podle <https://mapy.cz/>).
- Obr. 4.3. Pedologická mapa zájmového území (upraveno podle <http://mapy.geology.cz/pudy/>).

Seznam tabulek

- Tab. 3.1. Spektrální odhady (predikce) Vis–NIR pro půdní organický uhlík (SOC) pomocí různých algoritmů (statistických metod).
- Tab. 4.1. Základní výrobní a klimatické podmínky stanovišť VOP pokusů.
- Tab. 4.2. Základní výrobní a klimatické podmínky stanovišť DPP pokusů.
- Tab. 4.3. Základní charakteristiky dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ (<https://ukzuz.gov.cz/>).
- Tab. 4.4. Dlouhodobé průměrné měsíční a roční teploty (°C) a srážky (mm) ze stanice Jevíčko a Protivanov (1991–2020) dle ČHMÚ Ostrava–Poruba.
- Tab. 4.5. Kategorizace získaných kalibračních modelů podle koeficientu determinace (Míka *et al.* 2003; Dvořáček *et al.* 2014; Reda *et al.* 2021).
- Tab. 4.6. Kalibrace a predikce parametrů kvality půdy (SOC, Ctot a Ntot) pomocí techniky NIRS.
- Tab. 4.7. Validace parametrů kvality půdy (SOC, Ctot a Ntot) pomocí techniky NIRS.
- Tab. 4.8. Základní popis kalibračního a validačního souboru vzorků půd dlouhodobých pokusů VOP a DPP.
- Tab. 4.9. Základní popis kalibračního a validačního souboru vzorků půd provozních pokusů z oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané) a Dražanské vrchoviny (experimentální pole AGROSPOL, a.d. Knínice).

Tab. 4.10. Kalibrace a predikce parametrů kvality půdy pomocí techniky NIRS dlouhodobých pokusů VOP, DPP a dále provozních pokusů v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny.

Tab. 4.11. Validace parametrů kvality půdy pomocí techniky NIRS dlouhodobých pokusů VOP, DPP a dále provozních pokusů v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny.

Tab. 4.12. Základní popis kalibračního a validačního souboru vzorků půd dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ.

Tab. 4.13. Kalibrace a predikce parametrů kvality půdy pomocí techniky NIRS dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ.

Tab. 4.14. Validace parametrů kvality půdy pomocí techniky NIRS dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ.

Seznam grafů

Graf 4.1. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah SOC v půdě na lokalitě RFE.

Graf 4.2. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah SOC v půdě na lokalitách VOP+DPP.

Graf 4.3. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah SOC v půdě v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny (AGROSPOL a.d., Knínice).

Graf 4.4. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah Ctot v půdě na lokalitách ÚKZÚZ.

Graf 4.4. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah Ctot v půdě na lokalitách ÚKZÚZ.

Graf 4.5. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah Ntot v půdě na lokalitách.

Graf 4.6. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah Ntot v půdě na lokalitách ÚKZÚZ.

Graf 4.7. NIR spektra kalibračního souboru vzorků půd dlouhodobých pokusů VOP a DPP.

Graf. 4.8. NIR spektra validačního souboru vzorků půd dlouhodobých pokusů VOP a DPP.

Graf. 4.9. NIR spektra kalibračního souboru vzorků půd provozních pokusů z oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané) a Dražanské vrchoviny (experimentální pole AGROSPOL, a.d. Knínice).

Graf 4.10. NIR spektra validačního souboru vzorků půd provozních pokusů z oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané) a Dražanské vrchoviny (experimentální pole AGROSPOL, a.d. Knínice).

Graf 4.11. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah HL v půdě dlouhodobých pokusů VOP, DPP (nahore) a dále provozních pokusů v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny (dole).

Graf 4.12. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah HK v půdě dlouhodobých pokusů VOP, DPP (nahore) a dále provozních pokusů v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny (dole).

Graf 4.13. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah FK v půdě dlouhodobých pokusů VOP, DPP (nahore) a dále provozních pokusů v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny (dole).

Graf 4.14. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro poměr $Q_{4/6}$ v půdě dlouhodobých pokusů VOP, DPP (nahore) a dále provozních pokusů v oblasti Boskovické brázdy a Dražanské vrchoviny (dole).

Graf 4.15. NIR spektra kalibračního souboru vzorků půd dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ.

Graf. 4.16. NIR spektra validačního souboru vzorků půd dlouhodobých pokusů ÚKZÚZ.

Graf 4.17. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro obsah CHA (HK) v půdě v dlouhodobých pokusech ÚKZÚZ.

Graf 4.18. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro poměr $Q_{4/6}$ v půdě v dlouhodobých pokusech ÚKZÚZ.

Graf 4.19. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro index aromaticity (iAR) v půdě v dlouhodobých pokusech ÚKZÚZ.

Graf 4.20. Statisticky průkazná závislost kalibračního modelu pro index potenciální smáčivosti (PWI) v půdě v dlouhodobých pokusech ÚKZÚZ.

Seznam zkratek a symbolů

% - procento

° - stupeň

°C - stupeň Celsia

a.d. - agrární družstvo

AI - umělá inteligence

ANN - umělé neuronové síť

CARC - Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu

Cd - kadmium

cm - centimetr

CO₂ - oxid uhličitý

Ctot - celkový organický uhlík

Cubist - kubický regresní model

ČHMÚ - Český hydrometeorologický ústav

ČR - Česká republika

ČZÚ - Česká zemědělská univerzita v Praze

DP JEV - dlouhodobé pokusy Jevíčko

DPP - dlouhodobé pokusy (Pernolec a Kostelec nad Orlicí)

DRIFT - difuzní reflexní infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací

EU - Evropská unie

EUSO - EU Soil Observatory

FK; CFA - fulvokyselina

FYM - hnůj

H₂SO₄ - kyselina sírová

ha - hektar

Hg - rtuť

HK; CHA - huminová kyselina

HL; CHS - humusové látky

HMK - Hymatomelanové kyseliny

HU - humin

-CH - vazba uhlík, vodík

CHWC - uhlík rozpouštěný v horké vodě

iAR - index aromaticity
 J - jih
 K - draslík
 Kč - koruna česká
 kg - kilogram
 km - kilometr
 km² - kilometr čtvereční
 log - logaritmus
 m - metr
 M - molární koncentrace
 m n. m. - nadmořská výška
 m² - metr čtvereční
 mg - miligram
 min - minuta
 MIR - střední infračervená část spektra
 mm - milimetr (délka)
 mm - milimetr (srážky)
 mmol - milimol
 mol - jednotka látkového množství v soustavě SI
 MPLSR - modifikovaná metoda regrese částečných
 nejmenších čtverců (PLSR)
 MV - Mahalanobisova vzdálenost
 MZe ČR - Ministerstvo zemědělství ČR
 N - dusík
 n - počet
 NaOH - hydroxid sodný
 NAZV - Národní agentura pro zemědělský výzkum
 –NH - vazba dusík, vodík
 NIR - blízká infračervená část spektra
 NIRS - blízká infračervená spektroskopie
 nm - nanometr
 Ntot - celkový dusík
 obj. - objem
 –OH - vazba kyslík, vodík
 ot - otáčky
 P - fosfor
 Pb - olovo
 PCA - analýza hlavních komponent
 PCA - analýza hlavních komponent
 PCR - regrese hlavních komponent
 pH - půdní reakce
 PLSR - regrese částečných nejmenších čtverců
 PWI - index potenciální smáčivosti
 PZ - precizního zemědělství
 Q_{4/6} - barevný kvocient (index)
 R - odrazivost
 R² - koeficient determinace
 RF - Random Forest
 RFE - dlouhodobé výživářské pokusy Praha
 S - sever
 SDGs - United Nations Sustainable Development
 Goals
 SEC - směrodatná odchylka kalibrace
 SEP - směrodatná odchylka predikce
 –SH - vazba síra, vodík
 SM - schválená metodika
 SOC - půdní organický uhlík
 SOM - půdní organická hmota
 SV - severovýchod
 SVMR - regrese metodou podpůrných vektorů
 SZ - severozápad
 TG - celkový obsah glomalinu
 TTP - trvalý travní porost
 ÚKZÚZ - Ústřední kontrolní a zkušební ústav
 zemědělský
 USA - Spojené státy americké
 UV - ultrafialová část spektra
 v - objem (volume)
 v.v.i. - veřejná výzkumná instituce
 VIS - viditelná část spektra
 Vis-NIR - spektroskopie ve viditelné a blízké
 infračervené části spektra
 VOP - dlouhodobé výživářské pokusy (Čáslav,
 Lukavec, Ivanovice na Hané)
 w - hmotnost (weight)
 WAPLS - vážený průměr částečných nejmenších
 čtverců
 XRF - rentgen-fluorescenční spektrometrie
 Zn - zinek

Název: Metodické postupy (vývoj kalibračních rovnic) pro stanovení kvality SOM v zemědělských půdách pomocí NIR spektroskopie

Autoři:

Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.

Ing. Eva Kunzová, CSc.

doc. RNDr. Lubica Pospíšilová, CSc.

Ing. Pavel Nerušil, Ph.D.

doc. Ing. Martin Kulhánek, Ph.D.

Ing. Ondřej Sedlář, Ph.D.

Ing. Jana Plisková

Ing. Lukáš Hliseníkovský, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Ryant, Ph.D.

RNDr. Mikuláš Madaras, Ph.D.

Ing. Jindřich Černý, Ph.D.

Ing. Ladislav Menšík

prof. Ing. Jiří Balík, CSc., dr. h. c.

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: 55

Náklad: 50 ks

ISBN 978-80-7427-444-2