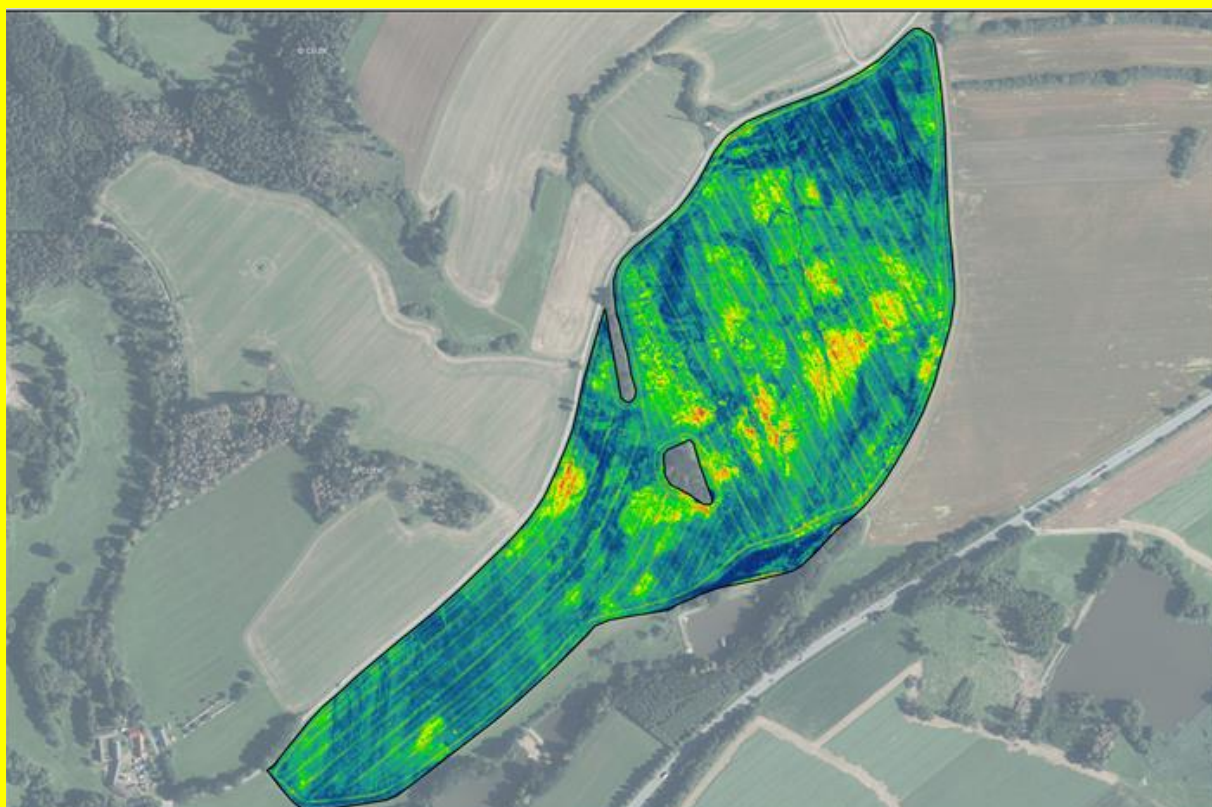


Metody optického a termálního dálkového průzkumu Země pro hodnocení půdní prostorové variability v precizním zemědělství



Renata Duffková, Jan Haberle, Jakub Brom, Vojtěch Lukas
a kolektiv

Metodika pro praxi



2021



Výzkumný ústav meliorací
a ochrany půdy, v.v.i.



Výzkumný ústav
rostlinné výroby, v.v.i.



Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice



Mendelova
univerzita
v Brně



Metody optického a termálního dálkového průzkumu Země pro hodnocení půdní prostorové variability v precizním zemědělství

N-met Certifikovaná metodika

Autorský kolektiv:

Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i. (25 %)

Ing. Renata Duffková, Ph.D. (duffkova.renata@vumop.cz), Ing. Petr Fučík, Ph.D., Mgr. Antonín Zajíček, Ph.D., Ing. Štěpán Marval

Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. (25 %)

Ing. Jan Haberle, CSc., RNDr. Ivana Raimanová, Ph.D., Ing. Pavel Svoboda

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích (20 %)

Doc. Ing. Jakub Brom, Ph.D., Ing. Václav Nedbal, Ph.D.

Mendelova univerzita v Brně (20 %)

Doc. Ing. Vojtěch Lukas, Ph.D., Ing. Lubomír Neudert, Ph.D.

Zemědělské družstvo Kojčice u Pelhřimova (10 %)

Miloslav Vaněček

Poděkování

Metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu **TAČR TH02030133** s názvem „**Zemědělský systém hospodaření integrující efektivní využití živin plodinami a ochranu vod před plošnými zdroji znečištění**“ a institucionální podpory **MZE-RO0218 VÚMOP, v.v.i.**

Certifikace a smlouva o uplatnění

Certifikaci metodiky provedl **Odbor zemědělských komodit** Ministerstva zemědělství ČR, osvědčením č. **MZE-37344/2021-18145** ze dne 18.6.2021. Smlouva o uplatnění certifikované metodiky mezi Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půdy, v.v.i. a Zemědělským družstvem Kojčice u Pelhřimova ze dne 21.4.2021 je uložena ve VÚMOP, v.v.i.

Citace

Duffková R., Haberle J., Brom J., Lukas V., Vaněček M., Raimanová I., Fučík P., Nedbal V., Svoboda P., Neudert L., Zajíček A., Marval Š. 2021. Metody optického a termálního dálkového průzkumu Země pro hodnocení půdní prostorové variability v precizním zemědělství. Certifikovaná metodika. VÚMOP, v.v.i., 48 s. ISBN 978–80–88323–41–9 (online pdf)

Recenzenti

Ing. Jaroslava Novotná, Ph.D., Výzkumný ústav pícninářský, spol. s r. o.

Ing. Michaela Budňáková, oddělení zemědělských vstupů, Ministerstvo zemědělství ČR

V roce 2021 v nákladu 80 ks vydal VÚMOP, v.v.i. a VÚRV, v.v.i.

Tisk: Rhodos spol. s r.o., Vyšehradská 51, 128 00 Praha 2

ISBN 978–80–88323–41–9 (online pdf)

Obsah

I) Cíl metodiky.....	5
II) Vlastní popis metodiky	5
1. Úvod – význam půdní variability v precizním zemědělství	5
2. Vliv půdní variability na využití dusíku za různých vlhkostních podmínek	6
3. Diskriminace ¹³ C jako indikátor projevu sucha	8
4. Legislativní rámec	8
5. Pokusná sledování na Českomoravské vrchovině a dolní Jizeře	9
5.1 Českomoravská vrchovina (Kojčice)	9
5.2 Dolní Jizera (Sojovice, Kochánky)	11
6. Využití metod DPZ pro hodnocení půdní variability	14
6.1 Kritické zdrojové oblasti	17
6.2 Podkladové mapy pro variabilní aplikaci dusíkatých minerálních hnojiv	21
6.2.1 Vegetační indexy	21
6.2.2 Postup pro podkladové mapy variabilního hnojení	23
6.3 Hodnocení parametrů biomasy a retence vody v půdě pomocí kalibračních vzorků	27
6.4 Bilance dusíku a akumulace půdního reziduálního dusíku	34
7. Závěr, doporučení.....	37
III) Srovnání „novosti postupů“	37
IV) Popis uplatnění	38
V) Ekonomické aspekty	38
VI) Seznam použité související literatury	39
VII) Seznam publikací, které předcházely metodice	43
English abstract	45
Seznam zkratek.....	46
Příloha 1.....	47

I) Cíl metodiky

Metodika je zaměřena na identifikaci plošné půdní variability pomocí pokročilých metod optického a termálního dálkového průzkumu Země (DPZ). Znalost půdní variability je důležitá pro agronomické rozhodování v precizním zemědělství (PZ) s cílem přizpůsobit činnosti rostlinné výroby plošně se měnícím půdním podmínkám a stavu porostu a dosáhnout jejich lepší účinnosti. Projevy půdní variability jsou na řadě zemědělských pozemků zvýrazňovány suchem, kdy je příjem živin významně ovlivňován retencí vody v půdě.

V metodice jsou uvedeny postupy pro i) **vymezení kritických zdrojových (infiltračních) oblastí** s vysokou propustností a nízkou retencí pro vodu, ii) **tvorbu podkladových map pro variabilní aplikaci dusíkatých minerálních hnojiv**, iii) **hodnocení parametrů biomasy a retence vody v půdě** a iv) **bilanci dusíku a akumulaci půdního reziduálního dusíku**. Postupy jsou založeny na leteckých hyperspektrálních a termovizních snímcích a multispektrálních snímcích z družic a bezpilotních letounů (UAV). Společným cílem všech metod je zvýšení efektivity aplikovaného hnojiva pro tvorbu výnosu a snížení rizika ztrát dusíku (dusičnanů) vyplavením do podzemních vod.

II) Vlastní popis metodiky

1. Úvod – význam půdní variability v precizním zemědělství

Principy PZ vycházejí z předpokladu, že efektivita materiálových vstupů (např. hnojiv, pesticidů, osiv) může být zvýšena, pokud je při nakládání s nimi zohledněna variabilita půdní úrodnosti a výnosového potenciálu (VP) zemědělského pozemku (**van Alphen 2002, Alva et al. 2006, Neudert a Lukas 2015**). Agronomické zásahy v PZ jsou proto prováděny s plošně rozdílnou intenzitou, která půdní variabilitě odpovídá. V případě variabilního hnojení se jedná nejen o maximální využití živin pro tvorbu výnosu v požadované kvalitě, ale i o snížení rizika ztrát nadbytečných (nevyužitých) živin vyplavením do podzemních vod (**Rodriguez–Moreno et al. 2014, Lukas et al. 2020a**). Z toho vyplývá, že postupy PZ jsou vhodné i pro hospodaření v ochranných pásmech vodních zdrojů nebo zranitelných oblastech dusičnany (ZOD).

Metodika je založena na výsledcích projektu Technologické agentury České republiky (TAČR) TH02030133 s názvem „Zemědělský systém hospodaření integrující efektivní využití živin plodinami a ochranu vod před plošnými zdroji znečištění“ řešeného v období 2017 – 2020. Jsou zde uvedeny metody založené na projevech rostlinné biomasy, které jsou propojeny s půdní variabilitou, a sice pro i) vymezení kritických zdrojových oblastí, ii) tvorbu podkladových map pro variabilní aplikaci dusíkatých minerálních hnojiv, iii) hodnocení parametrů biomasy a retence vody v půdě pomocí kalibračních vzorků a iv) bilanci dusíku (N) a akumulaci půdního reziduálního N. Při jejich popisu a interpretaci je kladen důraz nejen na funkčnost a přínos pro zemědělskou praxi, ale i na uživatelskou srozumitelnost s adekvátní mírou detailu.

Uvedené postupy vycházejí z odlišných projevů pěstovaných plodin – z energetické bilance a vodního stresu porostu v případě kritických zdrojových oblastí (kap. 6.1) a ze spektrální odrazivosti a následně odvozených vegetačních indexů pro podkladové mapy variabilního hnojení, hodnocení parametrů biomasy a retence vody v půdě a bilanci N a akumulaci reziduálního N (kap. 6.2-6.4). Jejich účel je však společný, a to zvýšení efektivity využití aplikovaného minerálního dusíku pro tvorbu výnosu a omezení ztrát dusíku (dusičnanů) vyplavením z propustných půd do povrchových a podzemních vod. V postupech byly využívány letecké hyperspektrální a termovizní snímky a multispektrální snímky z družic a UAV.

Metodické postupy byly ověřovány ve dvou oblastech, ve kterých se intenzivně zemědělsky hospodaří, ale zároveň se zde vyskytují zdroje pro pitnou vodu. Jednalo se o oblast Českomoravské vrchoviny, kde byly vybrány půdní bloky (PB) s vysokou půdní variabilitou (tj. s výskytem vícera půdních typů a druhů) obhospodařované zemědělským družstvem (ZD) Kojčice v ochranných pásmech vodních zdrojů vodní nádrže Švihov, a dále o oblast dolního toku Jizery, která je zdrojovou oblastí vodárny v Káraném, kde pokusné pozemky byly vybrány především v údolní nivě.

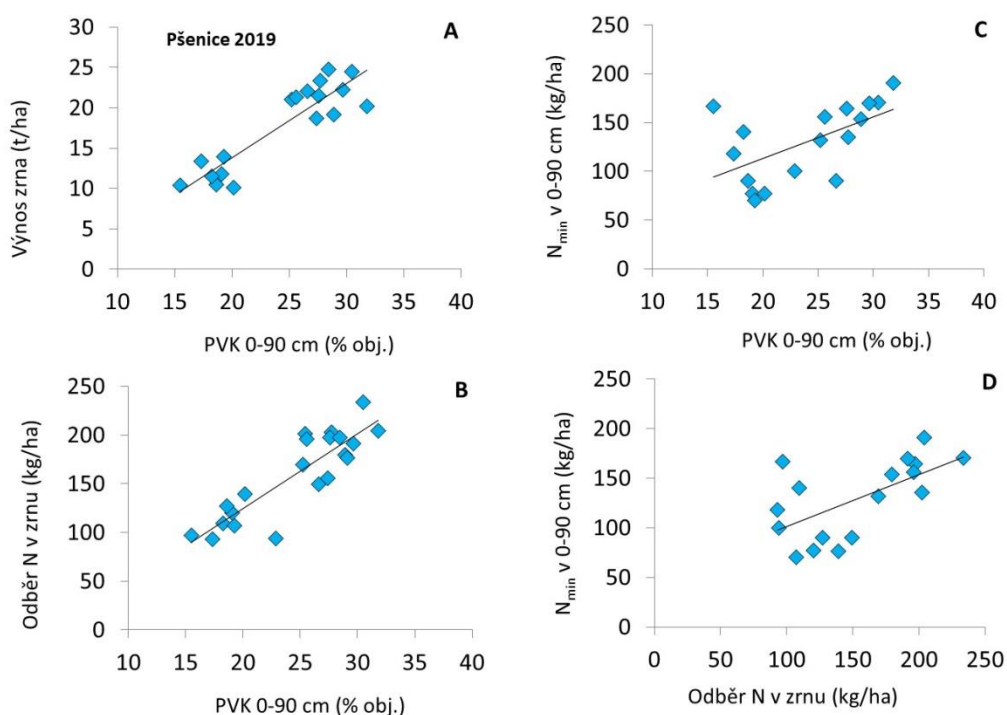
2. Vliv půdní variability na využití dusíku za různých vlhkostních podmínek

Růst a vývoj zemědělských plodin integruje plošně se měnící půdní podmínky s průběhem počasí a agronomickými faktory. Teplotní a vlhkostní poměry v půdě ovlivňují přímo i nepřímo přeměny N, jeho příjem i využití rostlinou. Sucho snižuje mineralizaci N z půdní zásoby, limituje rozvoj kořenů a pohyb iontů N ke kořenům; nedostatek vody zhoršuje využití N pro růst a výnos. V důsledku sucha porost odčerpá méně dusíku, menší množství se exportuje z pole ve výnosu a v půdě tudíž zůstává větší množství nevyužitého (reziduálního) N. Obsah reziduálního N ovlivňuje, kromě dávky hnojiv a využití N pro růst a výnos, i mineralizace N z posklizňových zbytků (například opad listů řepky již v průběhu vegetace) a půdní organické hmoty, statkových hnojiv aplikovaných k dané plodině nebo v předchozím roce, případně imobilizace N posklizňovými zbytky s širokým poměrem C:N (sláma obilovin) a zařazení strniskových meziplodin. Dlouhodobý monitoring v desítkách podniků prokazuje systematicky vyšší obsah minerálního dusíku (N_{\min}) v ornici i podorničí po určitých skupinách plodin, zvláště po bramborách, kukuřici a zeleninách, v některých případech po řepce nebo dalších plodinách, v případě dávek hnojiv, které neodpovídají potřebě porostu a realizovanému výnosu (**Haberle et al. 2020a, Klír et al. 2018, Svoboda et al. 2017**).

Vysoký obsah reziduálního N_{\min} (většinou v dusičnanové formě) zvyšuje riziko vyplavení v období s vyššími srážkami a menší evapotranspirací, v našich podmínkách nejčastěji v mimovegetačním období nebo při nadměrné závlaze (**Haberle et al. 2018a**). Tyto a další dopady se projevují i v rámci prostorové variability pozemků, zvláště při velkých lokálních rozdílech v infiltraci a schopnosti půdy zadržet vodu v ornici a podorničí, která je v pedologické terminologii nazývána **polní vodní kapacita (PVK)**. Na řadě pozemků s prostorovou půdní variabilitou jsou projevy sucha v porostu velmi výrazné. Vodní deficit se vyvine dříve a intenzivněji na lehkých propustných půdách s nízkou retencí vody a obsahem dostupných živin

a vyšším podílem písku nebo šterku, zvláště v podorníci ve srovnání s půdou těžší, kde je retenční vody a živin v půdě vyšší (Duffková et al. 2011). Příjem N je na půdně variabilním pozemku při nedostatku vody nejen nižší, ale i plošně proměnlivý, ovlivňovaný schopností půdy zadržet vodu (Lukas et al. 2020b). To je plně v souladu s reakcí porostu na variabilní aplikaci minerálního dusíku, která v letech s výskytem vodního stresu odpovídá více půdní variabilitě ve srovnání s uniformním (plošně rovnoměrným) hnojením (Haberle et al. 2020c). V případě uniformní dávky minerálních N hnojiv pak množství nevyužitého N jako důsledek dopadu sucha na výnos přímo odpovídá PVK. Na Obr. 1 je ukázka vztahu odlišné PVK kořenové zóny (do hloubky 90 cm), výnosu (1A) a odběru N v zrna pšenice (1B) na jednom pozemku. Na místech se silně propustnou půdou s nízkou PVK se ale nevyužitý N dlouho neudrží. V případě silných letních a podzimních srážek se velká část reziduálního N_{min} (dusičnanů) vyplaví z ornice do podorníci ještě před nástupem zimy a výsledkem jsou vyšší hodnoty N_{min} na místech s lepší půdou (1C). Výsledný vztah mezi odběrem N v zrna a N_{min} před zimou je pak opačný (1D), než bychom očekávali. U těchto půd není tedy obsah N_{min} před nástupem zimy, jako indikátor rizika vyplavení, vždy spolehlivý.

Ve vláhově příznivějších letech je vliv půdních vlastností na příjem N a dosažený výnos méně zřetelný, protože dobrá dostupnost půdní vody zvyšuje odběr N a výnosy i na místech s nižší PVK, ale na druhou stranu se na těchto místech zvyšuje riziko vyplavení dusičnanového dusíku do podzemních vod.



Obrázek 1. Vztah polní vodní kapacity půdy (PVK) do 90 cm a výnosu (A), odběru N v zrna (B), obsahu N_{min} před nástupem zimy (C) a výsledný vztah obsahu N_{min} na podzim a odběru N v zrna (D).

3. Diskriminace ^{13}C jako indikátor projevu sucha

K rozvoji příznaků vodního stresu porostu dochází při deficitu dostupné vody v kořenové zóně, který způsobí pokles intenzity transpirace porostu a následné fyziologické a morfologické změny rostlin, snížení růstu a výnosu. Snížená schopnost transpirace porostu vede mj. ke zvýšení teploty povrchu porostu v porovnání s porostem, který se dokáže díky většímu obsahu dostupné vody v kořenové zóně a lepšímu příjmu a hospodaření s vodou ochlazovat transpirací (**Monteith a Reifsnyder 2008**). Uzavírání průduchů při nedostatku vody modifikuje poměr izotopů ^{12}C a ^{13}C , a to nabízí možnost identifikovat nepřímo míru nedostatku vody na základě jejich poměru, tj. ochuzení podílu těžšího ^{13}C oproti lehčímu izotopu ^{12}C . Tato diskriminace ^{13}C ($\Delta^{13}\text{C}$, ‰) v listech nebo semenech ukazuje, zda rostlina měla v průběhu vegetačního období k dispozici dostatek vody pro zajištění potřeby transpirace nebo musela šetřit vodou uzavíráním průduchů (**Raimanová et al. 2016, 2018**). Čím je vyšší intenzita fotosyntézy v podmínkách dostatku půdní vláhy, tím je vyšší výnos a rovněž se zvyšuje podíl ^{13}C v rostlině i hodnota $\Delta^{13}\text{C}$. Silný vodní stres je u nadzemních částí plodin signalizovaný hodnotami $\Delta^{13}\text{C}$ pod 18 ‰.

Diskriminace ^{13}C integruje dostupnost vody během celého růstu plodiny, tudíž v letech s výskytem vodního stresu, kdy se více projevuje vliv půdní variability na dostupnou vodní zásobu v kořenové zóně, je zvýšený předpoklad korelace $\Delta^{13}\text{C}$ s výnosem a schopností půdy držet vodu. Stanovení $\Delta^{13}\text{C}$ umožňuje prokázat, že snížení výnosu v určitých zónách variabilního pozemku bylo skutečně důsledkem vodního stresu, nikoliv v důsledku jiných faktorů (nedostatek živin, extrémní pH, poškození rostlin mrazem nebo použití nevhodného přípravku ochrany rostlin).

4. Legislativní rámec

V minulých letech byla přijata řada zákonů a nařízení, která si kladla za cíl snížit negativní dopady zemědělské činnosti na životní prostředí. Především se jedná o oblast skladování a používání minerálních a organických hnojiv, která jsou jedním z hlavních zdrojů znečištění povrchových a podzemních vod a eutrofizace vodních toků a vodních nádrží (**Zákon o hnojivech, Nitrátová směrnice**).

Další zákonné normy zahrnují kromě redukce vstupu živin i opatření pro snížení vstupu pesticidů, zlepšení biodiverzity, udržení obsahu organické hmoty v půdě. Standardy Dobrého zemědělského a environmentálního stavu (DZES) půdy zajišťují zemědělské hospodaření ve shodě s ochranou životního prostředí. V rámci podmínek podmíněnosti (Cross Compliance) a podmínek pro ozelenění tzv. greeningu dochází k průniku některých prvků greeningu tzv. ekologicky významných prvků (EFA) a požadavků v rámci DZES, které mohou být plněny současně.

Některé zákonné normy problematiku prostorové variability alespoň zmiňují; základní doporučení dobré zemědělské praxe požaduje vycházet pro určování potřeby hnojení z potřeby živin porostu pro předpokládaný výnos, půdní reakce a množství přístupných živin

v půdě, obsahu humusu a stanovištních podmínek, včetně půdního druhu a typu. Uvádí se, že při aplikaci je nutné dbát na rovnoměrné dávkování a rozmetání hnojiv, přičemž tyto podmínky splňuje i technologie diferencovaného hnojení. Minerální dusíkatá hnojiva se doporučuje používat pouze tehdy, jestliže lze očekávat využití dodaného dusíku rostlinami. Ale limity maximálních dávek dusíku se určují podle průměrných výnosů; v zónách s lepšími podmínkami a vyšším výnosem by bylo vhodné aplikovat více než je limit, ale to zemědělec může realizovat z úspory – nižšího hnojení na místech s horšími podmínkami a nižšími výnosy. Je otázka, zda by potřeba zohlednit prostorovou variabilitu neměla být důsledněji zahrnuta do zásad správné zemědělské praxe.

Zatím zcela chybí zohlednění prostorové variability půdy při výpočtu a aplikaci doplňkové závlahy. I na pozemcích s výrazně odlišnými zónami půdy s nízkou vodní kapacitou a rychlou infiltrací vody (vysokou hydraulickou vodivostí) se uplatňuje paušální závlaha, která nutně vede ke ztrátám živin, především dusíku, a nižší efektivnosti vody (**Duffková et al. 2020, Haberle et al. 2018a, 2020a**). Klimatická změna a častější epizody sucha přináší nutnost šetřit vodou na závlahy – precizní zavlažování, které zohledňuje při aplikaci vody variabilitu půdy a porostu (**Neupane a Guo 2019**), je potřeba začít ověřovat a rozvíjet s předstihem, případně i nějakou formou zahrnout a podpořit i legislativně.

5. Pokusná sledování na Českomoravské vrchovině a dolní Jizeře

5.1 Českomoravská vrchovina (Kojčice)

V oblasti Českomoravské vrchoviny bylo vybráno šest pokusných pozemků v okolí obcí Kojčice, Dehtáře, Svěpravice a Krasíkovice obhospodařovaných ZD Kojčice (**Tab. 1a**). ZD Kojčice se zabývá pěstováním pšenice, ječmene, kukuřice, ovsa, řepky a brambor a specializuje se na chov českého strakatého skotu.

Klimatický region oblasti je mírně teplý s dlouhodobým průměrem srážek 721 mm a průměrnou teplotou vzduchu 8,2°C. Vybrané pozemky ležely v nadmořské výšce 480–550 metrů. Před zahájením pokusů byl na všech PB proveden pedologický průzkum a odběry půdních vzorků v ornici (0–30 cm) a podorniči (30–60 cm). Byly stanoveny obsahy přístupných živin, půdní organické hmoty, půdní reakce a kategorie zrnitostního složení. Ze zrnitostní kategorie I. (% půdních částic < 0,01 mm) byla pomocí jednoduché pedotransferové funkce (**Novotný et al. 2000**) vypočítána PVK pro ornici i podorniči:

$$PVK = 6,66 + 1,03 * (\% \text{ zrn. kat. } < 0,01 \text{ mm}) - 0,008 * (\% \text{ zrn. kat. } < 0,01 \text{ mm})^2$$

Pro zjištění PVK vrstvy 0–60 cm byl použit průměr z hloubky 0–30 cm a 30–60 cm.

Všechny pokusné PB měly kyselou půdní reakci a vyznačovaly se velkou půdní heterogenitou. Převažovala lehká (hlinitopísčítá) až středně těžká (písčitohlinitá) kambizem modální (Kam). Plochy půd ovlivněné podzemní/povrchovou vodou (kambizem modální slabě oglejená Kam(g'), kambizem oglejená KAg, pseudoglej modální PGm) nebo půd zrnitostně

lehkých (písčitých, hlinitopísčitých), mělkých a skeletovitých (kambizem arenická KAr, kambizem rankerová KAs, ranker kambický RNk) měly výrazně nižší plošné zastoupení (**Obr. 2**). Vyšší výnosy byly na KAm, KAm(g'), PGM a KAs. Půdní substrát (migmatit, rula, pararula) byl v různém stupni rozpadu. Všechny pokusné půdní bloky byly zařazeny do ZOD (aplikační pásma III.a a III.b).

Půdní variabilita souvisela i s variabilitou výnosovou, která je na **Obr. 2** zobrazena pomocí dlouhodobého VP z let 2013–2019. Části s nižším VP (< 100 %) byly většinou na půdách s vyšší propustností pro vodu (tj. vyšším obsahem písku, skeletu) nebo to byly i části s utuženou půdou, často i se sklonem k zamokření (např. jižní „žlutá“ část PB1 nebo centrální část PB2 s pseudoglejem modálním, **Obr. 2**).

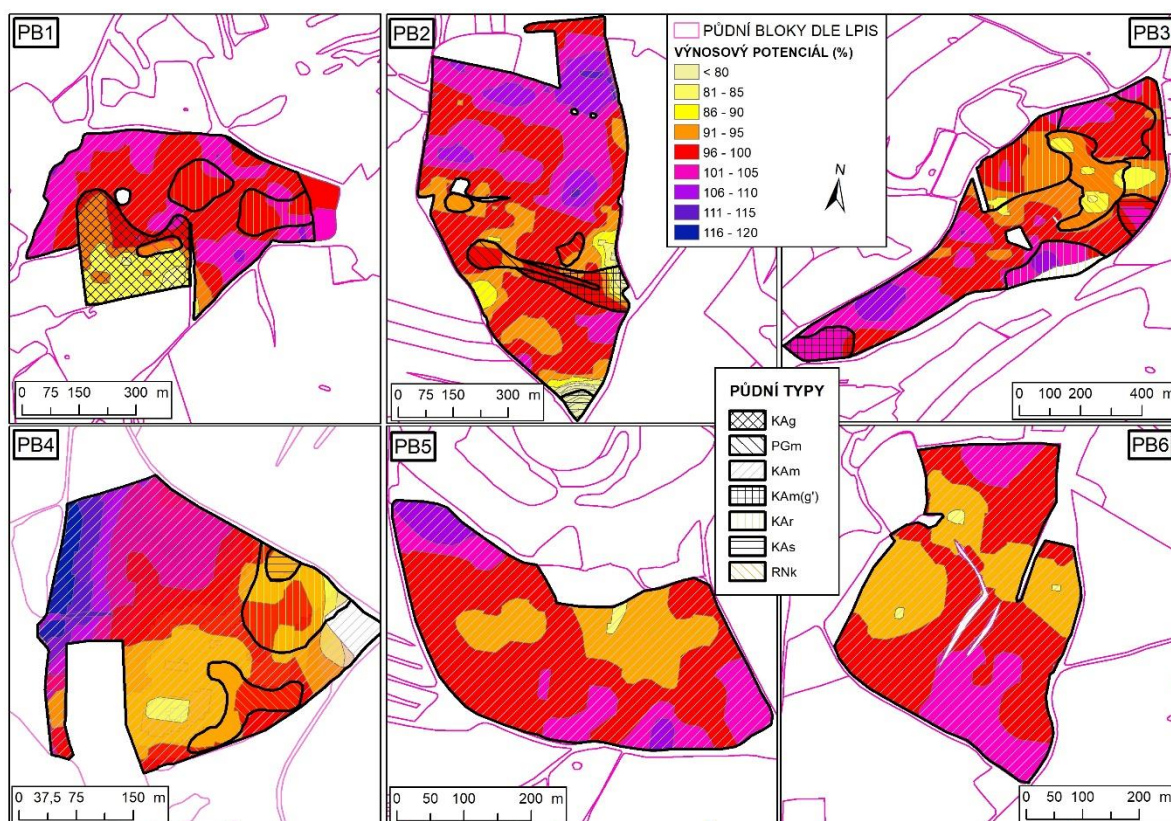
Na všech pokusných PB byly pěstovány obilniny – v letech 2017, 2018 a 2020 pšenice ozimá a v roce 2019 ječmen jarní (sladovnický). Regenerační hnojení pšenice minerálním dusíkem bylo provedeno vždy uniformně, ale jeho dávka byla přizpůsobená obsahu N_{\min} v půdě. Produkční, příp. i kvalitativní přihnojení pšenice bylo diferencováno, tzn., že na určité části plochy každého PB byl minerální dusík aplikován uniformně a na jiné variabilně. V roce 2017 byla variabilní dávka N odvozena z mapy dlouhodobého VP. V letech 2018 a 2020 byly mapy VP korigovány podle aktuálního stavu porostu pomocí vegetačních indexů z družicových snímků Sentinel-2 (**Lukas et al. 2020a**).

Během vegetačního období byly před nebo po hnojení ve fázi sloupkování (BBCH 31-36) a naduřování listové pochvy až metání (BBCH 41-51) na vybraných místech ve dvou opakováních odebírány vzorky biomasy z plochy 0,25 m², z níž byla v laboratoři zjišťována hmotnost suché hmoty a koncentrace N. Z těchto údajů byl počítán index výživy dusíkem NNI (nitrogen nutrition index, %) jako podíl aktuálního obsahu N (N_{akt} , %) a kritického obsahu N v biomase (N_{krit} , %). N_{krit} je minimální obsah N potřebný pro maximální produkci biomasy v rozmezí odnožování až metání a byl počítán podle postupu **Justes et al. (1994)**:

$$N_{\text{krit}} = 5,35 * DM^{-0,442} \quad (DM = \text{suchá hmota v t/ha})$$

Z výsledků analýz byl rovněž počítán příjem N biomasou (kg/ha) = $DM * N_{\text{akt}} * 10$.

Těsně před sklizní byly ze stejných míst odebírány klasy z plochy 0,2 m² opět ve dvou opakováních pro zjištění výnosu zrna, obsahu N v zrnech, počtu klasů, objemové hmotnosti a hmotnosti tisíce zrn. Po sklizni byl v půdních vrstvách 0–30 a 30–60 cm stanoven obsah reziduálního N_{\min} . Ve vrchní vrstvě 0–30 cm byl zjištěn nižší obsah reziduálního N_{\min} po variabilní aplikaci hnojiv (74,1 kg N/ha) ve srovnání s uniformní aplikací (81,3 kg N/ha).



Obrázek 2. Dlouhodobý výnosový potenciál (2013–2019) a půdní typy šesti pokusných pozemků v oblasti Českomoravské vrchoviny.

V letech 2017, 2018 a 2020 byla na vybraných pozemcích (PB1, PB5 a PB6) měřena rychlost infiltrace vody do půdy (nasycená hydraulická vodivost K_s), a to tak, aby při měřeních byla zastoupena místa s různou propustností (tj. různé půdní typy/VP). Pro měření byly použity přetlakové infiltrometry na bázi Mariottovy lahve s dataloggerem OMEGA OM–PL420, který ukládal data měnící se výšky hladiny v zásobní nádrži infiltrometru měřené kapacitním čidlem (typ CLM s tyčovou elektrodou a referenční trubkou). Vyhodnocení dat bylo provedeno dle dvou- a tříparametrické Philipovy rovnice (**Philip 1985**) a výsledné hodnoty K_s představovaly průměry z obou použitých rovnic. V roce 2017 a 2018 byla K_s měřena na 9 různých místech na PB1, a to na třech různých půdních typech (KAm, KAr, KAg) ve 3–5 opakováních. V roce 2020 byla pro měření vybrána 4 místa na PB5 a 6 míst na PB6, v obou případech v 6 opakováních. Polovina míst obou PB byla na vyšších VP (>100 %), druhá polovina na nižších VP (< 100 %). Na všech měřených místech byly v orniční vrstvě odebrány půdní vzorky na stanovení zrnitosti (půdní textury) a rovněž byly odebrány Kopeckého válečky (ve 4 opakováních) pro analýzu fyzikálních půdních vlastností.

5.2 Dolní Jizera (Sojovice, Kochánky)

Sledování probíhala na provozních pozemcích v oblasti dolního Pojizeří, u obce Sojovice a Kochánky, v jižní části okresu Mladá Boleslav. Pozemky leží v nadmořské výšce 178–185

metrů, podniky jsou zaměřeny na rostlinnou výrobu, zvláště rané brambory a zeleninu, dále je zde zastoupena nezavlažovaná potravinářská pšenice, v menší míře cukrová řepa, jarní pšenice, hrách a další plodiny. Klimatický region oblasti je teplý mírně suchý (T2), dlouhodobý průměr dešťových srážek je okolo 530 – 546 mm, z toho za vegetaci okolo 335 mm, průměrná teplota je 9,2–9,4°C. Půdním typem jsou hlavně regozemě a fluvizemě (**Tab. 1b**). Vyskytují se zde lehké a střední půdy (hlavně písčitohlinité), s často písčitým nebo štěrkovitým podložím. Půdy v této oblasti byly vytvořené na kvartérních fluviálních a deluviálních sedimentech (**Kadlecová et al. 2018**) a vykazují silnou prostorovou variabilitu. Zájmové území zahrnuje zdrojovou oblast vodárny v Káraném, kde je pozorováno zvyšování obsahu dusičnanů. Jedním ze zdrojů dusičnanů může být lokálně zvýšený průsak a nižší využití dusíku (v důsledku nižších výnosů a vyplavení) v zónách se zvýšenou infiltrací. Současně jsou tyto půdy ze stejných důvodů často postiženy suchem. Pozemky jsou vesměs rovinné, místy mírně svažité (**Tab. 1b**). Celé zájmové území spadá do ZOD.

Na čtyřech vybraných pozemcích byl prováděn terénní průzkum půdy a porostů v síti odběrových bodů (**Haberle et al. 2018b, 2020b**). Na nezavlažovaném pozemku v Kochánkách byly v letech 2017–2019 pěstovány hrách na zrno, pšenice ozimá. Na pozemcích v Sojovicích se střídá nezavlažovaná pšenice ozimá se zavlažovanými bramborami. Pozice bodů sítě byla určena pomocí GPS, se zpřesněním pomocí pevné sítě RTK. Kromě řady dalších vegetačních znaků a agrochemických vlastností půdy byla v bodech určena biomasa nadzemních částí rostlin a výnos zrna (odběrem snopků) a byl stanoven obsah N ve slámě a v zrna. Dále bylo stanoveno zrnitostní složení a obsah skeletu vrstev ornice (0–30 cm) a podorničí (30–60 cm a 60–90 cm). Na základě uvedené pedotransferové funkce byla vypočtena PVK pro půdní vrstvy (**Novotný et al. 2000**).

Byla provedena analýza izotopů ^{13}C a ^{12}C v zrnech hrachu, pšenice a ječmene (z pokusů v obou zájmových oblastech) na přístroji Euro EA 3200 spojeném s izotopovým hmotnostním spektrometrem Isoprime (VÚRV, v.v.i.).

Letecké RGB snímky porostu cukrovky a pšenice v Kochánkách v letech 2015 a 2016 (GISAT, s. s r.o.) a RGB snímky pšenice v Sojovicích v roce 2017 pořízené pomocí dronu byly využity pro výpočet jednoduchého indexu stavu porostu ExG (Excess Green) = $2 \cdot G - R - B$ (**Woebbecke et al. 1995, Hamuda et al. 2016**). Pomocí regresních vztahů mezi RGB a vodní kapacitou vrstev půdy byly vytvořeny mapy PVK pro celou plochu pozemků (**Haberle et al. 2018b**).

Tabulka 1a. Vybrané pokusné pozemky na Českomoravské vrchovině (ZD Kojčice).

Půdní blok	č. PB v LPIS	BPEJ (převažující)	Plocha (ha)	Nadm. v. (m n.m.)	Sklon (°)	Rozpětí VP (%)	pH (KCl) 0–60 cm	Půdní druhy	Půdní typy
PB1 (Dehtáře)	1708/3	7.29.14, 7.50.11 7.29.11 7.37.16	25,3	523,9	4,2	90–115	4,8	p, hp, ph	KAm, KAg, KAr, PGm
PB2 (Svépravice)	3406/1	7.29.01, 7.29.11 7.29.04, 7.29.14	41,4	530,6	2,6	70–120	4,9	p, hp, ph	KAm, KAm(g'), KAs, PGm, RNk
PB3 (Kojčice)	2905/2	7.29.01, 7.29.11 7.32.01, 7.37.15	26,5	515,0	4,4	85–110	5,0	p, hp, ph	KAm, KAm(g'), KAr, KAs, RNk
PB4 (Krasíkovice)	5005/9	7.29.01, 7.37.15	10,2	550,0	2,8	80–120	4,7	p, hp, ph	KAm, KAr, KAs, RNk
PB5 (Kojčice)	2702/4	7.29.01, 7.29.14 7.32.01, 7.37.15	12,1	487,6	3,5	80–110	5,1	p, hp, ph	KAm
PB6 (Krasíkovice)	5905/4	7.29.11, 7.32.04 7.32.11, 7.32.14	18,2	543,9	3,7	80–105	5,0	p, hp, ph	KAm

Tabulka 1b. Vybrané pokusné pozemky v oblasti dolní Jizery (Předměřická a.s., farma Sojovice).

Půdní blok	č. PB v LPIS	BPEJ (převažující)	Plocha (ha)	Nadm. v. (m n.m.)	Sklon (°)	Rozpětí VP (%)	pH (KCl) 0–60 cm	Půdní druhy	Půdní typy
PB1 (Kochánky)	3505/1	2.56.00 2.21.10	15,6	185,4	1,22	85–105	6,0	p, hp, ph	FLr, FLm, RGy, HNm
PB2 (Sojovice)	6002/1	2.21.10	5,77	178,1	1,58	85–110	6,0	p, hp, ph, h	RGry, RGr, FLr, FLm, KO
PB3 (Sojovice)	7107/19	2.21.10 2.56.00	20,8	176,4	9,87	85–110	6,3	hp, ph, h	RGry, RGr, RGmy, FLr, FLm
PB4 (Sojovice)	6003/7	2.56.00 2.21.10	10,1	179,4	1,60	85–115	5,8	p, hp, ph, h	RGry, RGr, RGm, RGmy, FLm

Vysvětlivky půdních druhů a typů (ostatní jsou na konci publikace): h – hlinitá, hp – hlinitopísčité, p – písčité, ph – písčitohlinitá, FLm – fluvizem modální, FLr – fluvizem arenická, HNm – hnědozem modální, KAr – kambizem arenická, KAm – kambizem modální, KAm(g') – kambizem modální slabě oglejená, KAg – kambizem oglejená, KAs – kambizem rankerová, KO – koluvizem, PGm – pseudoglej modální, RNk – ranker kambický, RGr – regozem arenická, RGry – regozem arenická psefitická, RGm – regozem modální, RGmy – Regozem modální psefitická, RGy – regozem psefitická

6. Využití metod DPZ pro hodnocení půdní variability

Růst rostlin je komplexně ovlivněn množstvím faktorů, které působí v části nadzemní, v ornici i podorničních vrstvách půdního profilu. Řada postupů PZ se však zaměřuje na vliv prostorové variability povrchové – orniční vrstvy půdy. Jde především o obsah přístupných živin a organické hmoty, vodní kapacitu a aktuální vlhkost půdy. Prostorovou variabilitu růstu a výnosu však významně ovlivňují i podorniční vrstvy až do hloubky růstu kořenů, která u většiny hlavních plodin může dosáhnout 100 a více cm (Svoboda et al. 2018). V hlubších vrstvách půdy se nacházejí vyplavené pohyblivé živiny (dusičnanový N, vápník, hořčík, síra, draslík) a v suchých letech je zde konzervována zásoba vody, kterou porost růstem kořenů postupně odčerpává. Dokladem toho jsou vztahy mezi vodním režimem, PVK, obsahem N a výnosem, které byly prokázány v oblasti dolní Jizery i Českomoravské vrchoviny v letech 2017–2019 (Haberle et al. 2020 a, c). Korelační koeficienty (r) mezi PVK ornice (0–30 cm) a výnosem pšenice nebo hrachu v oblasti dolní Jizery se pohybovaly mezi 0,4–0,6, zatímco vztahy mezi PVK podorničních vrstev (30–90 cm) nebo průměrné PVK vrstvy 0–90 cm byly těsnější ($r = 0,7–0,9$). V oblasti Českomoravské vrchoviny, kde byla PVK sledována ve vrstvě 0–60 cm, byly korelační koeficienty mezi PVK a výnosem zrna v rozmezí 0,5–0,8 (Tab. 2). To je důsledek významu odlišné zásoby vody v podorničí pro překonání období sucha, což je v Tab. 2 doloženo pozitivní korelací mezi hodnotami $\Delta^{13}\text{C}$ a PVK, kdy na místech s nižší PVK byla prokázána vyšší míra vodního stresu (nižší hodnoty $\Delta^{13}\text{C}$). V extrémně suchém roce 2018 byla také prokázána silná negativní korelace mezi výnosem zrna, obsahem N v zrna a $\Delta^{13}\text{C}$, což značí, že na místech s vyšším výnosem, PVK a dostupností půdní vody klesala koncentrace N v zrna v důsledku tzv. ředícího efektu. Avšak v Sojovicích a v Kochánkách v roce 2020 optimální srážky v generativním období tyto systematické závislosti částečně narušily (Tab. 2). Slabší porosty na místech s písčitou půdou – oproti předchozím letům – pokračovaly v růstu a přijatý N byl ředěn. To ukazuje na zásadní význam údajů o dostupnosti vody pro správnou interpretaci dopadů variability a nastavení odpovídajících agrotechnických opatření. Podobně byly prokázány silnější vztahy mezi vegetačním indexem porostů plodin z leteckých/UAV snímků (Obr. 14) a PVK pro podorniční vrstvy než pro ornici (Haberle et al. 2018b, 2020b). **Rostlina sama je tedy nejlepší ukazatel prostorové půdní variability.**

Identifikace fyziologických a morfologických projevů zemědělských plodin prostřednictvím DPZ má tudíž velký potenciál pro operativní i dlouhodobé postupy v rámci PZ. Správná interpretace zachycených projevů je zásadní. Např. rozdíly v obsahu chlorofylu a souvisejícího obsahu N v listech plodin identifikované pomocí DPZ mohou být způsobeny různými propojenými faktory. Rostliny, které mají nedostatek vody na další růst a zředění přijatého N (a dalších živin), mohou mít vyšší obsah N, zatímco optimální podmínky pro růst imitují po určitou dobu nedostatek N, který však nelze zaměňovat s nedostatečnou výživou. Vhodnějším řešením je použití indexu výživy dusíkem NNI (kap. 5.1), který informuje o aktuální míře zásobenosti porostu N na základě zohlednění zředovacího efektu.

Zranitelnost suchem daná nízkou hodnotou PVK je jedním z hlavních faktorů pro vyhodnocení dat DPZ a současně i pro správné nastavení agrotechniky pro minimalizaci

případných negativních dopadů na životní prostředí/kvalitu vod. U velké části pozemků v ČR existuje vysoká variabilita půdních podmínek, která je dobře patrná i na volně dostupných leteckých snímcích. Agronomové vidí dopady této variability v každodenní praxi, zejména při nedostatku nebo nadbytku vody. Mapy půdních podmínek a agrochemické zkoušení zemědělských půd (AZZP), které mají v zemědělských podnicích k dispozici, nepopisují prostorové rozdíly v dostatečném měřítku pro aplikaci postupů PZ a vymezení tzv. management zón.

I v podnicích, kde nemají k dispozici výnosové mapy, lze získat data pro efektivnější aplikaci organických a minerálních hnojiv. Lze doporučit určení základních znaků ornice a podorničí, tj. zrnitosti půdy, obsahu humusu, poměru C:N, pH a dostupných živin především v zónách pozemků, které opakovaně vykazují výrazně odlišný růst plodin. Zrnitost půdy a obsah humusu určují z velké míry schopnost půdy zadržet vodu. Tyto vlastnosti se mění jen velmi pomalu a je proto možné si problematické pozemky mapovat postupně v průběhu let. Vodní kapacita ornice a podorničí je podkladem jak pro odhad nástupu stresu, tak rizika vyplavení dusičnanů, které lze provádět i na základě dat dostupných v provozních podmínkách (**Haberle et al. 2015**). Nezbytné údaje o srážkách a teplotě, potřebné pro výpočet bilance vody, jsou dnes dostupné na stránkách ČHMÚ (www.chmi.cz); nejlépe je mít vlastní data blízko hodnoceným pozemkům. Dopady prostorové variability pozemků si lze odhadnout na základě odběru vzorků rostlin z kontrastních míst pozemků a určení třeba výšky rostlin, výnosu, obsahu N v zrnu nebo hmotnosti bulev.

I bez specializované mechanizace a výnosových map lze na základě vztahu vodní kapacity půdy a běžných RGB snímků pozemků, kde se projevuje variabilní dopad sucha, určit zóny pro odlišné dávkování N a další agrotechnická opatření. Tyto empirické postupy budou nejspolehlivější v lokalitách s velkou variabilitou zrnitostního složení půdy a častým výskytem vodního stresu, který limituje výnosy. V lokalitách a letech s vyššími srážkami se budou na variabilitě výnosů více podílet rozdíly v obsahu dostupných živin, lokální utužení či zamokření půdy, nerovnoměrné zasakování vody nebo mikroklimatické podmínky. Postupy PZ však umožňují mnohem přesněji přizpůsobit agrotechniku pěstování a zvýšit efektivnost využití hnojiv a dalších vstupů. Zvýšená efektivita využití N aplikovaného v PZ v závislosti na využití nástrojů DPZ byla např. doložena v pracích **Scharf et al. (2002)** a **Khosla et al. (2002)**. Celková spotřeba N hnojiv při variabilní aplikaci však nemusí být vždy nižší než u uniformního hnojení, jeho spotřeba je však optimalizována. Ideálními plodinami pro variabilní hnojení jsou obiloviny z důvodu hustě zapojeného porostu, jehož stav je pomocí DPZ dobře postihnutelný.

Tabulka 2. Korelační koeficienty z lineární regresní analýzy vztahů mezi diskriminací ^{13}C ($\Delta^{13}\text{C}$), obsahem N v semenech (Obsah N), výnosem zrna (Výnos) a polní vodní kapacitou (PVK). VAR - hnojeno variabilně, UNI - hnojeno uniformně, *- statisticky průkazné na hladině významnosti 0,05.

Oblast	Lokalita	Rok	Korelační koeficienty														
			$\Delta^{13}\text{C}$ x Výnos			$\Delta^{13}\text{C}$ x PVK			PVK x Výnos			Obsah N x $\Delta^{13}\text{C}$			Obsah N x Výnos		
			Vše	VAR	UNI	Vše	VAR	UNI	Vše	VAR	UNI	Vše	VAR	UNI	Vše	VAR	UNI
Českomoravská vrchovina	Svépravice	2017	0,76*	0,84*	0,66*	0,46*	0,68*	0,18	0,54*	0,55*	0,48	-0,61*	-0,39	-0,88*	-0,33	-0,11	-0,72*
	Krasíkovice	2018	0,88*	0,94*	0,87*	0,75*	0,95*	0,58	0,84*	0,99*	0,67	-0,80*	-0,74*	-0,89*	-0,77*	-0,82*	-0,76*
	Kojčice	2018	0,94*	0,93*	0,97*	0,63*	0,64*	0,52	0,68*	0,69*	0,54	-0,81*	-0,86*	-0,77*	-0,70*	-0,71*	-0,76*
	Svépravice	2019	0,24			0,17			0,64*			-0,78*			0,09		
	Kojčice	2020	0,35	0,35	0,34	0,39	0,04	0,35	0,09	0,33	-0,30	0,25	0,45	-0,02	0,14	0,38	-0,42
	Krasíkovice	2020	0,78*	0,72*	0,80*	0,00	-0,07	-0,10	0,00	-0,23	0,07	0,02	0,21	-0,47	-0,23	-0,21	-0,49
Dolní Jizera	Kochánky	2017	0,89*			0,88*			0,88*			-0,78*			-0,74*		
		2018	0,88*			0,97*			0,85*			-0,36			-0,61		
		2019	0,93*			0,91*			0,87*			-0,78*			-0,70*		
		2020	0,80*			0,83*			0,80*			0,23			0,30		
	Sojovice	2017	0,84*			0,74*			0,69*			-0,50*			-0,64*		
		2018	0,94*			0,79*			0,76			-0,98*			-0,96*		
		2019	0,90*			0,82*			0,80*			-0,48*			-0,37		
		2020	0,66			0,73			0,53			-0,68			-0,26		

Poznámka: PVK z hloubky půdního profilu 0–90 cm (dolní Jizera), resp. 0–60 cm (Českomoravská vrchovina)

6.1 Kritické zdrojové oblasti

Kritické zdrojové oblasti jsou místa, kde půda má vyšší propustnost a nízkou retenci pro vodu (**Duffková et al. 2012, Brom et al. 2017, Haberle et al. 2018b**) a v souvislosti s vyšší zranitelností k vyplavování znečišťujících látek (živin – hlavně dusičnanů či reziduí pesticidů) se stávají plošnými zdroji znečištění vod. Obzvláště riziková je návaznost kritických zdrojových oblastí na intenzivní odvodnění trubkovou drenáží (v ČR 1,1 mil. ha zemědělské půdy), která může vést ke zrychlenému odtoku vody a odnosu znečišťujících látek (**Doležal a Kvítek 2004, Fučík et al. 2015, Fučík et al. 2017**).

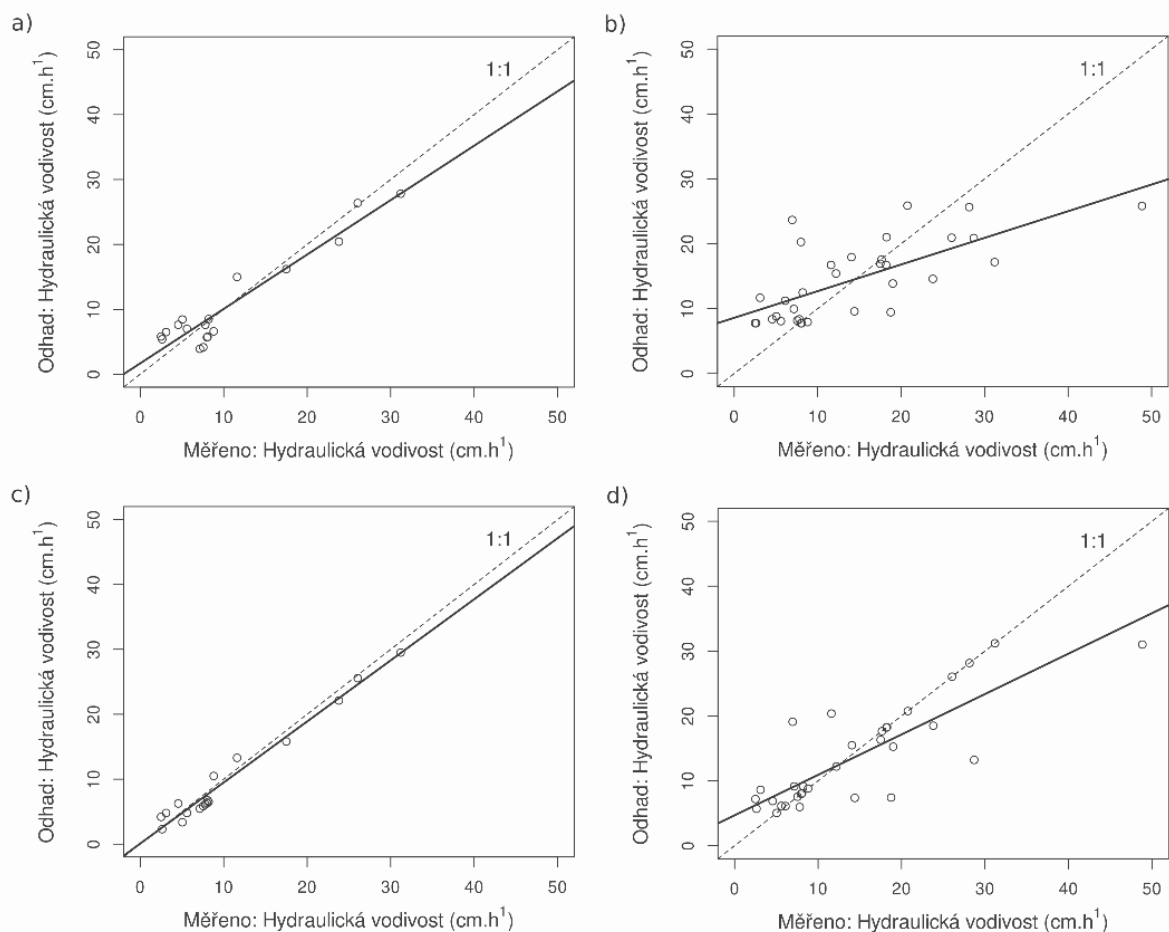
Vedle identifikace ploch se zvýšenou propustností založené na bodovém měření hydraulické vodivosti půdy, respektive rychlosti infiltrace vody do půdy, je možné využít metody DPZ. V principu lze odvodit infiltrační schopnosti půd na základě prostorové distribuce vlhkostních charakteristik. DPZ umožňuje odhadnout vlhkost půdy pomocí radarových dat. K tomuto účelu jsou využívány především satelitní radarová data (např. ASMR2, ESA-CCI) nebo vícezdrojové syntetické produkty založené na radarových datech, např. ERA5 a GLDAS (**Yang et al. 2021**). Nevýhodou uvedeného přístupu je především velmi nízké prostorové rozlišení, které neumožňuje využití dat pro zemědělské účely. Další možností je využití schopnosti fyziologické reakce plodin na nedostatek dostupné půdní vody v rhizosféře, kterou lze identifikovat pomocí termálních a spektrálních dat DPZ. Projevem porostu je zde vodní stres, který se primárně vyznačuje rozdíly v intenzitě transpirace, a tedy ve změnách energetické výměny na povrchu porostu. Z dlouhodobého hlediska dochází vlivem změn vodního režimu propustných půd k morfologickým změnám rostlin a ke změnám ve využití živin, např. dusíku (viz úvodní část kap. 6).

Analýza prostorové distribuce infiltračních vlastností půd na pokusných plochách na Českomoravské vrchovině a dolní Jizeře byla založena na porovnání dat měřených v terénu postupem uvedeným v kapitole 5.1 a ukazatelů vypočtených z leteckých snímků. Byly použity hyperspektrální termální letecké snímky s prostorovým rozlišením 5 m snímané pomocí letecké laboratoře FLIS Ústavu výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. v termínech 28. 5. 2017 a 27. 5. 2018 (Českomoravská vrchovina – PB1, PB5 a PB6) a 29. 5. 2018 (dolní Jizera - Kochánky). Podrobnosti k technické specifikaci lze nalézt na stránkách FLIS (<http://olc.czechglobe.cz/>). Prostorová distribuce intenzity vodního stresu na pokusných plochách byla založena na výpočtu plodinového stresového indexu (CWSI – crop water stress index, **Jackson et al. 1981**). Protože efekt občasného nedostatku vodní vláhly může mít vliv na morfologické charakteristiky porostu, jako je rozvoj biomasy a listová pokryvnost, byl jako kompenzační efekt použit spektrální vegetační index MSAVI (**Qi et al. 1994**). Výpočet obou indexů byl proveden pomocí software SEBCS (**Brom 2012-2021**).

Jak bylo naznačeno výše, na výsledný odhad infiltrační schopnosti půd může mít vliv celá řada faktorů, jako jsou např. variabilita jednotlivých pozemků a časové odlišnosti. Ty lze do určité míry kompenzovat komplexnějšími přístupy analýzy dat, především využitím multiparametrických přístupů. Vhodným přístupem je buď využití mnohonásobných regresních metod založených na lineárních modelech nebo využití nelineárních

multiparametrických metod. Druhou skupinu tvoří především metody založené na principech umělé inteligence označované jako metody strojového učení (Machine Learning Methods).

V současné době se používá celá řada metod, jako jsou metody založené na umělých neuronálních sítích (ANN), metody Random Forest apod. Pro účely odhadu řady parametrů ze spektrálních dat lze doporučit metodu Support Vector Regression (SVR) založenou na metodě Support Vector Machine (SVM). Výhodou metody je možnost automatického hledání nejvhodnějšího modelu, relativní nenáročnost na objem použitých kalibračních dat a v literatuře zmiňovaná vysoká kvalita predikčních modelů (viz např. **Zaghloul et al. 2020**, **Khosravi et al. 2017**).



Obrázek 3. Porovnání měřených hodnot hydraulické vodivosti půd s hodnotami odhadnutými pomocí nelineární regresní metody SVR. Odhad na základě plodinového vodního stresového indexu (CWSI) pro lokalitu PB1 (Dehtáře, a) a pro všechny sledované lokality ve sledovaných termínech (b). Odhad na základě kombinace indexu CWSI a spektrálního vegetačního indexu MSAVI pro lokalitu PB1 (c) a pro všechny sledované lokality ve sledovaných termínech (d).

Využití metody SVR pro pokusné plochy ukázalo, že mezi měřenými hodnotami rychlosti infiltrace vody a indexem CWSI existuje silná nelineární závislost, která je nicméně specifická pro jednotlivé lokality. Např. pro lokalitu Dehtáře (PB1) byl zjištěn koeficient determinace $R^2 = 0,93$ (**Obr. 3a**), společná hodnota pro všechny plochy a termíny snímkování

je nicméně významně nižší ($R^2 = 0,48$; **Obr. 3b**). Řešením rozdílů mezi plochami je využití spektrálního vegetačního indexu MSAVI v regresním modelu. Model zahrnující oba indexy jako prediktivní faktory vykázal lepší výsledek predikce infiltračních vlastností půd oproti jednofaktorovému modelu. Pro lokalitu PB1 je výsledek regresního vztahu $R^2 = 0,97$ (**Obr. 3c**), pro všechny lokality společně pak $R^2 = 0,70$ (**Obr. 3d**).

Měření hydraulické vodivosti půd je značně technicky, časově i finančně náročné, proto lze jako ukazatel infiltrační schopnosti půd použít hodnotu PVK. Odhad hodnot PVK s využitím metody SVR obdobným způsobem jako v předchozím případě ukázal poněkud odlišný výsledek. V první řadě je patrná značná variabilita mezi jednotlivými plochami. Možnost kompenzace pomocí indexu MSAVI nevykázala předpokládaný efekt, přičemž rozdíly jsou značné i v závislosti na hloubce analyzovaného profilu. V modelech byl použit též index NDMI (**Jin a Sader 2005**), který je ukazatelem povrchové vlhkosti. Výsledky porovnání mezi měřenými hodnotami PVK (vypočtenými z hodnot zrnitosti podle rovnice v kap. 5.1) a hodnotami odhadnutými pomocí dat DPZ jsou uvedeny v **Tab. 3**.

Tabulka 3. Souhrn statistického odhadu hodnot PVK na základě dat DPZ a metody SVR a jejich porovnání s měřenými daty PVK pro různé hloubky půdního profilu. Pro odhad hodnot PVK byla použita kombinace CWSI a spektrálních indexů MSAVI a NDMI.

Profil	Lokalita	F-test	df	R ²	R ² adj	p	RMSE
0,0 – 0,3 m	PB1 (Č.V.)	241,7	24	0,91	0,91	***	0,96
	PB2 (Č.V.)	194,1	20	0,91	0,90	***	0,90
	PB3 (Č.V.)	49,8	21	0,70	0,69	***	1,74
	PB4 (Č.V.)	31,1	9	0,78	0,75	***	1,17
	PB5 (Č.V.)	57,5	18	0,76	0,75	***	1,17
	PB6 (Č.V.)	11,5	19	0,38	0,34	**	2,17
	PB1 (D.J.)	15,5	19	0,45	0,42	***	1,99
	PB2-4 (D.J.)	16,7	21	0,44	0,42	***	3,17
	Vše	107,5	165	0,39	0,39	***	2,58
0,3 – 0,6 m	PB1 (Č.V.)	3,4	19	0,15	0,11	n,s,	4,83
	PB2 (Č.V.)	1996,0	20	0,99	0,99	***	0,37
	PB3 (Č.V.)	25,4	21	0,55	0,53	***	3,40
	PB4 (Č.V.)	39,6	9	0,81	0,79	***	2,00
	PB5 (Č.V.)	27,1	18	0,60	0,58	***	2,61
	PB6 (Č.V.)	10,6	19	0,36	0,32	**	3,64
	PB1 (D.J.)	107,5	19	0,85	0,84	***	2,54
	PB2-4 (D.J.)	33,5	21	0,61	0,60	***	3,95
	Vše	87,6	160	0,35	0,35	***	4,27
0,0 – 0,6 m	PB1 (Č.V.)	6,0	19	0,24	0,20	*	3,26
	PB2 (Č.V.)	172,7	20	0,90	0,89	***	1,03
	PB3 (Č.V.)	42,3	21	0,67	0,65	***	2,22
	PB4 (Č.V.)	43,7	9	0,83	0,81	***	1,34
	PB5 (Č.V.)	46,5	18	0,72	0,71	***	1,19
	PB6 (Č.V.)	17,4	19	0,48	0,45	***	2,35
	PB1 (D.J.)	77,0	19	0,80	0,79	***	2,12
	PB2-4 (D.J.)	23,5	21	0,53	0,51	***	3,55
	Vše	91,5	160	0,36	0,36	***	3,11

Č.V. – Českomoravská vrchovina, D.J. – dolní Jizera, df – stupeň volnosti, R² – koeficient determinace, R² adj – koeficient determinace upravený, p = hladina významnosti, RMSE - střední kvadratická chyba (Root Mean Square Error), n.s. – statisticky neprůkazné (not significant)

Výsledky ukazují, že v souhrnu byl nejlepší odhad hodnot PVK pro všechny plochy zjištěn pro celkový profil půdy 0–60 cm. Výsledky pro orniční profil (0–30 cm) a podorničí (30–60 cm) ukazují dost významné rozdíly pro jednotlivé plochy. Rozdíl je patrný zejména na lokalitě PB1 (Dehtáře), kde je v orniční vrstvě hodnota $R^2 = 0,91$ a v podorničí $R^2 = 0,15$. Tento rozdíl přisuzujeme značné půdní heterogenitě lokality, dané mimo jiné výskytem oglejených a glejových půd s nepropustným podorničím a dále vlivu systematického odvodnění, které mělo za důsledek převrácení půdních horizontů v období výstavby drenážního systému. Opačná situace byla zjištěna na lokalitě PB2 (Svépravice), kde bylo provedeno systematické odvodnění pouze na malé části plochy, a na ploše nejsou přítomny oglejené půdy. Překvapivě nízká korelace byla zjištěna pro lokality PB6 (Krasíkovice) a Sojovice pro všechny hodnocené varianty, naopak výsledek pro lokalitu Kochánky koresponduje se zjištěními uvedenými výše, tedy, že odhad pro orniční část horizontu vykazuje horší výsledek oproti hodnocení podorničí a celého půdního profilu.

Z uvedených analýz vyplývá, že plodiny velmi dobře odrážejí stav půdy a jejich hydrologických (infiltračních) vlastností.

6.2 Podkladové mapy pro variabilní aplikaci dusíkatých minerálních hnojiv

Podkladové mapy pro variabilní hnojení vycházejí z kombinace dlouhodobého VP a aktuálního výživového stavu porostu zjištěného z družicových nebo UAV snímků těsně před aplikací hnojiva (Lukas et al. 2020a). Základním nástrojem DPZ pro tvorbu podkladových map pro variabilní aplikaci hnojiv jsou tzv. vegetační indexy.

6.2.1 Vegetační indexy

Vegetační indexy jsou založené na odrazivosti ve dvou i více pásmech elektromagnetického spektra (Fu et al. 2014, Li et al. 2014a). Lze z nich získat informace o množství biomasy, obsahu chlorofylu (koreluje s obsahem N) a zásobenosti porostu dusíkem a tím diagnostikovat výživový stav a stresové projevy porostu. Pro odvození vegetačních indexů bylo vytvořeno velké množství algoritmů a většina z nich je založena na odrazivosti (reflektanci) v červeném (RED, 630–690 nm) a blízkém infračerveném (near-infrared NIR, 770–1300 nm) spektru, ale je využívána i odrazivost v zeleném (510–580 nm), modrém (450–510 nm), žlutém (585–625 nm) nebo krátkovlnném infračerveném spektru (short wave-infrared SWIR, 1300–2500 nm) (Tab. 4). Zjednodušeně řečeno odrazivost v NIR oblasti má spojitost s buněčnými stěnami porostu a koreluje s množstvím biomasy, odrazivost v RED oblasti souvisí s množstvím chlorofylu v listech horního patra. Čím více je biomasy a chlorofylu, tím větší je odrazivost v NIR spektru a nižší odrazivost v RED spektru. Standardně používaným vegetačním indexem je NDVI (Rouse et al. 1974, Příloha 1), který však při indexu listové plochy (m^2 listové plochy/ m^2) větším než 2–3 je téměř neměnný, tj. satureovaný. Důvodem saturačního efektu je, že odrazivost RED záření má povrchový charakter a po dosažení určitého

množství N (chlorofylu) v biomase (**Cao et al. 2015** uvádí 135 kg N/ha) je odrazivost RED záření minimální (absorbance maximální) a tento stav zůstává konstantní i při dalším zvyšování biomasy. Naopak odrazivost NIR záření se nárůstem biomasy stále zvyšuje a jeho absorpce je nepatrná. Vysoká úroveň výživy dusíkem rovněž přispívá k saturaci v RED odrazivosti. Saturační efekt lze redukovat použitím odrazivosti v úzkém pásmu tzv. **RED-edge (RE)** oblasti (700–750 nm, **Van Beek et al. 2013**), které vykazuje vyšší citlivost na změny v obsahu chlorofylu a množství biomasy. Na RED-edge odrazivosti je založen např. vegetační index **REIP** (Red Edge Inflection Point, **Guyot et al. 1988, Příloha 1**). Odrazivost v RED-edge pásmu projevuje prudký nárůst, který se se zvyšujícím obsahem chlorofylu posunuje do vyšších vlnových délek a naopak. **Mistele a Schmidhalter (2008)** zjistili dobrou korelaci mezi REIP a příjmem N, resp. NNI. Na odrazivosti v RED-edge pásmu jsou založeny i jiné vegetační indexy, např. LCI, MCARI, NDRE, NRERI, NPDI, RENDVI, které jsou obecně robustní pro odhad příjmu N (**Li et al. 2012, Li et al. 2013, Cilia et al. 2014, Huang et al. 2015, Tab. 4**). Vyšší citlivost ke změnám chlorofylu vykazují i vegetační indexy založené na odrazivosti v zeleném spektru, např. GNDVI, GRDVI, MTVI2 aj. (**Li et al. 2012, Li et al. 2014b, Cao et al. 2015, Tab. 4**).

Tabulka 4. Vybrané vegetační indexy zjišťované v modré (B), zelené (G), červené (RED), RED-edge (RE), blízké infračervené (NIR), krátké infračervené (SWIR) a žluté (Y) části spektra.

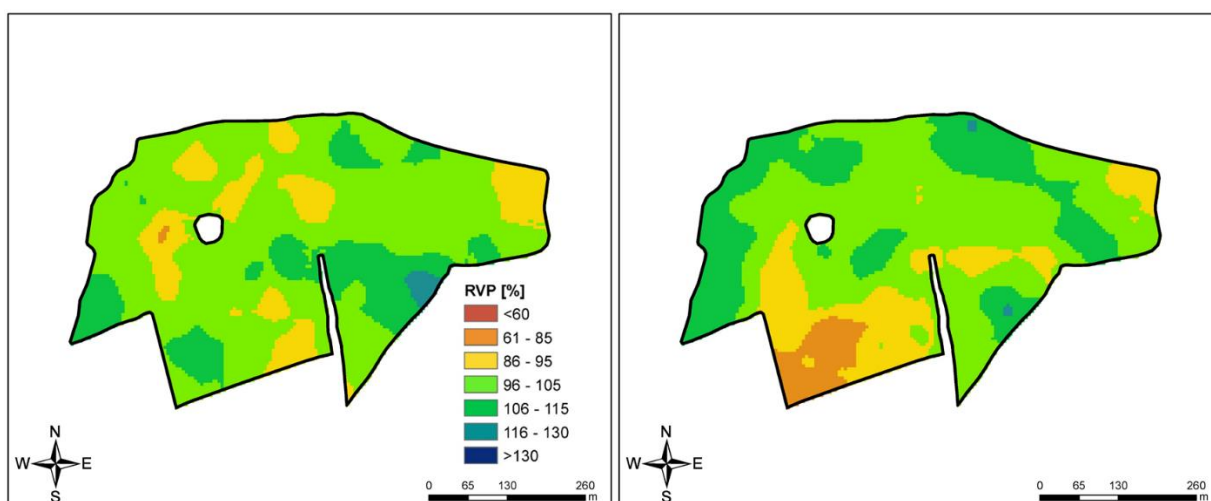
Spektrum	Vegetační index
RED, NIR	NDVI, EVI2, RDVI, RVI, REDVI, SAVI, OSAVI, MRESAVI, MSAVI2, RESAVI, CIRE, SRI, MSR
B, RED, NIR	EVI
B, RED	NPCI
NIR, SWIR	NDWI
SWIR	NDNI
G, RED a NIR	MTVI2, TVI, MCARI, MTCARI
G, NIR	GNDVI, GDVI, GSAVI, MGSAMI, GRDVI, GWDRVI, MSR_G, GRVI, GSAVI
RED, RE	REIP, NRERI, LCI, ChI, NRI
RED, RE, NIR	REIP, NRERI, LCI, ChI, NRI
RE, NIR	NDRE, NPDI
G, RE, NIR	NGI, NREI, MDD, MEVI, NNIR, NMDRE
G, Y	PRI

Plošný monitoring výživového stavu porostů pomocí vegetačních indexů tvoří nedílnou součást PZ. Pro tento účel jsou využívány vegetační indexy z družicových, UAV a leteckých snímků, příp. sensorového monitoringu. Dynamický vývoj UAV v poslední době předurčuje tento systém pro rychlé a levné zhodnocení výživového stavu porostů ve vysokém prostorovém rozlišení (v řádu cm) (**Horniaček et al. 2020**).

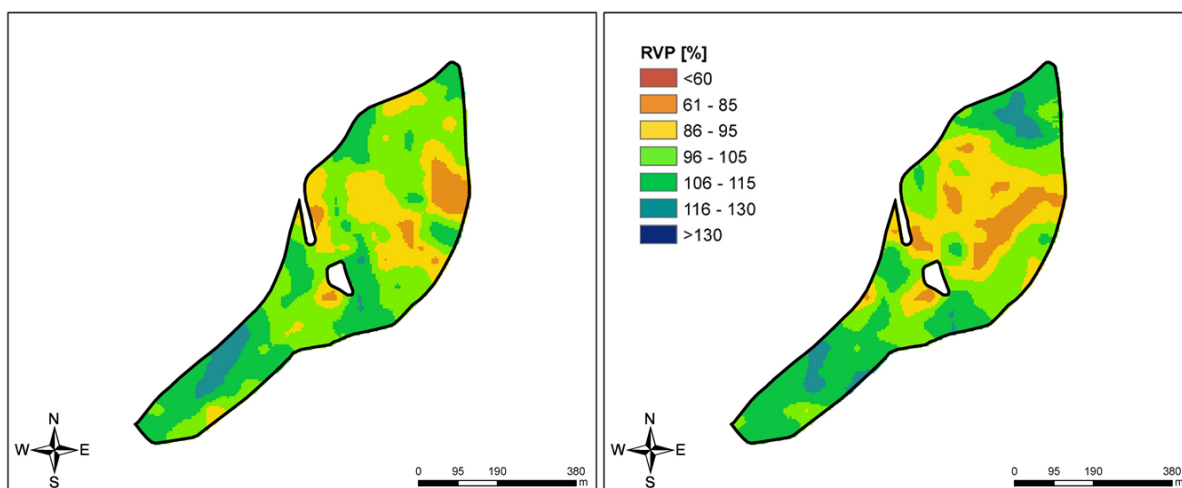
6.2.2 Postup pro podkladové mapy variabilního hnojení

Nejvhodnějším podkladem pro mapy variabilního hnojení jsou víceleté výnosové mapy, které však nebývají často k dispozici. Jako alternativu pro tvorbu těchto map lze zvolit relativní VP (RVP) daného pozemku odvozený z časové řady družicových snímků (Lukas et al. 2018). Autoři metodiky vytvořili RVP z 8–letého průměru vegetačního indexu EVI (Enhanced vegetation index, Příloha 1) z vhodně vybraných družicových snímků (bezoblačné dny v období květen a červen, Landsat 8, Sentinel 2A, B) zahrnující období s různou (i extrémní) půdní vlhkostí s odlišným projevem půdní variability.

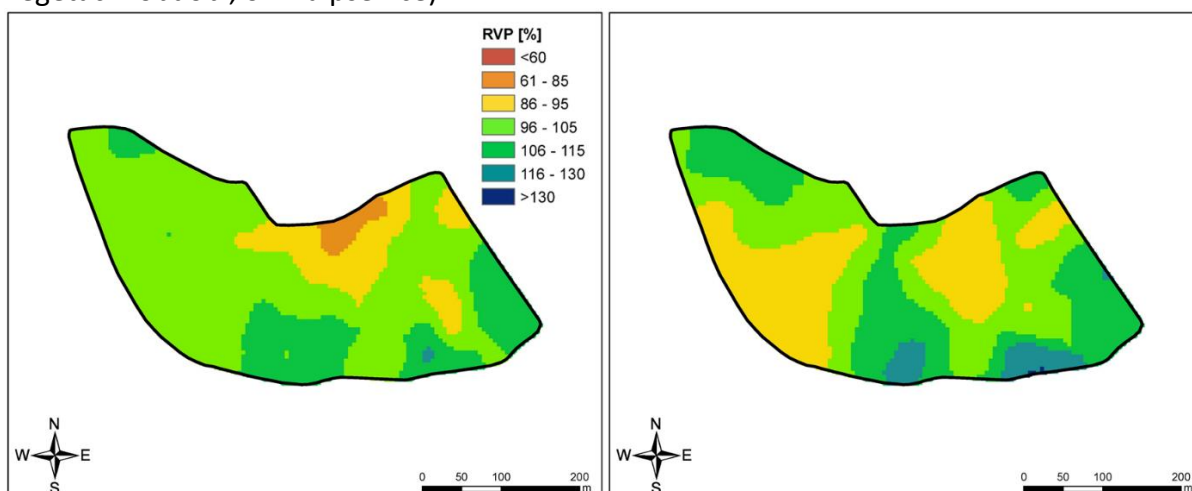
Do podkladové mapy pro variabilní hnojení by měl být promítnut i aktuální výživový stav porost, který přináší informaci o projevu vlhkostních podmínek daného ročníku. Sucho často projev půdní variability zvýrazňuje, tzn., že se více uplatňuje vliv retence vody v půdě na příjem živin a tvorbu výnosu. Vlhčí podmínky stírají vliv plošné půdní variability a příjem vody, živin i výnos plodiny je tak plošně rovnoměrnější. Obrázky 4-6 zobrazují tři PB z pokusných sledování na Českomoravské vrchovině, kde je porovnáváno procentuální rozložení RVP z vegetačního indexu EVI z dostupných družicových scén z května a června z let s odlišným průběhem srážek. Snímky z relativně sušších let (vpravo) vykazují větší variabilitu, tzn., že je zastoupeno více kategorií RVP (Obr. 4 vpravo) a plocha s průměrným RVP (96-105 %) je menší než je tomu v letech relativně vlhčích (vlevo).



Obrázek 4. Procentuální rozložení RVP z vybraných družicových scén pro PB1 v roce 2016 (vlevo, srážkově optimální rok, jarní ječmen) a 2017 (s vodním deficitem v květnu a červnu, ozimá pšenice).



Obrázek 5. Procentuální rozložení RVP z vybraných družicových scén pro PB3 v roce 2017 (vlevo, s vodním deficitem v květnu a červnu, jarní ječmen) a 2018 (s vodním deficitem po celé vegetační období, ozimá pšenice).

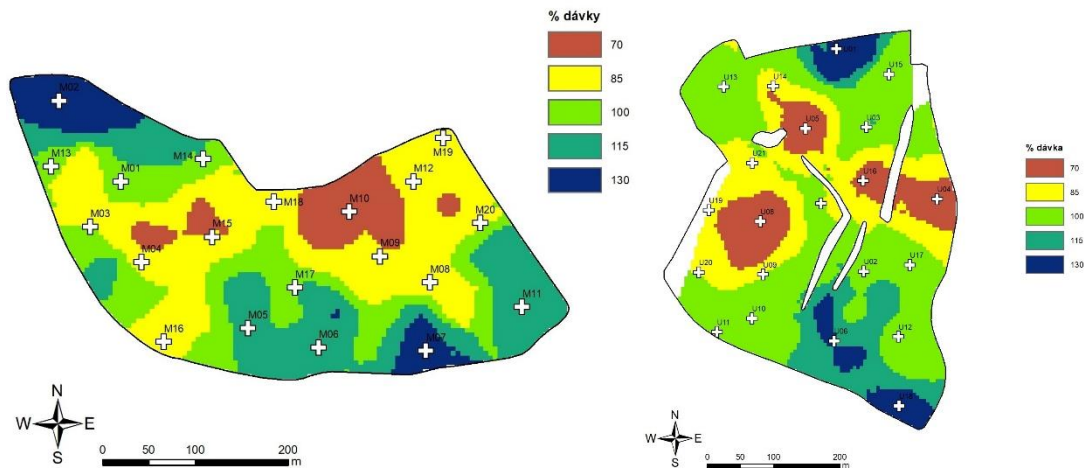


Obrázek 6. Procentuální rozložení RVP z vybraných družicových scén pro PB5 v roce 2020 (vlevo, s vodním deficitem v dubnu) a 2018 (s vodním deficitem po celé vegetační období) pro ozimou pšenici.

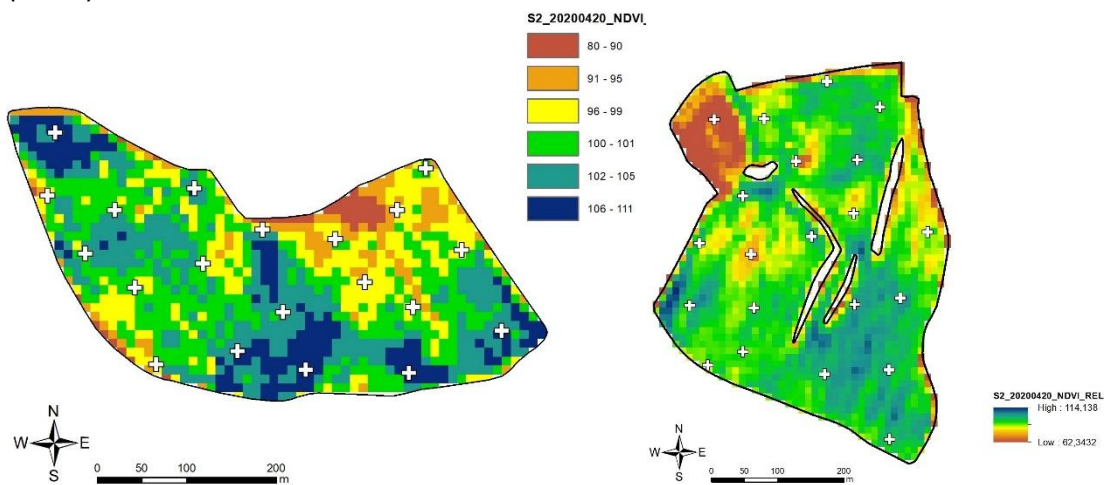
Podkladové (aplikační) mapy pro variabilní hnojení jsou vytvářeny v geoinformačním systému a pomocí PC techniky propojeny s terminálem rozmetadla. Relativní výnosový potenciál se do aplikační mapy promítá v podobě tzv. produkčních (management) zón, které představují části pozemků se stejnou produkční schopností. Aplikační mapy tedy obsahují zóny s výnosově průměrným (100%), podprůměrným (< 100 %) či nadprůměrným (> 100%) porostem, ale z toho nevyplývá jednoznačná volba principu variabilní aplikace. Na základě aditivního (posilujícího) principu se aplikují vyšší dávky na úrodnějších částech s vyšším dlouhodobým VP a nižší dávky hnojiv na částech méně úrodných. Existuje i opačný přístup (kompenzační), kdy se aplikují vyšší dávky pro podporu slabších porostů a snížené dávky pro dobrý porost (**Guerrero et al. 2021**). Rovněž senzorové on-the-go systémy mají tendenci více přihnojovat slabší porost (**Lukas a Neudert 2016**).

V rámci pokusných PB na Českomoravské vrchovině byl uplatněn posilující princip (s výjimkou občasných malých srovnávacích plošek s kompenzačním přístupem). Při kombinaci

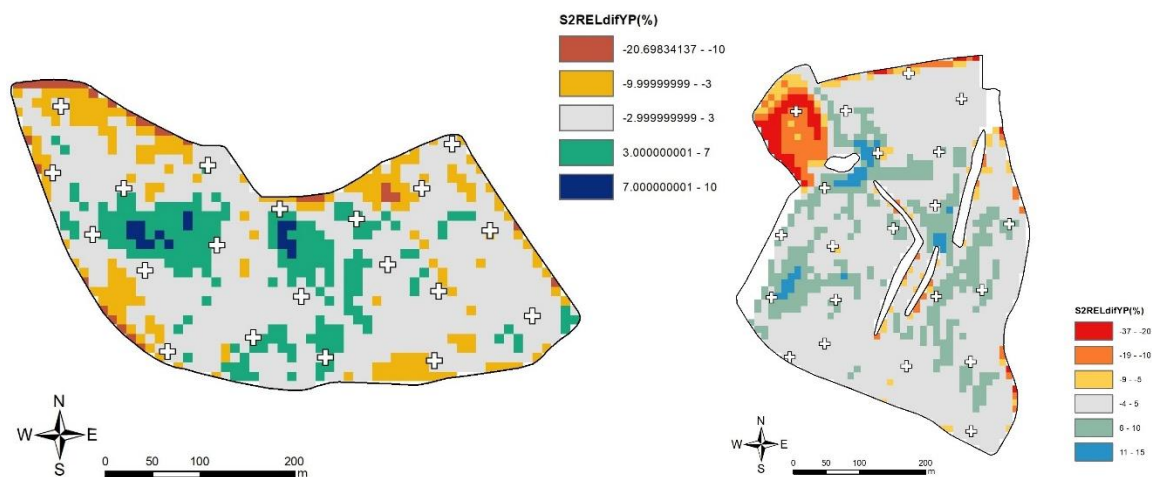
map RVP a aktuálního stavu byl horší porost podpořen dusíkem více tam, kde byl očekáván vyšší výnos a naopak méně, kde byl dobrý porost na místě s nižším očekávaným výnosem. Průměrná dávka hnojiva pro 100 % produkční zónu byla odvozena na základě rozhodnutí agronoma s přihlédnutím k aktuálnímu počasí. Příklad postupu tvorby aplikační mapy z RVP s korekcí na aktuální stav porostu pro dva vybrané pozemky ZD Kojčice (PB5 a PB6) ukazují **Obr. 7-11**.



Obrázek 7. Mapa procentuálního rozložení dávky dusíkatého hnojení, vycházející z rozložení výnosového potenciálu a na základě konzultace rozpětí dávek dusíku s agronomem pro PB5 (vlevo) a PB6.



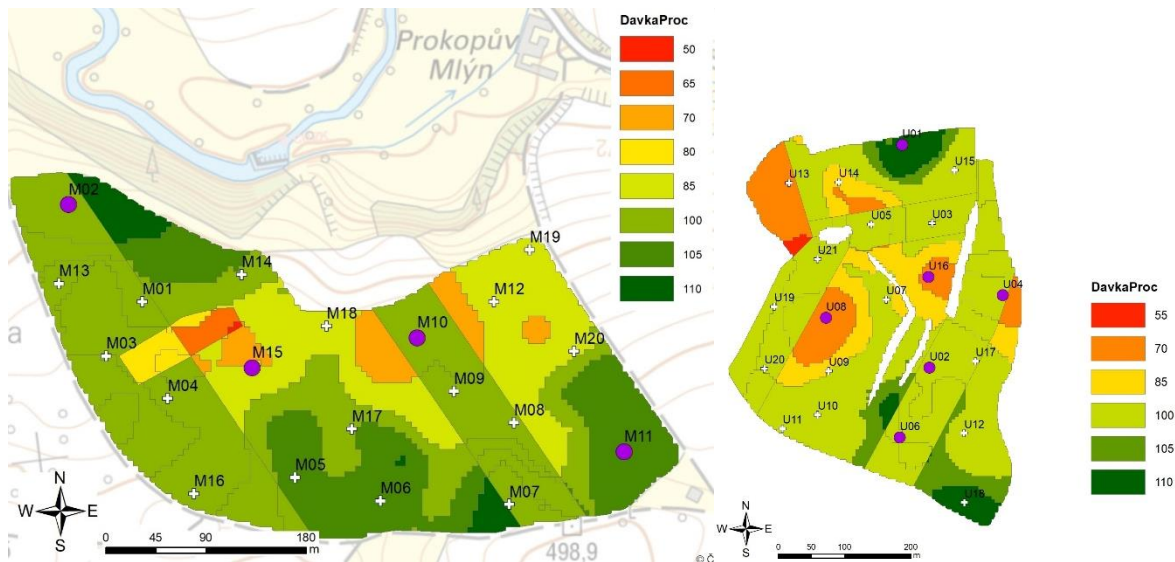
Obrázek 8. Hodnocení aktuálního stavu porostu před hnojením na základě procentuálního rozložení vegetačního indexu NDVI z multispektrálního snímku Sentinel-2 ze dne 20.4.2020. Mapa slouží pro korekci dávky dané relativním výnosovým potenciálem na **Obr. 6**.



Obrázek 9. Znázornění rozdílu mezi relativním výnosovým potenciálem a aktuálním stavem porostu z NDVI pro PB5 (vlevo) a PB6. Kladné hodnoty, reprezentované zelenou až modrou barvou, ukazují na lepší stav porostu, než byl očekáván na daném místě dle rozložení výnosového potenciálu. Pro tyto plochy byla provedena korekce snížením aplikační dávky N. Záporné hodnoty (žluté až červené) ukazují na porost v horším stavu na místě s vyšším výnosovým potenciálem. Tato místa byla korigována zvýšením aplikační dávky pro podpoření slabých porostů v nadprůměrně výnosných plochách. Šedě obarvená plocha značí soulad aktuálního stavu porostu s relativním výnosovým potenciálem.



Obrázek 10. Design polního pokusu se střídáním uniformní (UNI) aplikace s variabilní aplikací (VAR/VRA) na PB5 (vlevo) a PB6. Rozložení variant odpovídalo plošné nevyrovnanosti pozemků, reliéfu terénu a způsobu hospodaření na pozemcích, resp. směru založení porostu a pojezdu aplikační techniky. Na každém pozemku byla vytvořena menší plocha s obrácenou (reverzní) strategií dávkování (kompenzační přístup – VRAr, UNIr).

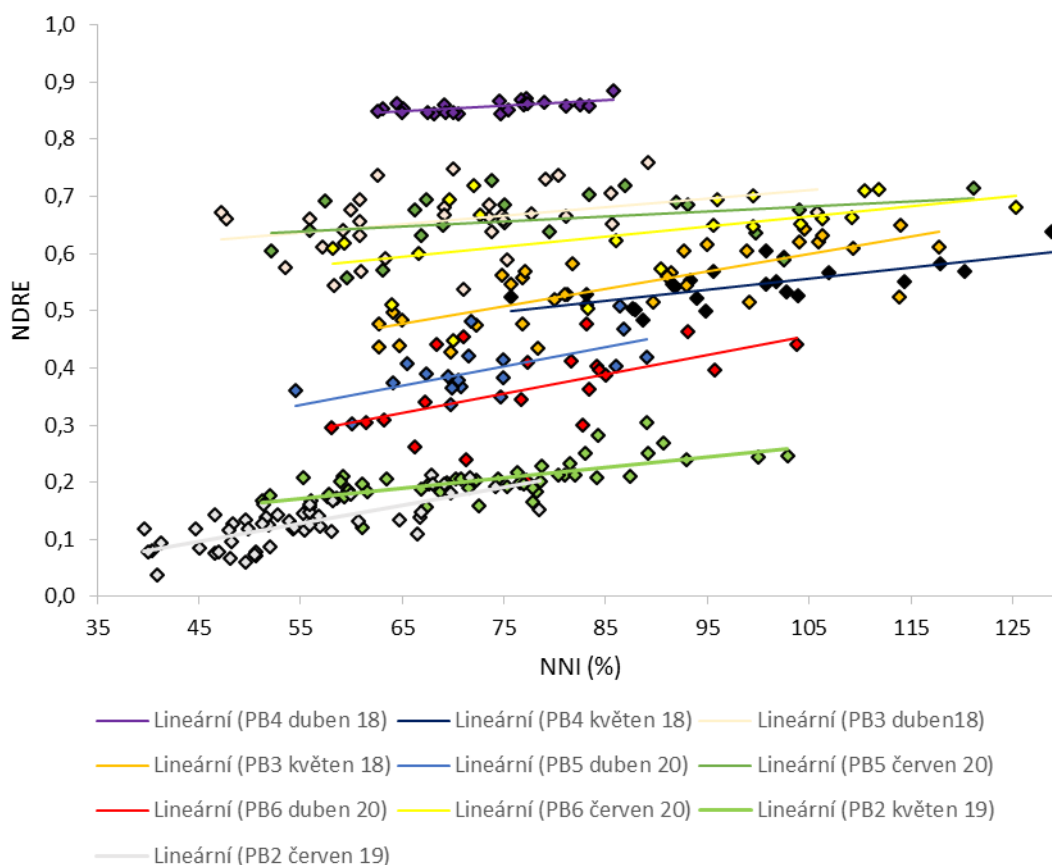


Obrázek 11. Výsledná aplikační mapa s relativním rozložením dávky dusíkatého hnojiva vytvořená výše popsáním způsobem pro PB5 (vlevo) PB6. Výše průměrné dávky byla stanovena před vlastní aplikací na základě posouzení porostu agronomelem a zhodnocení povětrnostních podmínek (za uplynulé období a předpověď na nejbližší dny).

Při hodnocení výživového stavu porostů pomocí vegetačních indexů před plánovanou aplikací hnojiv nebo i po provedeném hnojení nemusí být jednoznačně odhaleny příčiny jevů. Např. snížení NIR odrazivosti a zvýšení RED odrazivosti může signalizovat jak nedostatek N, tak vodní stres, zhoršený zdravotní stav nebo poškození pesticidy/hnojivy (**Lukas a Neudert 2016**). Při nejistotě rozhodování je nutné vizuální posouzení porostu, které může odhalit poškození v důsledku chorob/škůdců/zaplevelení/chemických prostředků.

6.3 Hodnocení parametrů biomasy a retence vody v půdě pomocí kalibračních vzorků

Hodnoty vegetačních indexů vyjadřují výživový stav porostů v relativním měřítku, tzn., že nevypovídají o absolutním množství biomasy nebo dusíku přijatého porostem. Hodnocení plošného rozložení parametrů biomasy je založeno na korelaci vegetačních indexů a analýz kalibračních vzorků biomasy. Vzorky je nutné odebírat z různých míst porostu (vč. míst extrémních), a to opakovaně v různých fázích vývoje porostu a různých letech, protože stejné hodnoty parametrů porostu (např. NNI, **Obr. 12**) neznamenají stejnou odrazivost porostu, resp. hodnoty vegetačních indexů (např. NDRE, **Obr. 12**). Pro žádoucí zásobení porostu dusíkem vyjádřené hodnotou NNI okolo 100 % nelze tudíž jednoduše odvodit odpovídající rozpětí hodnot vegetačních indexů.



Obrázek 12. Vztahy mezi NNI a vegetačním indexem NDRE (PB3 a PB4 2018, PB5 a PB6 2020, oblast Českomoravské vrchoviny).

Pro hodnocení NNI porostů pšenice ozimé v oblasti Českomoravské vrchoviny a dolní Jizery byly využity stejné letecké snímky a metoda SVR jako v kap. 6.1. Pro sestavení modelu odhadu prostorové distribuce NNI byl použit spektrální index REIP (**Guyot et al. 1988**), který podle literárních údajů (např. **Mistele and Schmidhalter 2008**) dobře koresponduje s obsahem N v porostu a obsah N je zároveň významně limitován působením nedostatku vody. Nelineární regresní metoda SVR do jisté míry umožňuje kompenzovat výše uvedený problém variability hodnot pro různé plochy využitím multiparametrického přístupu. Jako ukazatel kompenzující prostorové rozdíly zde byl využit (podobně jako v případě odhadu infiltrační schopnosti půd) spektrální vegetační index MSAVI, který dobře koresponduje s množstvím biomasy porostu. Protože existuje předpoklad, že index NNI významně souvisí též s vodním stresem, byl pro účely odhadu indexu NNI použit též CWSI. Výsledky porovnání laboratorně měřených hodnot indexu NNI a hodnot odhadnutých pomocí SVR ukazuje **Tab. 5**. Z přehledu je patrné, že mezi měřenými a odhadnutými daty existuje poměrně silný vztah pro většinu lokalit. Nejhorší výsledek byl překvapivě zjištěn pro lokalitu PB2 (Svépravice, $R^2 = 0,55$) a dále pak pro PB1 (Dehtáře), kde byl, nicméně, vzhledem ke komplikovaným půdním podmínkám předpoklad horšího odhadu očekávaný. Výsledek pro všechny lokality je uspokojivý ($R^2 = 0,66$). Celkově lze konstatovat, že je vhodné využít spektrální data, v kombinaci s využitím multiparametrického přístupu, pro odhad NNI na lokální až regionální úrovni.

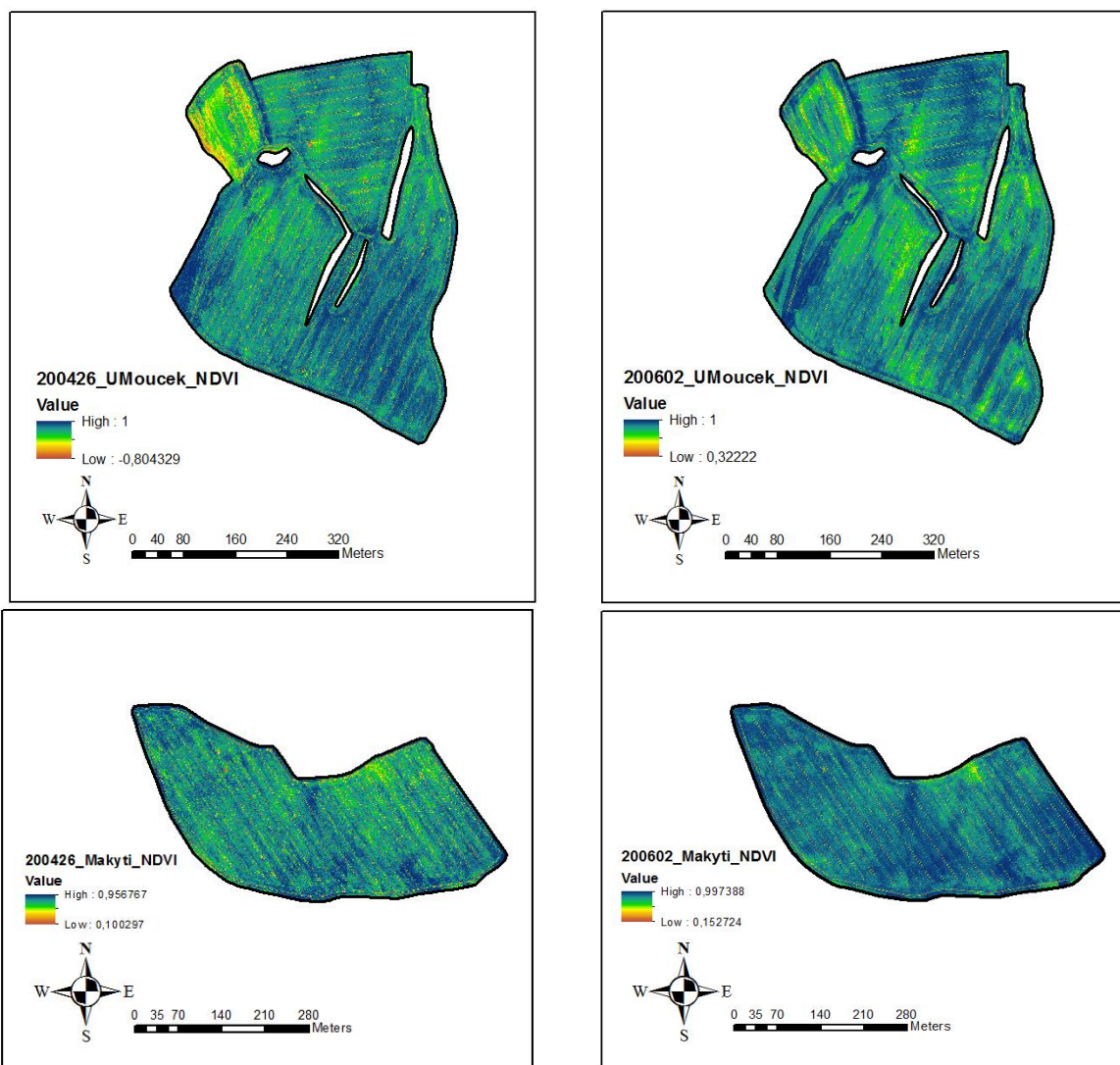
Tabulka 5. Přehled porovnání hodnot NNI stanovených laboratorně a hodnot NNI odhadnutých pomocí modelu SVR. Jako prediktory byly použity indexy REIP, MSAVI a CWSI. V analýze byla rozlišena lokalita. Pro každou lokalitu (Českomoravská vrchovina) byla použita data z uvedených termínů snímkování a korespondujících termínů odběru vzorků.

Lokalita	Datum	F-test	df	R ²	R ² adj	p	RMSE
PB1	11.5.2017, 28.5.2017	62,6	40	0,61	0,60	***	9,84
PB2	11.5.2017, 28.5.2017	78,2	64	0,55	0,54	***	12,40
PB3	27.5.2018	139,9	21	0,87	0,86	***	5,09
PB4	27.5.2018	143,1	31	0,82	0,82	***	7,40
Vše	11.5.2017, 28.5.2017, 27.5.2018	360,8	182	0,66	0,66	***	11,22

df – stupeň volnosti, R² – koeficient determinace, R² adj – koeficient determinace upravený, p - hladina významnosti, RMSE - střední kvadratická chyba (Root Mean Square Error)

Kalibrační odběry vzorků jsou časově náročné a nelze tuto činnost provádět v zemědělském podniku před či po každé variabilní aplikaci hnojiv. Rozvoj moderních Smart technologií naznačuje v blízké budoucnosti možnosti automatického vyhodnocení vzorků pomocí mobilních aplikací, např. **Bacenetti et al. (2020)** využili aplikaci PocketNNI v chytrém telefonu pro přímé odvození NNI rýže, což následně využili pro kalibraci s indexem NDRE (**Barnes et al. 2000**) a NDVI pro odvození mapy NNI, která sloužila jako podklad pro variabilní hnojení. Jako určitá možnost se jeví též využití modelů metod strojového učení a umělé inteligence, kalibrovaných na regionální podmínky. V takovém případě by bylo možné pro kalibrační účely využít menšího množství vzorků.

Ze spektrální odrazivosti snímané UAV kamerami (Micasense RedEdge, Micasense Altum a Parrot Sequoia) v oblasti ZD Kojčice bylo zjištěno celkem deset vegetačních indexů (EVI2, GNDVI, Chl, MSAVI2, NDRE, NDVI, NRERI, RENDVI, SAVI a SRI). Jejich výpočetní algoritmy jsou uvedeny v **Příloze 1**. Na **Obr. 13** je uveden příklad UAV snímků s NDVI na PB5 a PB6 z 26.4. a 2.6.2020.



Obrázek 13. Snímky NDVI z bezpilotního průzkumu z 26.4. a 2.6.2020 pro PB5 a PB6

Z korelací mezi vegetačními indexy z UAV a parametry z kalibračních vzorků biomasy bylo zjištěno, že vegetační indexy odpovídaly nejlépe množství N přijatého v biomase a NNI, méně již množství biomasy a nejméně koncentraci N v biomase (**Tab. 6 a 7**). Lepší korelace představuje i možnost nižšího počtu kalibračních vzorků. Vždy je však potřeba do odběrů zařadit vzorky s extrémními hodnotami (nejhorší vs. nejlepší porost). Pro korelace byly hodnoty vegetačních indexů z dronů průměrovány z plochy v okolí 2 m od odběrných bodů. Žádný z vegetačních indexů nebyl vyhodnocen jako univerzální ukazatel parametrů biomasy. Z uvedených vegetačních indexů lépe vyhovovaly ty, které byly založeny na odrazivosti v RED-edge (NDRE, NRERI, ChI) či zelené části spektra (GNDVI), ale i jednoduchý SRI založený na odrazivosti v R a NIR byl s nimi srovnatelný. V suchém roce 2018 prokázaly vegetační indexy spolehlivě příznaky vodního stresu, což bylo potvrzeno převažující silnou korelací květnových hodnot vegetačních indexů s hodnotami $\Delta^{13}\text{C}$ v zrně ($r = 0,55\text{--}0,74$) a s PVK v 0–60 cm ($r = 0,55\text{--}0,81$). Vegetační indexy s odrazivostí v RED-edge pásmu prokázaly v roce 2018 silnější korelace s PVK (ChI, NDRE, NRERI s průměrným $r = 0,73$) ve srovnání s vegetačními indexy s odrazivostí v jiných částech spektra ($r = 0,63\text{--}0,70$, průměrná hodnota 0,66).

V oblasti dolní Jizery byl z RGB snímků porostů plodin (pšenice, brambory, cukrovka) vypočten index ExG (kap. 5.2), který zde sloužil nejen jako indikátor aktuálního stavu porostu, ale i půdních podmínek (zrnitostní složení), které se v letech prakticky nemění a podmiňují z velké míry zranitelnost suchem. Hodnoty korelačního koeficientu vztahu ExG a PVK (0–90 cm) nebo $\Delta^{13}\text{C}$ v zrnu se pohybovaly od 0,75 do 0,90. Při výpočtu indexu se jako vhodné ukázalo průměrování hodnot z větší plochy, tak aby hodnotu nezkreslovaly rozdíly v měřítku metr a menším. V daných podmínkách se prokázalo, že průměrné hodnoty indexu pro zónu o průměru 2 m a 5 m se prakticky nelišily a měly průkazný silný vztah k variabilitě růstu a výnosu nezavlažovaných porostů (**Obr. 14**). Průměrné hodnoty ze zón o průměru 10 a více metrů již zahrnovaly zóny s příliš odlišnými podmínkami a proto korelovaly slabě se znaky porostu v odběrovém místě, v centru snímané plochy (**Haberle et al. 2020a**).

Vegetační indexy mají významný využitelný potenciál pro zachycení půdní variability. Na základě korelací vegetačních indexů ze snímků DPZ (v této metodice Chl, NDRE, NRERI, SRI a ExG z UAV snímků) s PVK odvozenou ze zrnitostního složení do hloubky min. 60 cm lze odvodit mapu vyjadřující schopnost půdy daného pozemku zadržet vodu. Ta může být v PZ využitelná rovněž jako podkladová mapa pro variabilní hnojení, zejména v suchých letech nebo pro variabilně plošnou závlahovou dávku (zatím se v praxi ještě neprovozuje). Výběr míst pro půdní odběry na zrnitostní složení by měl vycházet z DPZ snímků (leteckých/UAV/družicových), ideálně ze suchého vegetačního období, kdy je projev půdní variability silnější a je větší pravděpodobnost, že do výběrových bodů budou zahrnuty i místa s extrémním zrnitostním složením. Hodnoty PVK jsou v čase celkem stabilní (pokud nedojde k silnému utužení, zásadní změně zpracování půdy apod.) a není tudíž nutné provádět analýzy zrnitostního složení opakovaně (na rozdíl od biomasy). Je tedy možné vytvořit si plán postupných odběrů vzorků rozdělený podle jednotlivých pozemků do více let.

Tabulka 6. Korelační koeficienty (r) vegetačních indexů (VI) z UAV a množství přijatého dusíku a NNI ze dvou termínů z let 2018 a 2020 (ozimá pšenice) a 2019 (jarní ječmen) pro oblast Českomoravské vrchoviny (PB2–PB6).

Korelační koeficienty vegetačních indexů a přijatého dusíku (kg/ha)																			
PB4				PB3				PB2				PB5				PB6			
19.04.2018		24.05.2018		19.04.2018		24.05.2018		31.05.2019		19.06.2019		26.04.2020		02.06.2020		26.04.2020		02.06.2020	
VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r
NDRE	0,60	SRI	0,82	SRI	0,66	NRERI	0,83	GNDVI	0,81	SRI	0,83	NRERI	0,81	SRI	0,53	RENDVI	0,58	NDVI	0,56
NRERI	0,42	MSAVI2	0,80	NDVI	0,46	ChI	0,83	SRI	0,80	NDRE	0,77	ChI	0,81	RENDVI	0,53	SRI	0,58	GNDVI	0,55
ChI	0,41	EVI2	0,80	MSAVI2	0,41	NDRE	0,79	NDRE	0,79	NDVI	0,75	NDRE	0,74	NDRE	0,46	NDVI	0,57	SRI	0,55
SRI	0,27	GNDVI	0,80	RENDVI	0,40	SRI	0,74	ChI	0,77	ChI	0,74	SRI	0,74	GNDVI	0,46	NDRE	0,56	NDRE	0,53
NDVI	0,26	RENDVI	0,79	NDRE	0,39	GNDVI	0,72	NRERI	0,76	RENDVI	0,74	GNDVI	0,69	NRERI	0,46	GNDVI	0,54	RENDVI	0,52
RENDVI	0,06	SAVI	0,79	SAVI	0,34	NDVI	0,70	NDVI	0,71	NRERI	0,74	RENDVI	0,65	MSAVI2	0,46	ChI	0,53	ChI	0,50
GNDVI	-0,12	NDRE	0,77	EVI2	0,34	MSAVI2	0,69	RENDVI	0,68	GNDVI	0,62	NDVI	0,64	ChI	0,45	NRERI	0,53	NRERI	0,49
MSAVI2	-0,14	NDVI	0,76	GNDVI	0,17	EVI2	0,69	MSAVI2	0,63	MSAVI2	0,60	SAVI	0,57	NDVI	0,45	MSAVI2	0,16	MSAVI2	0,45
EVI2	-0,28	ChI	0,73	NRERI	0,05	SAVI	0,68	SAVI	0,43	SAVI	0,57	EVI2	0,56	EVI2	0,43	SAVI	0,12	SAVI	0,42
SAVI	-0,29	NRERI	0,70	ChI	-0,14	RENDVI	0,64	EVI2	0,39	EVI2	0,55	MSAVI2	0,56	SAVI	0,42	EVI2	0,08	EVI2	0,41
Korelační koeficienty vegetačních indexů a NNI (%)																			
PB4				PB3				PB2				PB5				PB6			
19.04.2018		24.05.2018		19.04.2018		24.05.2018		31.05.2019		19.06.2019		26.04.2020		02.06.2020		26.04.2020		02.06.2020	
VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r
NDRE	0,60	EVI2	0,77	SRI	0,64	ChI	0,82	NDRE	0,70	SRI	0,77	ChI	0,71	SRI	0,40	RENDVI	0,54	RENDVI	0,59
NRERI	0,48	MSAVI2	0,77	NDVI	0,45	NRERI	0,81	GNDVI	0,69	NDRE	0,73	NRERI	0,70	RENDVI	0,40	SRI	0,53	NDVI	0,51
ChI	0,47	SAVI	0,77	RENDVI	0,41	NDRE	0,78	ChI	0,69	NRERI	0,70	SRI	0,63	MSAVI2	0,35	NDVI	0,53	SRI	0,49
SRI	0,18	SRI	0,76	MSAVI2	0,40	SRI	0,74	NRERI	0,69	ChI	0,70	NDRE	0,62	NDRE	0,34	NDRE	0,51	GNDVI	0,46
NDVI	0,17	GNDVI	0,76	NDRE	0,35	GNDVI	0,70	SRI	0,66	NDVI	0,69	GNDVI	0,57	ChI	0,33	GNDVI	0,50	NDRE	0,40
RENDVI	-0,04	RENDVI	0,74	SAVI	0,31	NDVI	0,70	NDVI	0,54	RENDVI	0,68	RENDVI	0,52	NRERI	0,33	NRERI	0,48	MSAVI2	0,35
GNDVI	-0,21	NDRE	0,73	EVI2	0,30	MSAVI2	0,69	MSAVI2	0,51	GNDVI	0,68	NDVI	0,50	GNDVI	0,32	ChI	0,47	NRERI	0,34
MSAVI2	-0,22	NDVI	0,72	GNDVI	0,15	EVI2	0,69	RENDVI	0,50	MSAVI2	0,66	SAVI	0,47	NDVI	0,32	MSAVI2	0,17	ChI	0,32
EVI2	-0,35	ChI	0,68	NRERI	0,01	SAVI	0,68	SAVI	0,36	SAVI	0,64	EVI2	0,47	EVI2	0,32	SAVI	0,13	SAVI	0,32
SAVI	-0,36	NRERI	0,67	ChI	-0,12	RENDVI	0,65	EVI2	0,33	EVI2	0,63	MSAVI2	0,46	SAVI	0,32	EVI2	0,10	EVI2	0,30

Tabulka 7. Korelační koeficienty (r) vegetačních indexů (VI) z UAV a množství suché hmoty a koncentrace N ze dvou termínů z let 2018 a 2020 (ozimá pšenice) a 2019 (jarní ječmen) pro oblast Českomoravské vrchoviny (PB2–PB6).

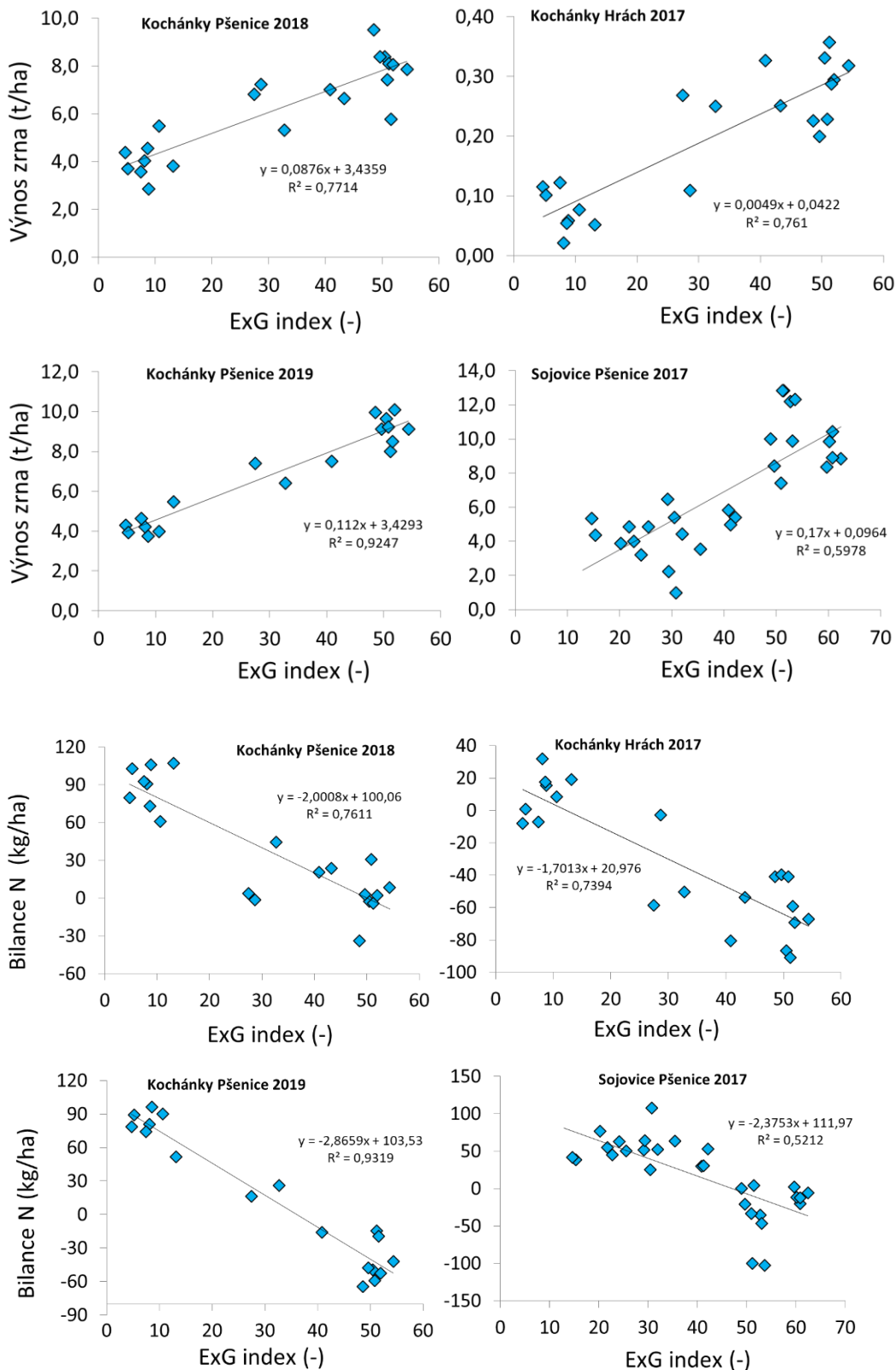
Korelační koeficienty vegetačních indexů a suché hmoty (t/ha)																			
PB4				PB3				PB2				PB5				PB6			
19.04.2018		24.05.2018		19.04.2018		24.05.2018		31.05.2019		19.06.2019		26.04.2020		02.06.2020		26.04.2020		02.06.2020	
VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r
NDRE	0,54	SRI	0,81	SRI	0,58	NRERI	0,79	SRI	0,74	SRI	0,66	NRERI	0,83	SRI	0,65	RENDVI	0,55	NDVI	0,58
SRI	0,35	RENDVI	0,79	NDRE	0,39	ChI	0,76	GNDVI	0,71	NDVI	0,64	ChI	0,82	RENDVI	0,64	SRI	0,55	SRI	0,56
NDVI	0,35	MSAVI2	0,77	NDVI	0,39	NDRE	0,72	NDVI	0,71	RENDVI	0,63	NDRE	0,78	GNDVI	0,61	NDVI	0,55	GNDVI	0,56
NRERI	0,31	GNDVI	0,77	MSAVI2	0,35	GNDVI	0,68	RENDVI	0,70	NDRE	0,60	SRI	0,77	NDRE	0,59	NDRE	0,55	NDRE	0,54
ChI	0,30	EVI2	0,76	EVI2	0,33	SRI	0,65	NDRE	0,68	ChI	0,58	GNDVI	0,75	NRERI	0,59	ChI	0,53	RENDVI	0,53
RENDVI	0,17	SAVI	0,75	SAVI	0,32	NDVI	0,64	ChI	0,64	NRERI	0,57	RENDVI	0,72	NDVI	0,58	NRERI	0,52	ChI	0,52
GNDVI	-0,02	NDVI	0,75	RENDVI	0,32	MSAVI2	0,62	NRERI	0,63	GNDVI	0,35	NDVI	0,70	ChI	0,57	GNDVI	0,51	NRERI	0,49
MSAVI2	-0,03	NDRE	0,75	GNDVI	0,14	EVI2	0,61	MSAVI2	0,58	MSAVI2	0,32	SAVI	0,61	MSAVI2	0,56	MSAVI2	0,12	MSAVI2	0,48
EVI2	-0,17	ChI	0,70	NRERI	0,10	SAVI	0,61	SAVI	0,38	SAVI	0,29	EVI2	0,60	EVI2	0,54	SAVI	0,07	SAVI	0,44
SAVI	-0,18	NRERI	0,66	ChI	-0,15	RENDVI	0,57	EVI2	0,34	EVI2	0,26	MSAVI2	0,59	SAVI	0,54	EVI2	0,03	EVI2	0,43
Korelační koeficienty vegetačních indexů a koncentrace N v biomase (%)																			
PB4				PB3				PB2				PB5				PB6			
19.04.2018		24.05.2018		19.04.2018		24.05.2018		31.05.2019		19.06.2019		26.04.2020		02.06.2020		26.04.2020		02.06.2020	
VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r	VI	r
NRERI	0,49	EVI2	0,59	SRI	0,47	ChI	0,62	ChI	0,25	GNDVI	0,57	ChI	0,07	SRI	0,17	GNDVI	0,19	GNDVI	0,30
ChI	0,47	SAVI	0,58	NDVI	0,34	SRI	0,59	NRERI	0,25	MSAVI2	0,57	NRERI	0,04	RENDVI	0,17	SRI	0,19	NDRE	0,29
NDRE	0,43	MSAVI2	0,57	RENDVI	0,34	NRERI	0,59	NDRE	0,23	EVI2	0,56	SRI	0,02	MSAVI2	0,15	RENDVI	0,19	NDVI	0,28
SRI	-0,10	GNDVI	0,55	MSAVI2	0,30	NDRE	0,58	GNDVI	0,19	SAVI	0,56	NDRE	-0,02	EVI2	0,13	NDVI	0,17	SRI	0,28
NDVI	-0,11	SRI	0,52	NDRE	0,19	EVI2	0,54	SRI	0,13	SRI	0,48	MSAVI2	-0,04	SAVI	0,12	NDRE	0,17	NRERI	0,27
RENDVI	-0,26	NDRE	0,51	SAVI	0,18	MSAVI2	0,54	MSAVI2	0,10	NDRE	0,46	EVI2	-0,04	ChI	0,12	NRERI	0,15	ChI	0,27
MSAVI2	-0,35	RENDVI	0,50	EVI2	0,16	SAVI	0,54	SAVI	0,08	NRERI	0,45	SAVI	-0,05	NDRE	0,11	ChI	0,14	RENDVI	0,23
GNDVI	-0,35	NRERI	0,50	GNDVI	0,09	NDVI	0,54	EVI2	0,07	ChI	0,44	GNDVI	-0,06	NRERI	0,11	MSAVI2	0,11	MSAVI2	0,21
EVI2	-0,43	NDVI	0,50	ChI	-0,07	RENDVI	0,52	NDVI	0,03	NDVI	0,42	RENDVI	-0,10	NDVI	0,09	SAVI	0,10	SAVI	0,21
SAVI	-0,43	ChI	0,49	NRERI	-0,07	GNDVI	0,50	RENDVI	-0,01	RENDVI	0,41	NDVI	-0,11	GNDVI	0,09	EVI2	0,10	EVI2	0,20

6.4 Bilance dusíku a akumulace půdního reziduálního dusíku

Hospodaření s dusíkem v daném roce i v delším období indikuje množství reziduálního N, tj. N_{\min} , který zůstává v půdě po sklizni plodiny. Množství reziduálního N_{\min} bude odpovídat bilanci N a historii honu (předchozí aplikace statkových hnojiv, zaorávka víceletých pícnin nebo drnu). Výpočet (modelování) množství reziduálního N je složité, nejpřesnější zůstává analýza vzorků půdy na obsah N_{\min} .

Výnos plodin dosahuje v důsledku sucha často jen zlomek očekávaných běžných výnosů. Tomu odpovídá nižší odběr N ve výnosu, využití N z hnojiv a bilance N (**Obr. 14**), kdy nevyhnutelně dochází ke zvýšení obsahu reziduálního N_{\min} o desítky kilogramů na hektar. Snímkování porostů může indikovat zóny s nadbytkem reziduálního N_{\min} , což je odběrem vzorků půdy v hustším gridu a analýzou N_{\min} pracovně nerealizovatelné. U obilnin využíváme silného vztahu mezi výnosem a odběrem N v zrnu, který lze ještě zpřesnit na základě analýzy zrna z míst různě postižených suchem. Přitom je třeba počítat s tím, že obsah N může být o něco nižší u rostlin v zónách s lepšími podmínkami, kde se obsah naředil růstem, na rozdíl od rostlin s nedostatkem vody.

Na **Obr. 14** je vztah množství nevyužitého N z bilance N (jako rozdíl dávky N v minerálních hnojivech a odběru N v zrnu) a vegetačního indexu porostu ExG v oblasti dolní Jizery (**Haberle et al. 2020a**). Množství N ve slámě lze odhadnout z tabulek pro výpočet bilance živin (**Klír 2019**); pokud je sláma zaorána můžeme v bilanci N odběr N zanedbat nebo odečítat 10 kg N/t slámy pro imobilizaci. Kladná bilance indikuje nevyužitý N a tento přebytek se z větší části objeví v půdě jako reziduální N_{\min} .

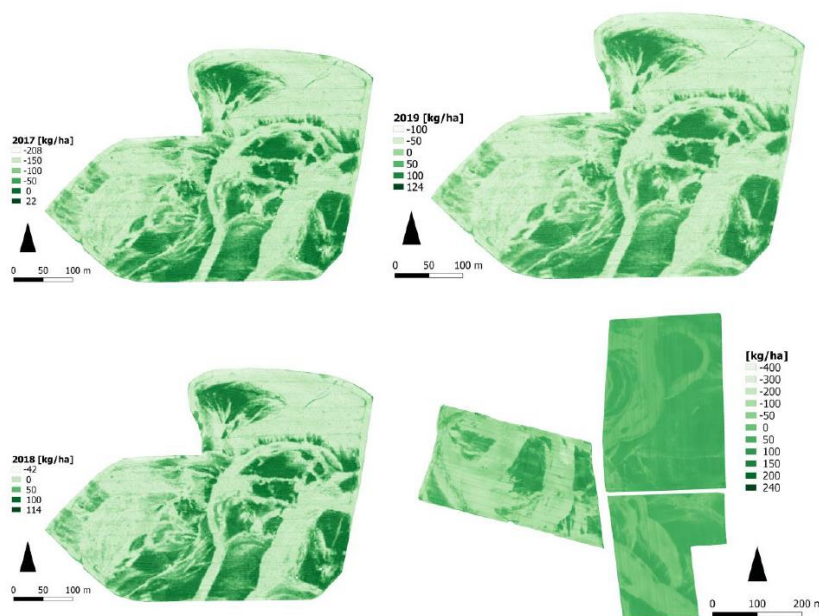


Obrázek 14. Vztah ExG indexu ze snímků porostů v Kochánkách a Sojovicích a výnosu (nahore) a bilance N (dole) v gridu odběrových bodů.

Z regresního vztahu bilance N a vegetačního indexu lze na základě snímkování celého pozemku vytvořit mapy pozemků s vyznačením zón s přebytkem N (**Obr. 15**). Hodnoty bilance N pouze indikují množství reziduálního N_{min}, protože aktuální obsah N_{min} je ovlivněn dalšími

faktory, včetně imobilizace N. V zónách s vysokým přebytkem nevyužitého N je vhodné vynechat hnojení N na slámu (která navíc bude pravděpodobně mít vyšší obsah N) nebo ke strniskovým meziplodinám.

Přitom je ale třeba zvážit, zda v období zrání (kdy už se odběr N u zrnin zastavuje nebo dokonce začíná, například u řepky, rozklad opadu listů a kořenů) nemohlo dojít k vyplavení N. Právě v zónách s propustnou půdou a nízkou PVK, kde zůstalo nejvíce reziduálního N_{\min} (převážně ve formě dusičnanů) stačí pro vyplavení z ornice již relativně malé množství srážek (Haberle et al. 2018a). Jak to dokládají údaje na Obr. 1, došlo již v létě a na podzim v zónách s propustnou půdou k vyplavení reziduálního N_{\min} , který se vyskytuje převážně ve formě pohyblivých dusičnanů. Výsledkem bylo, že v zónách s nejvyšším bilančním přebytkem N bylo v půdě před nástupem zimy nejméně dusíku. Vyplavení N v období bez odběru N porostem plodin (typicky v mimovegetační době), lze i v provozních podmínkách odhadnout na základě obsahu dusičnanů v půdě, vlhkosti a vodní kapacity půdy, srážek a jednoduché bilance vody (Svoboda et al. 2017, Haberle et al. 2018a). Složitější matematické (plodinové) modely vyžadují podrobné vstupní údaje, které nejsou běžně dostupné. Funkční propojení těchto modelů nebo jednodušších programů pro podporu rozhodování (typu „decision support systems“) s údaji DPZ, snímkování z dronů a letadel, je zatím v praxi nevyužito.



Obrázek 15. Mapy bilance dusíku v Kochánkách (2017–2019) a Sojovicích (2017, vpravo dole).

Aplikace metod PZ a DPZ by měla prostřednictvím vegetačních indexů optimalizovat dávky N v průběhu vegetace a tím přispět i ke snížení obsahu N po sklizni (Duffková et al. 2019). Na základě výsledků z pokusných ploch Českomoravské vrchoviny bylo zjištěno, že na méně úrodných variabilně hnojených místech pozemků s vyšší propustností, nižším VP a podprůměrnými dávkami N byly i nižší obsahy reziduálního N_{\min} v půdní vrstvě 0–30 cm a tím i snížené riziko následného vyplavení dusičnanů do spodních vrstev půdy, resp. podzemních

vod ve srovnání s uniformní aplikací. Produktivita aplikovaného dusíku (tj. množství zrna na 1 kg aplikovaného N) byla na těchto méně hnojených místech vyšší a výnos zrna v průměru stejný ve srovnání s průměrnou uniformní (tj. vyšší) dávkou. Zároveň tím klesla i celková spotřeba aplikovaného N v rámci variabilního hnojení, neboť zvýšené dávkování N na místech s vyšším VP nepřineslo žádoucí efekt zvýšení výnosů a produktivity aplikovaného N v jakýchkoliv vláhových podmínkách a je tedy ekonomicky nevýhodné a nedoporučované. **Z toho vyplývá, že variabilní aplikace dusíkatých hnojiv založená na využití vegetačních indexů by byla přínosná a žádoucí ve ZOD, které tvoří 49,4 % zemědělské půdy.**

7. Závěr, doporučení

Metodika nabízí na základě pokročilých metod DPZ různé postupy pro identifikaci plošné půdní variability využitelné v zemědělské praxi, které mají společný účel, a to zvýšení efektivity aplikovaných hnojiv a omezení ztrát dusíku (dusičnanů) vyplavením z propustných půd do povrchových a podzemních vod. Znalost půdní variability hraje tudíž významnou roli pro agronomická rozhodování jak v rámci postupů PZ (zejména pro variabilní aplikaci hnojiv), tak i mimo ně. Půdní variabilita se odráží do projevů pěstovaných plodin, které se více uplatňují v suchých obdobích s výraznějším vlivem retence vody v půdě na příjem živin a tvorbu výnosu. Tyto projevy nedostatku vody umožňují relativně jednoduše, s využitím metod DPZ, identifikovat díly půdních bloků (DPB) a jejich části zranitelné suchem. Na několika DPB zemědělských podniků, ve výrazně odlišných půdně-klimatických podmínkách, byla prokázána vysoká vypovídací schopnost mapování zón s horšími půdními podmínkami pro interpretaci prostorové variability růstu a výnosu plodin. Mapy vhodně doplňují další údaje, jako jsou výsledky AZPP, data z výběrových půdních sond a měření utužení půd nebo nastupujících on-the-go systémů pro zjištění aktuálního stavu rostlin a půdy. Výsledky pokusů a sledování současně ukazují na složité interakce půdních a vláhových podmínek, které je třeba při rozhodování agronoma zvažovat. V důsledku nastupující klimatické změny bude potřeba zohlednění dopadů půdní variability v praxi dále narůstat.

III) Srovnání „novosti postupů“

Postupy uvedené v metodice potvrdily, že znalost půdní variability je v rámci PZ pro agronomické rozhodování důležitá (např. pro variabilní hnojení). Bylo zjištěno, že projev půdní variability má souvislost s vlhkostními podmínkami daného roku, protože sucho často projev půdní variability zvýrazňuje, tzn., že se více uplatňuje vliv retence vody v půdě na příjem živin a tvorbu výnosu. V rámci „novosti postupů“ bylo toto zjištění potvrzeno vazbami mezi vegetačními indexy a PVK v suchém vegetačním období, které lze využít pro generování map prostorové variability vodní kapacity půd. Vlhčí podmínky spíše stírají vliv plošné variability a příjem vody, živin i výnos plodiny je tak plošně rovnoměrnější. Půdní variabilita není tudíž ve svém projevu stabilní a v letech neměnný faktor.

Uvedené postupy prokázaly, že následkem variabilního hnojení dusíkem byly v důsledku snížených dávek N na méně úrodných místech s vyšší propustností nižší obsahy reziduálního N_{\min} v půdní vrstvě 0–30 cm a tím i snížené riziko následného vyplavení dusičnanů do spodních vrstev půdy, resp. podzemních vod ve srovnání s uniformní aplikací. Produktivita variabilně aplikovaného dusíku byla na nejméně hnojených místech vyšší a výnos zrna v průměru stejný ve srovnání s uniformní aplikací.

IV) Popis uplatnění

Postupy popsané v metodice lze bezprostředně využít v zemědělských podnicích pro identifikaci kritických zdrojových oblastí, tj. zón pozemků zranitelných suchem a současně s vysokým rizikem ztrát dusíku vyplavením. To je důležité hlavně na lehkých, propustných půdách, kde se pěstují brambory a zelenina. Vymezení těchto kritických oblastí umožňuje v rámci agronomických postupů zohledňujících prostorovou variabilitu půdních podmínek zamezení vysokých ztrát dusíku do vod. Rychlá identifikace problematických zón s dopady sucha na porosty na základě satelitů a UAV snímků rovněž umožňuje efektivní zacílení případných opatření, například aplikaci zlepšujících látek a substrátů, jen na určité části půdního bloku.

Podkladové mapy pro variabilní aplikaci hnojiv, hodnocení parametrů biomasy a retence vody v půdě a bilance dusíku jsou přímo použitelné v zemědělských podnicích v rámci postupů PZ (i mimo ně) ke zvýšení efektivity využití živin pro tvorbu výnosu a snížení rizika ztrát dusíku (dusičnanů) vyplavením do podzemních vod. Jejich využívání je i součástí komplexu opatření v rámci adaptace k suchu.

Metodika je dále určena zemědělským poradcům, pracovníkům v zemědělském výzkumu, školství a státní správě (např. Ministerstvo zemědělství, státní podniky povodí) při výkonu jejich činností.

V) Ekonomické aspekty

Metodika přináší benefity, které mají vliv na ekonomiku zemědělského podniku a zároveň jsou celospolečenským přínosem pro ochranu životního prostředí. Tyto benefity jsou úzce propojené a nelze je oddělovat. Ekonomické benefity jsou spojeny s úsporou spotřeby dusíkatých minerálních hnojiv po variabilní aplikaci v důsledku snížené dávky na částech pozemků s nižším dlouhodobým VP ve srovnání s uniformní aplikací. **Úspora minerálních hnojiv** na sledovaných pozemcích ZD Kojčice s ozimou pšenicí činila **100 – 120 Kč/ha** pro jednu aplikaci při dávce ca 70 kg N/ha. Celkový roční ekonomický přínos podniku je závislý na meteorologických podmínkách, půdní variabilitě a celkové výměře pozemků, výši a počtu dávek hnojiv aj. Kromě úspory hnojiv bylo **na nejméně hnojených částech** pozemků dosaženo **vyšší produkce zrna o ca 2–8 kg na 1 kg aplikovaného N**. Riziko kontaminace podzemních vod

dusičnany bylo po variabilní aplikaci snižené, protože průměrný **obsah reziduálního N_{\min} klesl ve vrstvě 0–30 cm o ca 7 kg/ha.**

Ekonomický přínos z hlediska kvality vody nelze přesně vyčíslit. Kromě přímé úspory N (který se díky zohlednění půdní variability nevyplaví z kořenové zóny) je třeba uvažovat i vícenáklady vodárenských zařízení, v případě, že obsahy nitrátů překročí stanovené limity. V neposlední řadě je třeba připomenout i nepřímé společenské a podnikové náklady (vymezování nových ZOD, monitoring, kontroly, nová omezující opatření a náklady), které vzniknou v případě, že se nepodaří snižovat nebo alespoň udržet obsahy nitrátů ve vodách pod požadovanou úroveň. Společenský aspekt znečištění vod nutrienty a pesticidy zahrnuje často negativní postoj veřejnosti k zemědělské výrobě a politický tlak na přijetí omezení a nepřímých efektivních opatření.

VI) Seznam použité související literatury

- Alva A.K., Paramasivam S., Fares A., Delgado J. A., Mattos D. Jr, Sajwan K. 2006. Nitrogen and Irrigation Management Practices to Improve Nitrogen Uptake Efficiency and Minimize Leaching Losses. *Journal of Crop Improvement* 15 (2): 369–420.
- Barnes E.M., Clarke T.R., Richards S.E., Colaizzi P.D., Haberland J., Kostrzewski M., Waller P., Choi C., Riley E., Thompson T., Lascano R.J., Li H., Moran M.S. 2000. Coincident detection of crop water stress nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. In: Robert, P.C., Rust, R.H., Larson, W.E. (Eds.), *Proc. 5th Int. Conf. Precis Agric.* Bloomington, MN, USA.
- Bacenetti J., Paleari L., Tartarini S., Vesely F.M., Foi M., Movedi E., Ravasi R.A., Bellopede V., Durello S., Ceravolo C., Amicizia F., Confalonieri R. 2020. May smart technologies reduce the environmental impact of nitrogen fertilization? A case study for paddy rice. *Science of the Total Environment* 715: 136956.
- Brom J. 2012. Module for calculation of energy balance features and vegetation water stress indices - SEBCS. Software + Manual. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta.
- Cao Q., Miao Y., Feng G., Gao X, Li F., Liu B., Yue S., Cheng S., Ustin S.L., Khosla R. 2015. Active canopy sensing of winter wheat nitrogen status: An evaluation of two sensor systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 112: 54–67.
- Cilia Ch., Panigada C., Rossini M., Meroni M., Busetto L., Amaducci S., Boschetti M., Picchi V., Colombo R. 2014. Nitrogen Status Assessment for Variable Rate Fertilization in Maize through Hyperspectral Imagery, *Remote Sens.* 2014, 6, 6549–6565; doi:10.3390/rs6076549
- Doležal F., Kvítek T. 2004. The role of recharge zones, discharge zones, springs and tile drainage systems in peneplains of Central European highlands with regard to water quality generation processes. *Phys. Chem. Earth* 29: 775–785. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.05.005>

- Duffková R. et al. 2020. Metodika hodnocení vláhových potřeb zemědělských plodin pro účely závlah. Certifikovaná metodika. VÚMOP, v.v.i., Praha. ISBN 978–80–88323–12–9.
- Duffková R., Brom J., Žížala D., Zemek F., Procházka J., Nováková E., Zajíček A., Kvítek T. 2012. Určení infiltračních oblastí pomocí vodního stresu vegetace na základě dálkového průzkumu Země a pozemních měření. Certifikovaná metodika. Vydal VUMOP, v.v.i. 64 str., 141 ks, ISBN: 978–80–87361–15–3.
- Duffková R., Zajíček A., Nováková E. 2011. Actual evapotranspiration from partially tile–drained fields as influenced by soil properties, terrain and crop. *Soil & Water Res.*, 6 (3): 131–146.
- Fu Y., Yang G., Wang J., Song X., Feng H. 2014. Winter wheat biomass estimation based on spectral indices, band depth analysis and partial least squares regression using hyperspectral measurements. *Computers and Electronics in Agriculture* 100: 51–59.
- Fučík P., Zajíček A., Duffková R. 2015. Water Quality of Agricultural Drainage Systems in the Czech Republic — Options for Its Improvement. In *Research and Practices in Water Quality* Teang Shui Lee (ed.): 239–262. InTech. Kapitola v knize. ISBN 978–953–51–2163–3. <http://dx.doi.org/10.5772/59298>
- Fučík P., Zajíček A., Kaplická M., Duffková R., Peterková J., Maxová J., Takáčová Š. 2017. Incorporating rainfall–runoff events into nitrate–nitrogen and phosphorus load assessments for small tile–drained catchments. *Water* 9, 712. <https://doi.org/10.3390/w9090712>
- Guerrero A., De Neve S., Mouazen A.M. 2021. Data fusion approach for map–based variable–rate nitrogen fertilization in barley and wheat. *Soil and Tillage Research* 205, 104789.
- Guyot G., Baret F., Major D. 1988. High spectral resolution: Determination of spectral shifts between the red and infrared. *International Archives of Photogrammetry and Remote sensing* 11: 750–760.
- Haberle J., Svoboda P. 2015. Calculation of available water supply in crop root zone and water balance of crops. *Contributions to Geophysics and Geodesy* 45: 285–298.
- Hamuda E., Glavin M., Jones E. 2016. A survey of image processing techniques for plant extraction and segmentation in the field. *Computers and Electronics in Agriculture* 125: 184–99.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E. P., Gao X., Ferreira L. G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83 (1-2): 195-213.
- Huang S., Miao Y., Zhao G., Yuan F., Ma X., Tan C., Yu W., Gnyp M.L., Lenz–Wiedemann V.I.S., Rascher U., Bareth G. 2015. Satellite Remote Sensing–Based In–Season Diagnosis of Rice Nitrogen Status in Northeast China. *Remote Sens.* 7: 10646–10667; doi:10.3390/rs70810646.
- Jackson R.D., Idso S.B., Reginato R.J., Pinter P.J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research* 17, 1133. <https://doi.org/10.1029/WR017i004p01133>

- Jin S., Sader S. 2005. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment* 94, 364–372. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.012>
- Justes E., Mary B., Meynard J.M., Machet J.M., Thelierhuche L. 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter–wheat crops. *Ann. Bot–London* 74: 397–407.
- Kadlecová R., Bruthans J., Grundloch J., Gvoždík L., Haberle J., Klír J., Kůrková I., Milický M., Růžek P., Herčík L. 2018. Kvartérní sedimenty, podzemní voda a zemědělství. *Čes. geol. služba, Praha*, 85 s. ISBN 978-80-7075-936-3.
- Khosla R., Fleming K., Delgado J.A., Shaver T.M., Westfall D.G. 2002. Use of site–specific management zones to improve nitrogen management for precision agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation* 53: 513–518.
- Khosravi I., Jouybari-Moghaddam Y., Sarajian M.R. 2017. The comparison of NN, SVR, LSSVR and ANFIS at modeling meteorological and remotely sensed drought indices over the eastern district of Isfahan, Iran. *Nat Hazards* 87, 1507–1522. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2827-1>
- Klír et al. 2018. Inovace systémů zemědělského hospodaření v prostředí kvartérních sedimentů pro redukci ztrát dusíku do vod. *Metodika pro praxi. VÚRV, v.v.i.*
- Klír J. 2019: Nitrátová směrnice, bilance živin. [https://www.kisjm.cz/attachments/Nitratova směrnice bilance zivin.pdf](https://www.kisjm.cz/attachments/Nitratova%20smernice%20bilance%20zivin.pdf)
- Li F., Mistele B., Hu Y., Yue X., Yue S., Miao Y., Chen X., Cui Z., Meng X., Schmidhalter U. 2012. Remotely estimating aerial N status of phenologically differing winter wheat cultivars grown in contrasting climatic and geographic zones in China and Germany. *Field Crops Research* 138: 21–32.
- Li F., Mistele B., Hu Y., Chen X., Schmidhalter U. 2013: Comparing hyperspectral index optimization algorithms to estimate aerial N uptake using multi-temporal winter wheat datasets from contrasting climatic and geographic zones in China and Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180: 44-57.
- Li F., Mistele B., Hu Y., Chen X., Schmidhalter U. 2014a. Reflectance estimation of canopy nitrogen content in winter wheat using optimised hyperspectral spectral indices and partial least squares regression. *European Journal of Agronomy* 52: 198–209.
- Li F., Mistele B., Hu Y., Chen X., Schmidhalter U. 2014b. Optimising three–band spectral indices to assess aerial N concentration, N uptake and aboveground biomass of winter wheat remotely in China and Germany. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92: 112–123.
- Lukas V., Neudert L. 2016. Senzorové měření porostů zemědělských plodin pro variabilní aplikaci hnojiv a pesticidů. *Certifikovaná metodika pro praxi. Mendelova univerzita v Brně*. 51 s. ISBN 978–80–7509–460–5.
- Mistele B., Schmidhalter U. 2008. Estimating the nitrogen nutrition index using spectral canopy reflectance measurements. *European Journal of Agronomy* 29 (4): 184–190.
- Monteith J.L., Reifsnyder W.E. 2008. *Principles of Environmental Physics*. Elsevier, 177–178.

- Nařízení vlády č. 262/2012 Sb., o stanovení zranitelných oblastí a akčním programu, ve znění účinném od 1. července 2020.
- Nařízení vlády č. 292/2018 Sb. a č. 31/2020 Sb., kterými se mění nařízení vlády č. 48/2017 Sb., o stanovení požadavků podle aktů a standardů dobrého zemědělského a environmentálního stavu pro oblasti pravidel podmíněnosti a důsledků jejich porušení pro poskytování některých zemědělských podpor.
- Neudert L., Lukas V. 2015. *Precizní zemědělství – Technologie a metody v rostlinné produkci*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 240 s. ISBN 978–80–7509–311–0.
- Neupane J., Guo W. 2019. Agronomic basis and strategies for precision water management? A review. *Agronomy* 9, 87.
- Novotný M., Kervališvili D.M., Šanta M. 2000. *Závlaha polních a speciálních plodín*. 1. vydání, Bratislava, PRÍRODA: 312 s.
- Philip J.R. 1985. Approximate Analysis of the Borehole Permeameter in Unsaturated Soil. *Water Resources Research* 21 (7): 1025–1033.
- Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H., Sorooshian S., 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 48, 119–126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Raimanová I., Svoboda P., Kurešová G., Haberle J. 2016. The effect of different post-anthesis water supply on the carbon isotope discrimination of winter wheat grain. *Plant, Soil & Environment* 62(7): 329–334.
- Raimanová I., Svoboda P., Kurešová G., Henzlová B., Haberle J. 2018. Diskriminace ¹³C zavlažovaných a nezavlažovaných polních plodin a zelenin. *Úroda* 66 (12): 4 s.
- Rodriguez–Moreno F., Lukas V., Neudert L., Dryšlová T. 2014. Spatial interpretation of plant parameters in winter wheat. *Precis. Agric.* 15: 447–465. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9340-7>
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, In: S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (eds) *Third Earth Resources Technology Satellite–1 Symposium. Volume I: Technical Presentations*, NASA SP–351, NASA, Washington, D.C., pp. 309–317.
- Scharf P.C., Schmidt J.P., Kitchen N.R., Sudduth K.A., Hong S.Y., Lory J.A., Davis J.G. 2002. Remote sensing for N management. *Journal of Soil and Water Conservation* 57: 518–524.
- Svoboda P., Kurešová G., Neumannová A., Haberle J. 2017. Riziko vyplavení nitrátů u zelenin a plodin s různou hloubkou kořenů, *Úroda* 65 (12): 493–496.
- Svoboda P., Haberle J., Kurešová G. 2018. Hloubka kořenů polních plodin a zelenin a stanovení závlahové hloubky. In: „Vliv abiotických a biotických stresorů na vlastnosti rostlin 2018“ Zvolen, září 2018, 123–126.
- van Alphen B.J. 2002. A case study on precision nitrogen management in Dutch arable farming. *Nutrient Cycling in agroecosystems* 62: 151–161.
- Van Beek J., Tits L., Somers B., Coppin P. 2013. Stem Water Potential Monitoring in Pear Orchards through WorldView–2 Multispectral Imagery. *Remote Sens.* 5: 6647–6666; doi:10.3390/rs5126647.

- Woebbecke D., Meyer G., VonBargen K., Mortensen D. 1995. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transaction of ASAE* 38 (1): 271–281.
- Yang Y., Zhang J., Bao Z., Ao T., Wang G., Wu H., Wang J. 2021. Evaluation of Multi-Source Soil Moisture Datasets over Central and Eastern Agricultural Area of China Using In Situ Monitoring Network. *Remote Sensing* 13, 1175. <https://doi.org/10.3390/rs13061175>
- Zaghloul M.S., Hamza R.A., Iorhemen O.T., Tay J.H. 2020. Comparison of adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS) and support vector regression (SVR) for data-driven modelling of aerobic granular sludge reactors. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8, 103742. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103742>
- Zákon č. 156/1998 Sb., Zákon o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd (zákon o hnojivech), ve znění účinném k 1.11.2017.

VII) Seznam publikací, které předcházely metodice

- Brom J., Nedbal V., Duffková R., Fučík P., Křováková K. 2017. Identifikace kritických zdrojových lokalit pro oblast Kojčice. Soubor specializovaných map s odborným obsahem. 28 s. ISBN 978–80–7394–683–8.
- Duffková R., Lukas V., Fučík P., Marval Š. 2019. Může precizní zemědělství zvýšit účinnost dusíkatých hnojiv? *Úroda* 67 (12): 18–22.
- Haberle J., Svoboda P., Šimon T., Kurešová G., Henzlová B., Klír J. 2018a. Distribution of mineral nitrogen in soil in relation to risk of nitrate leaching in farms with irrigated vegetables and early potatoes. *Journal of Horticultural Research* 26: 47–54.
- Haberle J., Svoboda P., Lukáš J., Duffková R. 2018b. Identifikace kritických zdrojových lokalit pro oblast Kochánek a Sojovic. Soubor specializovaných map. VÚRV, v.v.i., Praha–Ruzyně. ISBN 978–80–7427–302–5.
- Haberle J., Lukas V., Svoboda, P., Lukáš J., Raimanová I. 2019. Mapy výnosového potenciálu v oblasti dolního Pojizeří. Soubor specializovaných map, VÚRV, v.v.i., Praha–Ruzyně, Mendelova univerzita v Brně. ISBN 978–80–7427–323–0
- Haberle J., Křížová K., Svoboda P., Lukáš J., Raimanová I., Stehlík M. 2020a. Využití projevů sucha u plodin pro monitoring prostorové variability půd. *Úroda* 68 (12), 8 s. (CD)
- Haberle J., Kurešová G., Křížová K., Lukáš J., Svoboda P., Raimanová I., Stehlík M. 2020b. Mapy prostorové variability vodní kapacity půdy. In: Rožnovský J. et al. (eds): *Hospodaření s vodou v krajině*, 9–10.9.2020, Třeboň, 1–14 (CD).
- Haberle J., Duffková R., Raimanová R., Fučík P., Svoboda P., Lukas V, Kurešová G. 2020c. The ¹³C Discrimination of Crops Identifies Soil Spatial Variability Related to Water Shortage Vulnerability. *Agronomy* 10, 1691. Doi:10.3390/agronomy10111691

- Horniaček I., Lukas V., Neudert L., Duffková R., Smutný V. 2020. Hodnotenie stavu výživy plodín pomocou bezpilotného prieskumu pre lokálne ciele hospodárenie na pôde. *Úroda* 68(12): 341–346. ISSN 0139–6013.
- Lukas V., Neudert L., Duffková R., Fučík P., Mezera J. 2018. Mapa výnosového potenciálu pro Zemědělské družstvo Kojčice. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 40 s. ISBN 978–80–7509–631–9.
- Lukas V., Neudert L., Širůček P., Elbl J., Duffková R. 2019. Estimation of winter wheat parameters for site-specific crop management by unmanned aerial multispectral imaging. Conference Paper in 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019; Albena; Bulgaria; 30 June 2019 – 6 July 2019; 19(2.2): 533–540. ISBN: 978–619–7408–80–5, ISSN: 1314–2704, DOI: 10.5593/sgem2019/2.2/S10.065
- Lukas V., Neudert L., Duffková R., Haberle J., Brom J., Horniaček I., Vaněček M. 2020a. Variabilní přihnojení dusíkem pomocí nástrojů GIS a vyhodnocení efektivity využití živin v rozdílných vláhových podmínkách. *Ověřená technologie*. Mendelova univerzita v Brně.
- Lukas V., Elbl J., Širůček P., Neudert L., Mezera J., Duffková R. 2020b. Význam zpracování aplikačních map pro lokálně cílenou agrotechniku zemědělských plodin. *Agromanuál* 9–10: 78–81.
- Nedbal V., Brom J., Duffková R. 2019. Water quality protection by spectral determination of precise doses of fertilizers on arable land. Conference Paper in 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019; Austria; 9 December 2019 – 12 December 2019; 19(1.4): 317–324. ISBN: 978–619–7408–97–3. ISSN 3114–2704, DOI: 10.5593/sgem2019V/1.4/S02.039
- Svoboda P., Raimanová I., Duffková R., Fučík P., Haberle J. 2019. Vliv závlahy na kořenový systém vybraných plodin. In: *Aktuální poznatky v pěstování, šlechtění, ochraně rostlin a zpracování produktů*, Brno. *Úroda* č. 12/2019 (CD).

English abstract

Methods of optical and thermal remote sensing for the evaluation of soil spatial variability in precision agriculture

The methodology is focused on the identification of soil spatial variability using advanced methods of optical and thermal remote sensing. Knowledge of soil variability is important for agronomic decision making in precision agriculture in order to adapt crop production activities to spatial changes of soil properties and crop status and to achieve their better efficiency. The demonstration of soil variability is highlighted by drought in many agricultural parcels, where nutrient uptake is significantly affected by soil water retention.

The methodology provides procedures for i) delimitation of critical source (recharge) areas with high soil permeability and low soil water retention, ii) creation of background maps for variable rate fertilization, iii) evaluation of biomass parameters and water retention in soil and iv) nitrogen balance and accumulation of soil residual nitrogen. The procedures are based on aerial hyperspectral and thermal imaging and multispectral images from satellites and unmanned aerial vehicles (UAVs). The common goal of all methods is to increase the efficiency of the fertilizer applied for yield production and to reduce the risk of nitrogen (nitrate) losses by leaching into groundwater.

Seznam zkratek

- AZZP – agrochemické zkoušení zemědělských půd
BPEJ – bonitovaná půdně ekologická jednotka
CWSI – plodinový stresový index (crop water stres index)
DPB – díl půdního bloku
DPZ – dálkový průzkum Země
DZES – dobrý zemědělský a environmentální stav půdy
EVI – Enhanced vegetation index
Ks – nasycená hydraulická vodivost
LPIS – Land parcel identification system (evidence využití zemědělské půdy)
MSAVI – modified soil-adjusted vegetation index
N – dusík
N_{akt} – aktuální obsah dusíku v biomase
NDMI – Normalized Difference Moisture Index
NDRE – Normalized difference red edge index
NIR – blízké infračervené elektromagnetické spektrum (near infrared)
N_{krit} – kritický obsah dusíku v biomase (minimální obsah N potřebný pro maximální produkci biomasy)
N_{min} – obsah minerálního půdního dusíku
NNI – nitrogen nutrition index (index výživy dusíkem)
PB – půdní blok
PVK – polní vodní kapacita (maximální množství zavěšené vody, které může půda pojmout a zadržet po delší dobu kapilárními póry, tj. póry s průměrem < 0,2 mm)
PZ – precizní zemědělství
r = korelační koeficient
RE - RED-edge – rozhraní mezi červeným a infračerveným spektrem
RED – červené elektromagnetické spektrum
REIP - Red Edge Inflection Point
RVP – relativní výnosový potenciál
SWIR – krátkovlnné infračervené elektromagnetické spektrum (short wave-infrared)
UAV – Unmanned Aerial Vehicle (dron, bezpilotní letadlo)
UNI – uniformní (plošně rovnoměrná) aplikace hnojiva
VAR/VRA – variabilní aplikace hnojiva
VP – výnosový potenciál
ZD – zemědělské družstvo
ZOD – zranitelné oblasti dusičnany
 $\Delta^{13}\text{C}$ – diskriminace izotopu ^{13}C

Pozn.: Některé zkratky jsou vysvětleny přímo pod tabulkami, kde je jejich uvedení z hlediska kontextu vhodnější

Příloha 1

Vegetační indexy z UAV snímkování na Českomoravské vrchovině:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR}-\text{RED})/(\text{NIR}+\text{RED})$$

$$\text{NDRE} = (\text{NIR}-\text{RE})/(\text{NIR}+\text{RE})$$

$$\text{GNDVI} = (\text{NIR}-\text{G})/(\text{NIR}+\text{G})$$

$$\text{SRI} = \text{NIR}/\text{RED}$$

$$\text{ChI_Index} = (\text{NIR}-\text{RED})/(\text{RE}-\text{RED})$$

$$\text{NRERI} = (\text{NIR}-\text{RE})/(\text{NIR}-\text{RED})$$

$$\text{RENDVI} = (\text{RE}-\text{RED})/(\text{RE}+\text{RED}), \text{RED} = 705$$

$$\text{SAVI} = 1,5 * ((\text{NIR}-\text{R})/(\text{NIR}+\text{R}+0,5))$$

$$\text{MSAVI2} = 0,5 * (2 * (\text{NIR}+1) - \text{SQRT}((2 * \text{NIR}+1)^2 - 8 * (\text{NIR}-\text{RED})))$$

$$\text{EVI2} = 2,5 * (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + 2,5 * \text{RED} + 1)$$

Vegetační index EVI pro RVP:

$$\text{EVI} = 2,5 * (\text{NIR}-\text{RED}) / (1 + \text{NIR} + 6 * \text{RED} - 7,5 * \text{BLUE})$$

Vegetační index REIP:

$$\text{REIP} = 700 + 40 \frac{\frac{R_{670} + R_{780}}{2} - R_{700}}{R_{740} - R_{700}}$$

Vegetační index NDMI

$$\text{NDMI} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

