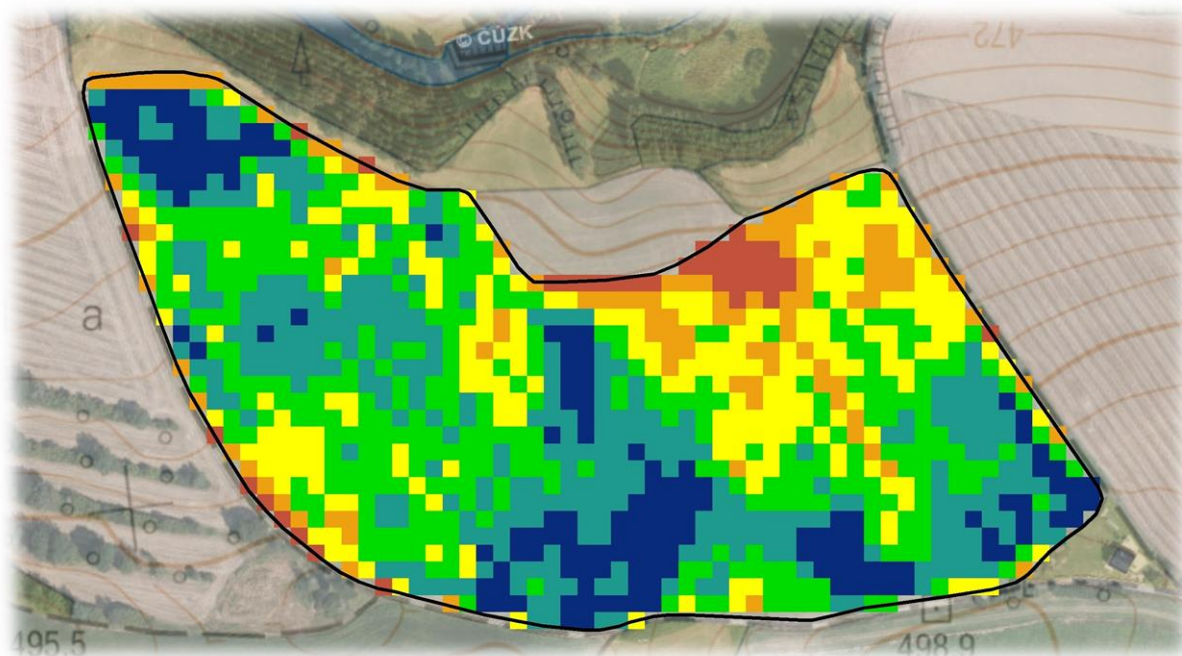


## Ověřená technologie ( $Z_{tech}$ )



### Variabilní přihnojení dusíkem pomocí nástrojů GIS a vyhodnocení efektivity využití živin v rozdílných vláhových podmínkách

Lukas V., Neudert L., Duffková R., Haberle J., Brom J., Horniaček I., Vaněček M.

Výstup z projektu TAČR TH02030133

„Zemědělský systém hospodaření integrující efektivní využití živin plodinami a ochranu vod před plošnými zdroji znečištění“

*Technická dokumentace výsledku*

*(popis technologie včetně protokolu o způsobu a vlastním testování ověřené technologie)*



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



**VÚRV**  
Výzkumný ústav  
rostlinné výroby

*Poznatky pro udržitelné zemědělství*



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



MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

**Variabilní přihnojení dusíkem pomocí  
nástrojů GIS a vyhodnocení efektivity  
využití živin v rozdílných vláhových  
podmínkách**

Z<sub>tech</sub> – Ověřená technologie

Vojtěch Lukas, Lubomír Neudert, Renata Duffková,  
Jan Haberle, Jakub Brom, Igor Horniaček, Milan  
Vaněček

2020

## **Variabilní přihnojení dusíkem pomocí nástrojů GIS a vyhodnocení efektivity využití živin v rozdílných vláhových podmínkách**

Ověřená technologie popisuje postupy sběru dat a zpracování podkladů pro tvorbu aplikačních map v GIS z dat DPZ. V rámci tvorby aplikační mapy je popsána strategie doporučení intenzity dusíkaté výživy pro variabilní aplikaci hnojiv s využitím výnosového potenciálu, resp. jeho kombinace s aktuálním výživovým stavem rostlin diagnostikovaným pomocí vegetačních indexů, a to včetně zohlednění rozdílných vláhových podmínek půdy. Z výsledků polních experimentů byl vyhodnocen vliv hnojení a půdních typů na výnosy zrna a efektivitu využití dusíku s využitím analýz z bodového vzorkování.

## **Variable nitrogen fertilization using GIS tools and evaluation of nutrient efficiency in different soil moisture conditions**

Presented verified technology describes procedures for data collection and data processing for the creation of variable rate application (VRA) maps in GIS from remote sensing data including the strategy of variable application of nitrogen based on the delineation of yield potential zones and under the consideration of different soil moisture conditions. Also the combination with the diagnosis of current nutritional status of plants by remote sensing is reflected. From the results of field experiments, the influence of fertilization and soil heterogeneity on grain yields and nitrogen utilization efficiency was evaluated using point sampling analyzes.

**Ověřená technologie** 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.**

### **Autorský kolektiv:**

Ing. Vojtěch Lukas, Ph.D., Mendelova univerzita v Brně

Ing. Lubomír Neudert, Ph.D., Mendelova univerzita v Brně

Ing. Renata Duffková, Ph.D., Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.

Ing. Jan Haberle, CSc., Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.

doc. Ing. Jakub Brom, Ph.D., Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Ing. Igor Horniaček, Mendelova univerzita v Brně

Milan Vaněček, ZD Kojčice

### **Recenzenti:**

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

Ing. Josef Svoboda, Ph.D. - Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský

Technická dokumentace výsledku

(popis technologie včetně protokolu o způsobu a vlastním testování ověřené technologie)

**© Mendelova univerzita v Brně, 2020**

## I. ÚVOD

Prezentovaná ověřená technologie „Variabilní přihnojení dusíkem pomocí nástrojů GIS a vyhodnocení efektivity využití živin v rozdílných vláhových podmínkách“ si klade za cíl praktické využití technologií a metod hodnocení stavu stanoviště a porostů polních plodin a jejich uplatnění při lokálně cílené aplikaci dusíkatých hnojiv, jako součást postupů tzv. precizního zemědělství.

Předložený technický popis technologie popisuje pracovní postup, který koriguje intenzitu zásahu podle relativního produkčního potenciálu daného místa a analýz dat získaných z DPZ. To znamená, že potřeba použití intenzity zásahu je korigována dle očekávaného výnosu na dané části pozemku a digitálního modelu terénu. To vede k efektivnějšímu využití vstupů – vyšší intenzita u slabších porostů je provedena pouze za předpokladu očekávaného nadprůměrného výnosu na daném místě.

## II. LITERÁRNÍ PŘEHLED K DANÉ PROBLEMATICE

### 1. Variabilní přihnojení hnojení dusíkem

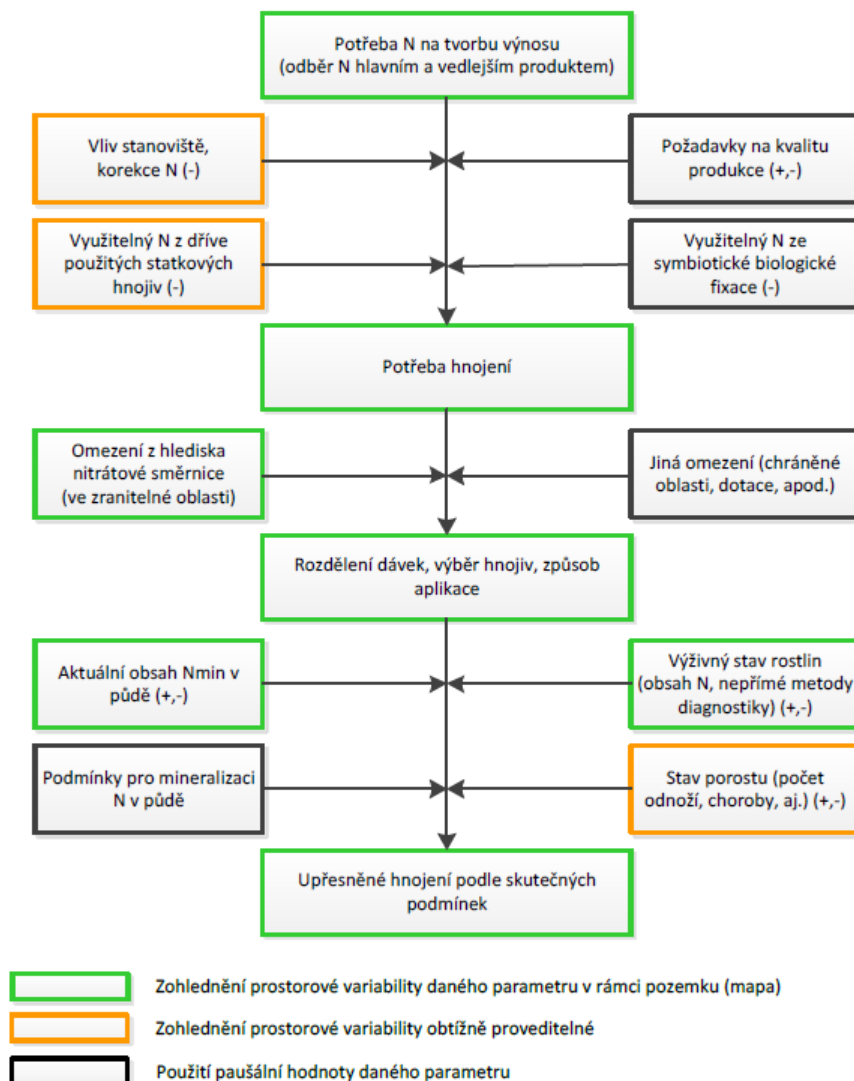
Principem lokálně cíleného zemědělství je přizpůsobení pěstebních operací aktuálním (lokálním) podmínkám stanoviště (Neudert a Lukas, 2015). Variabilní aplikace hnojiv představuje klíčovou technologii při lokálně cíleném hospodaření na zemědělské půdě. Na rozdíl od tradičně prováděné uniformní aplikace hnojiv jsou zohledňovány lokální rozdíly v zásobě přístupných živin v půdě nebo výživného stavu porostů v rámci jednotlivých pozemků.

Cílem precizního zemědělství je rozdílným obhospodařováním uvnitř každého pozemku dosáhnout zvýšené efektivity využívání materiálových vstupů (hnojiva, pesticidy, PHM, apod.) dle stavu půdy, rostlin, dosahovaného výnosu a únosnosti daného prostředí. Wittry a Mallarino (2004) ukazují na příkladu aplikace fosforečných hnojiv, že variabilní aplikace nemusí vést ke prokazatelnému zvýšení výnosu pěstované plodiny. Dosahuje ale vyšší efektivity užívání hnojiv snížením celkové dávky o 12 – 42 % a snížením plošné variability obsahu fosforu v půdě. Jak ve své práci konstatují Robertson et al. (2008), ekonomické přínosy variabilní aplikace hnojiv se zvyšují s vyšší variabilitou dosahovaných výnosů v rámci pozemků. Ačkoli vyšší rozpětí hodnot výnosu lze lépe pokrýt postupným přidáváním management zón, zvýšení počtu zón mělo jen nízký vliv na ekonomické benefity. Lawes a Robertson (2011) analyzovali ekonomický přínos variabilní aplikace hnojiv na vybraných farmách v západní Austrálii. Výsledky se lišily napříč jednotlivými farmami, ale obecně lze konstatovat, že pouze třetina pozemků generovala prokazatelně zisk při variabilní aplikaci. Prostorová variabilita výnosů a půdní úrodnosti přitom hrála významnější roli než náklady na materiál či výkupní ceny produkce.

Řada postupů návrhu variabilních aplikací v precizním zemědělství vychází z konceptu vymezení management zón a následné nastavení úrovně intenzity prováděného pěstebního zásahu. Aplikace dusíkatých hnojiv patří mezi hlavní pěstební operace prováděné diferencovaně v rámci plochy jednotlivých pozemků.

Pro **variabilní aplikace dusíkatých hnojiv** lze mapy produkčních zón využít zejména pro základní hnojení dusíkatými hnojivy nebo přihnojení v raných fázích růstu plodin. Pro pozdější přihnojování je vhodné produkční zóny doplnit o výsledky průběžného monitoringu aktuálního stavu porostů z dálkového průzkumu nebo sensorového měření (plodinové senzory). Výchozím předpokladem při aplikaci N hnojiv dle podkladové mapy produkčních zón je zvýšení dávky hnojení na místech s vyšším očekávaným výnosem. Výše maximální dávky je stanovena s ohledem na odběr živiny a průběh povětrnostních podmínek v daném roce. V oblastech s opakovaným výskytem poléhání porostu v zónách s nejvyšším výnosem lze doporučit významné snížení úrovně hnojení. Podkladová mapa potenciálního výnosu je využívána některými sensorovými systémy pro stanovení dávky dusíkatého hnojení bez kalibračního

měření na pozemku. Např. Fritzmeier Isaria nabízí tzv. absolutní mód měření, kdy je dávka hnojiva určena na základě křivky optimálního obsahu dusíku pro rozdílnou výnosovou úroveň.



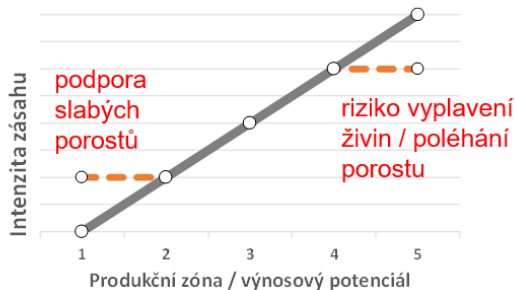
**Obr. 1** Postup při stanovení hnojení ploidin dusíkem (Klír et al., 2008) se zvýrazněním možnosti zohlednění prostorové variability v rámci jednotlivých pozemků (Lukas et al., 2012)

## 2. Princip stanovení dávek dusíkatého hnojení

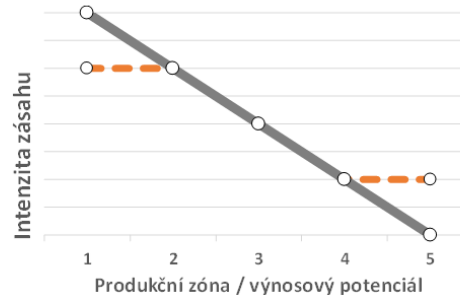
Dlouhodobý trend hodnocení nevyrovnanosti pozemků z map relativního výnosového potenciálu byl na základě výsledků řešení projektu v uplynulých letech doplněn o korekci rozložení dávek na základě hodnocení aktuálního stavu porostů pomocí vegetačních indexů vypočtených z družicových snímků Sentinel-2.

**Posilovací (aditivní)**

- S vyšší hodnotou očekávaného výnosu (produkčních zón) se zvyšuje intenzita zásahu
- Úprava extrémních hodnot dle aktuální situace (riziko poléhání porostů, výsušné stanoviště, podpora slabých porostů, ...)

**Kompenzační**

- Intenzita zásahu se snižuje se zvyšující se hodnotou výnosového potenciálu



Obr. 2 Strategie určení intenzity variabilně prováděného zásahu na základě vymezení produkčních zón

## 2.1. Využití dálkového průzkumu pro diagnostiku stavu porostů v precizním zemědělství

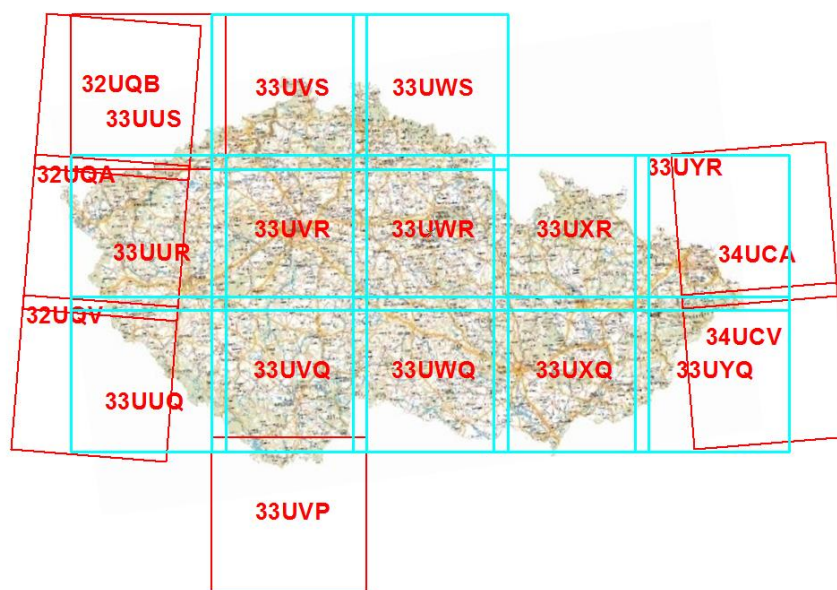
Dálkový průzkum Země (DPZ) poskytuje informace o prostorových a časových změnách veličin významných pro hodnocení stavu plodin, které jsou jinými postupy jen obtížně zachytitelné, a umožňuje tak modelovat chování agroekosystému pro maximalizaci produkce se současnou minimalizací environmentálních rizik (Dorigo et al., 2007). S postupným zaváděním těchto metod do zemědělství se dálkový průzkum vyvinul do podoby cenného nástroje pro podporu agronomického rozhodování, jak popisují např. Hatfield et al. (2008). Hodnocení vazby mezi daty DPZ a dosahovanými výnosy je předmětem celé řady vědeckých studií (Diker et al., 2004; Quarmby et al., 1993; Thenkabail, 2003; Wall et al., 2008). Celoplošné pokrytí zájmového území daty DPZ umožňuje sledování variability výnosů v rámci jednotlivých pozemků a určit tak základní faktory, které ji ovlivňují. Jak ukazuje Kumhálová et al. (2014) na základě hodnocení vegetačního indexu Moisture stress index z Landsat 5, variabilita výnosů zemědělských plodin je významně ovlivněna topografickými faktory na těch pozemcích, kde je rozdílná distribuce půdní vláh. Výsledky mohou být následně uplatněny zemědělskými podniky při návrhu lokálně cíleného hospodaření.

Základním vstupem pro výpočet relativního výnosového potenciálu v mapové podobě jsou družicové multispektrální snímky, hranice pozemků v digitální vektorové podobě doplněné o záznamy z agronomické evidence zemědělského podniku.

**Družicová obrazová data** umožňují zachycení rozsáhlého území v krátkém časovém intervalu s vysokou periodicitou, která je vhodná pro zachycení dynamiky přírodních jevů. Díky svým vlastnostem a bezplatnou dostupností je jedním z nejčastěji využívaných zdrojů družicových



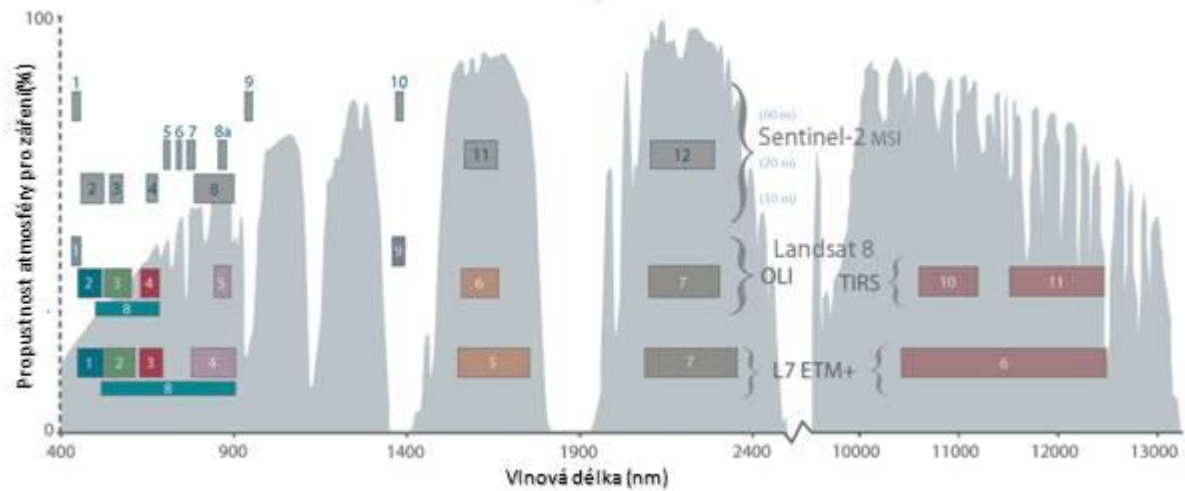
dat pro precizní zemědělství program NASA a USGS (USA) Landsat. Ten představuje ucelenou řadu družicových misí zaměřených na multispektrální a termální průzkum povrchu naší planety (Irons et al., 2012; Roy et al., 2014). Průzkum byl zahájen vypuštěním první družice v roce 1972. Vzhledem k této historické řadě jsou data velmi rozšířená v nejrůznějších aplikacích dálkového průzkumu Země. Novější generaci představují senzory Landsat OLI a TIRS, provozované na družici Landsat 8 LDCM. Multispektrální senzor OLI pokrývá 9 pásem v oblasti viditelného, blízké infračerveného (NIR) a krátkovlnného infračerveného (SWIR) záření; termální senzor TIRS pak přidává další 2 pásma v termálním infračerveném spektru. Prostorové rozlišení multispektrálního skeneru je 30m / pixel. Všechny scény pořízené družicemi Landsat jsou standardizované – družice přelétají nad zeměkoulí po 232 drahách, šířka záběru snímacího zařízení je 183 kilometrů. Obrazová data v podobě jednotlivých scén jsou dostupná po registraci na stránkách USGS ([earthexplorer.usgs.gov](http://earthexplorer.usgs.gov)), vč. automatického upozorňování na nové snímky vybraného území; velikost jedné scény se všemi spektrálními pásmy je zhruba 2 GB. Družicové snímky jsou dodávány po základním geometrickém zpracování (Level 1). Pro digitální analýzu obrazu je vyžadováno předzpracování na straně uživatele, zahrnující radiometrické a atmosférické korekce. I když plán návratu družice Landsat na určité místo na Zemi (angl. Revisit Time) je dobře znám (perioda 16 dní, pro oblasti s překryvem scén 8 dní), je obvyklé, že se v průběhu vegetačního období nepodaří vzhledem k častému výskytu oblačnosti pořídit v daný termín použitelný snímek. To snižuje použitelnost snímků pro plánování pěstebních operací.



Obr. 3 Rozložení dlaždic družicových snímků Sentinel-2 o velikosti 100 x 100 km nad územím ČR.

V roce 2015 byla v rámci programu Evropské kosmické agentury ESA Copernicus vypuštěna družice Sentinel 2A, která tematicky navazuje na misi Landsat. Pořizuje multispektrální obrazová data ve 13 pásmech s prostorovým rozlišením 10, 20 a 60 metrů v závislosti na vlnové délce o celkové šířce záběru 290 km. Konfigurace spektrálních pásem umožňuje výpočet vegetačních indexů v oblasti red-edge (Drusch et al., 2012). V roce 2017 byla doplněna družice

Sentinel 2B, časové rozlišení tandemu družic bude 5 dní (pro oblast rovníku, pro naši zeměpisnou šířku je 3-4 dny).



Obr. 4 Schéma porovnávající spektrální pásma družic Landsat 7, Landsat 8 a Sentinel 2. Sentinel 2 svoji spektrální konfigurací navazuje na družice Landsat, současně ale přidává několik úzkých pásem v oblasti NIR záření s vyšší citlivostí na změny vegetačních parametrů. Zdroj: <http://landsat.gsfc.nasa.gov>

### III. OVĚŘENÁ TECHNOLOGIE

#### 3. Popis Ověřené technologie

Úkolem Ověřené technologie je v praxi ověřit a zhodnotit postup, který byl navržen řešiteli v rámci řešení projektu TAČR č. **TH02030133** s názvem „**Zemědělský systém hospodaření integrující efektivní využití živin plodinami a ochranu vod před plošnými zdroji znečištění**“. Ověřovaný postup slouží k praktickému stanovení diferencovaných dávek při přihnojování porostů pšenice ozimé na základě detailnějších znalostí heterogenity půdních vlastností.

#### 4. Vlastní ověření a dosažené výsledky

Testování **Ověřené technologie pro variabilní přihnojení dusíkem pomocí nástrojů GIS a vyhodnocení efektivity využití živin v rozdílných vláhových podmínkách** proběhlo formou poloprovozního polního testování na pozemcích zemědělského podniku ZD Kojčice u Pelhřimova od 2017 do 2020.

Vlastní ověřování a zpracování výsledků probíhalo dle následujícího postupu:

1. Výběr vhodných testovacích pozemků a popis stanoviště
2. Stanovení zón relativního výnosového potenciálu (RVP) z družicových dat
3. Tvorba podkladů pro variabilní aplikaci dusíkatých hnojiv
4. Provedení variabilního hnojení dusíkatými hnojivy
5. Hodnocení stavu porostu během vegetace
6. Vyhodnocení výnosových dat ve vztahu k dosahovanému výnosu.

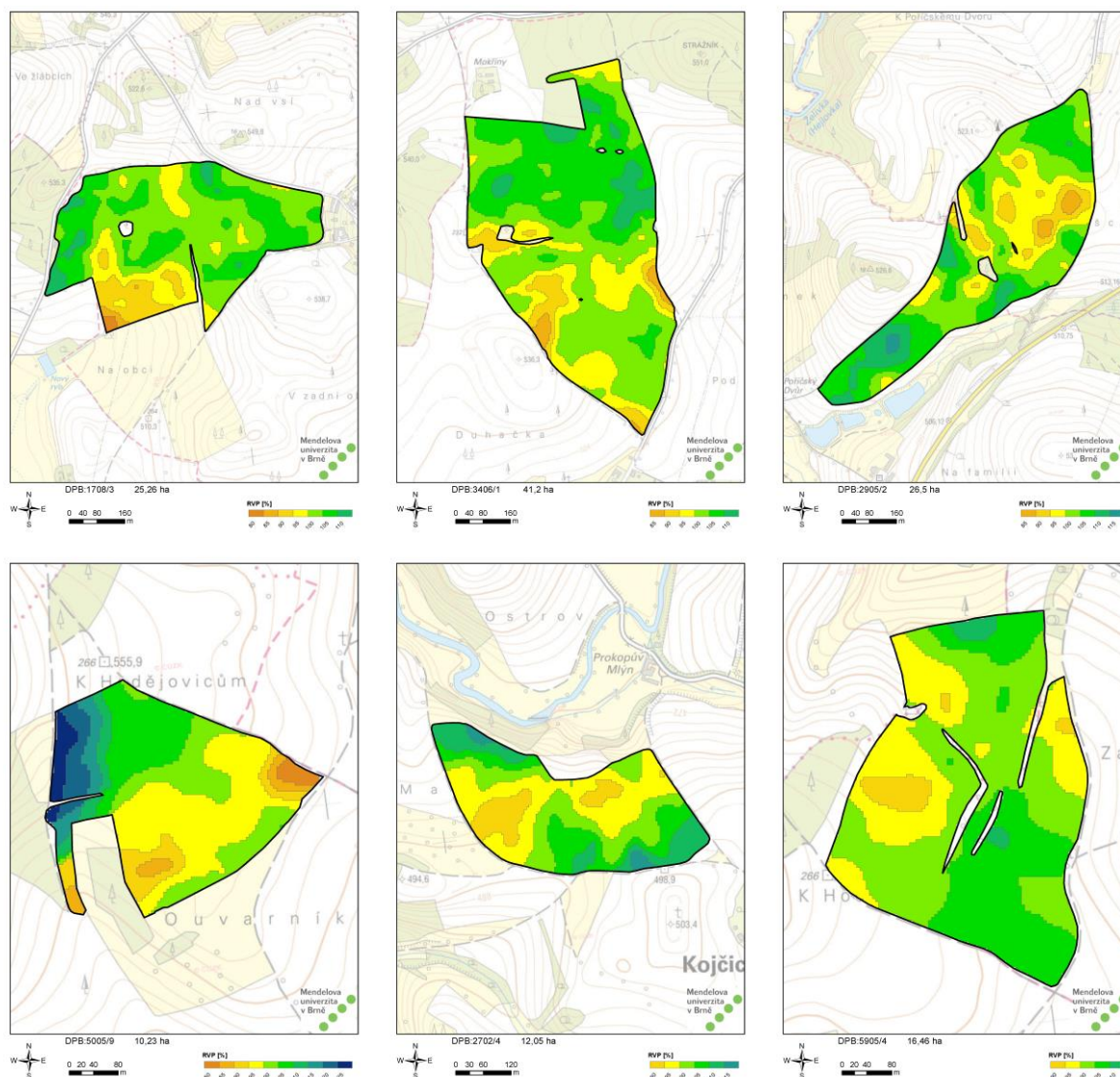
#### 4.1. Popis testovacích lokalit

Pro pokusné účely bylo v letech 2017 - 2020 vybráno šest půdních bloků (PB) v bramborářské výrobní oblasti s výrazně heterogenními půdními podmínkami, které jsou obhospodařovány Zemědělským družstvem Kojčice. Základním kritériem pro výběr pozemků bylo osetí ozimou pšenicí, vyšší heterogenita stanovená z map relativního výnosového potenciálu, vyšší výměra a vhodnost pro terénní a dálkový průzkum. S výjimkou roku 2019, kdy byl pěstován jarní ječmen, byla ve všech ostatních případech ověřování provedeno na porostu s pšenicí ozimou. Na vybrané části PB byly dávky hnojiva s minerálním dusíkem aplikovány variabilně na základě dlouhodobého výnosového potenciálu (2017-2018, 2020) a podle aktuálního živinného stavu porostu odvozeného ze satelitních snímků Sentinel-2A/B (2018, 2020). Na ostatních částech PB bylo hnojivo aplikováno homogenně, tj. v plošně rovnoměrných dávkách. V roce 2019 bylo hnojení aplikováno pouze v homogenní dávce. Plošný záznam výnosu byl zjištěn pomocí výnosové mapy pořízené sklízecí mlátičkou vybavenou výnosoměrným čidlem a GPS se záznamem výnosů zrna.

**Tab. 1** Přehled půdních bloků ZD Kojčice vybraných pro ověřování variabilní aplikace dusíkatých hnojiv v letech 2017 - 2020

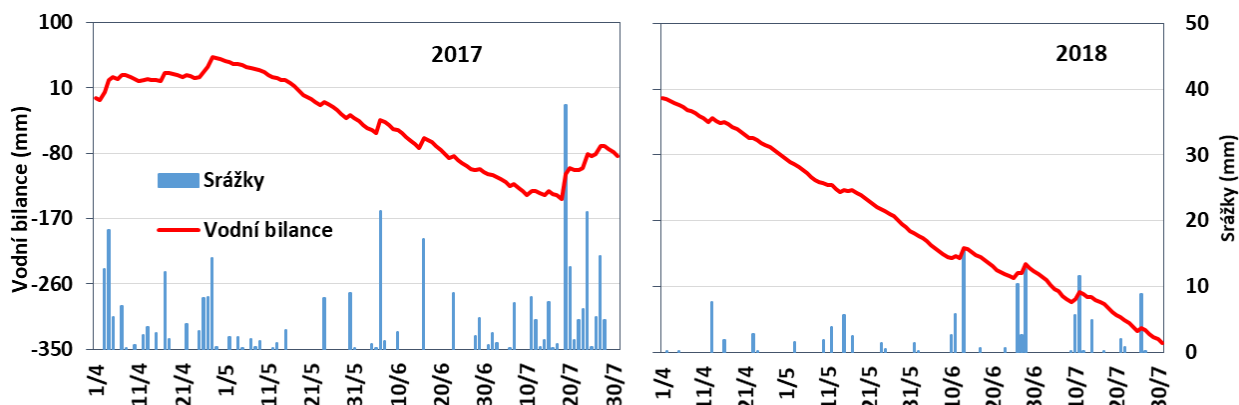
Lokalita	Kat. území	Pozemek	ZKOD	Výměra [ha]	Rozpětí RVP [%]	Plošina	Nadm.výška [m n.n.m.]	Prům.sklon [°]	Půdní typy
PB1 (2017)	Dehtáře	Za Vaněčkovi	1708/3	25.3	90-115	pšenice oz.	523,9	4.2	KAm, KAg, KAr, PGm
PB2 (2017)	Svépravice	Mokřiny	3406/1	41.4	70-120	pšenice oz.	530,6	2.6	KAm, KAm(g'), KAs, PGm, RNk
PB3 (2018)	Kojčice	Vrcha	2905/2	26.5	85-110	pšenice oz.	515,0	4.4	KAm, KAm(g'), KAr, KAs, RNk
PB4 (2018)	Krasíkovice	Kazy	5005/9	10.2	80-120	pšenice oz.	550,0	2.8	KAm, KAr, KAs, RNk
PB5 (2020)	Kojčice	Makytí	2702/4	12.1	80-110	ječmen jar.	487,6	3.5	KAm (KAd)
PB6 (2020)	Krasíkovice	U Mouček	5905/4	18.2	80-105	pšenice oz.	543,9	3.7	KAm (KAd)

V rámci čtyřletého sledování byly pokusné činnosti prováděny na šesti vybraných půdně variabilních PB v okolí obcí Dehtáře, Svépravice, Kojčice a Krasíkovice (**Tab. 1**). Půdní variabilita souvisela i s variabilitou výnosovou v důsledku výskytu různých půdních typů lišících se půdní úrodností – viz **Obr. 3** s vyznačeným dlouhodobým výnosovým potenciálem z let 2013-2019. Na PB převažovala kambizem modální (KAm), dále se vyskytovala kambizem modální slabě oglejená KAm(g'), kambizem oglejená (KAg), pseudoglej modální (PGm), kambizem arenická (KAr), kambizem rankerová (KAs), ranker kambický (RNk) a kambizem dystrická (KAd). Vyšší výnosy byly na KAm, KAm(g'), PGm a KAs. Půdní substrát (migmatit, rula, pararula) byl v různém stupni rozpadu.

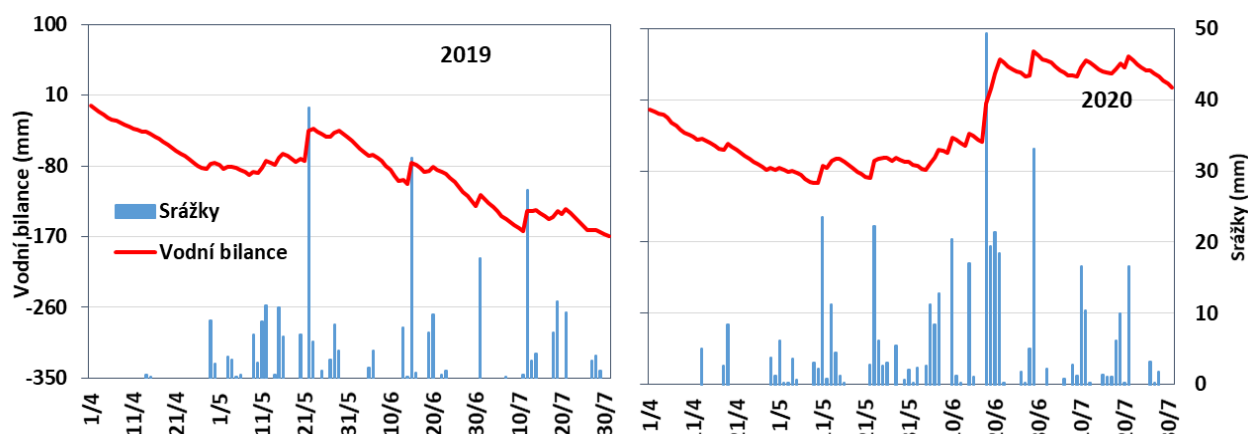


**Obr. 5** Mapové znázornění rozložení relativního výnosového potenciálu (RVP) na ověřovaných pozemcích ZD Kojčice (Lukas et al., 2018)

Průběh počasí v jednotlivých letech sledování se velmi lišil. Dokladem toho je odlišný průběh vodní bilance na **Obr. 4 a 5**, která byla zjištěna na základě denního rozdílu kumulativních srážek a potenciální evapotranspirace podle Penmana (Penman, 1948) v období 1.4.-31.7. Záporná vodní bilance představuje vodní deficit. V roce 2017 byl porost ovlivňován vodním stresem nejvíce v květnu. Rok 2018 byl nejsušší za celé sledované období, vodním deficitem bylo poznamenáno celé vegetační období (vodní bilance 1.4.-31.7 = -338 mm). Roky 2019 a 2020 byly suché pouze na počátku vegetační sezóny (duben). Nejvlhčím rokem byl rok 2020, jehož vodní bilance zobrazená na **Obr. 5** byla pozitivní (1.4.-31.7 = +25 mm). **Tabulka 2** uvádí měsíční optimální srážky pro pšenici ozimou a ječmen jarní, které se většinou výrazně odlišují od skutečných měsíčních hodnot v jednotlivých letech pozorování.



**Obr. 6** Srážky a vodní bilance (rozdíl mezi srážkami a evapotranspirací podle Penmana) 2017 (Svépravice) a 2018 (Krasíkovice)



**Obr. 7** Srážky a vodní bilance (rozdíl mezi srážkami a evapotranspirací podle Penmana) 2019 (Svépravice) a 2020 (Krasíkovice)

**Tab. 2** Optimální srážky a úhrny srážek (mm) v jednotlivých měsících vegetačního období v letech 2017-2020. V měsíci sklizně jsou sumy srážek pouze do termínu sklizně (2017 = 3.8., 2018 = 20.7., 2019 14.8., 2020 21.8.)

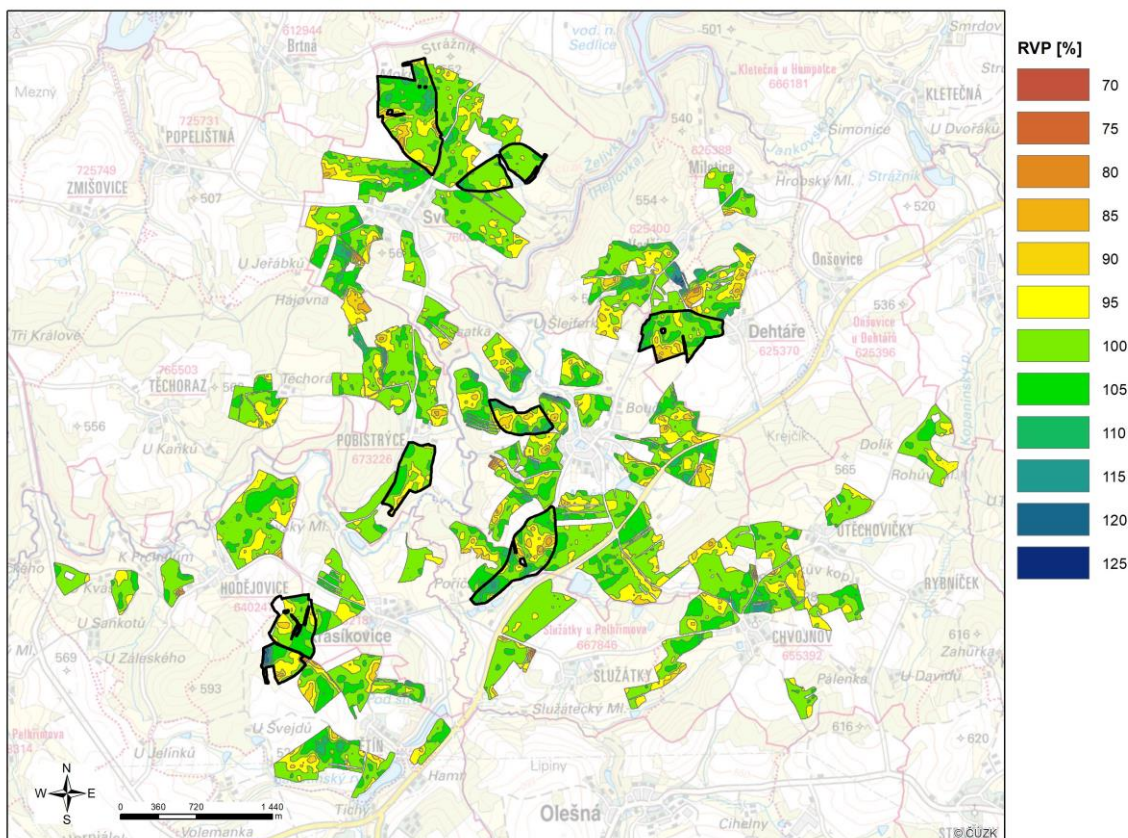
Rok	plodina	duben	květen	červen	červenec	srpen	celkem
Optimální srážky +	Pšenice ozimá	35	65	70	60		230
	Ječmen jarní	50	60	70	45		225
2017 (Svépravice)	Pšenice ozimá	98	28	58	141	0	325
2018 (Krasíkovice)	Pšenice ozimá	13	17	52	23		105
2019 (Svépravice)	Ječmen jarní	18	114	61	83	18	294
2020 (Krasíkovice)	Pšenice ozimá	21	102	226	76	7	432

Zdroj: Rehák a kol. (2015)

## 4.2. Stanovení zón relativního výnosového potenciálu (RVP) z družicových dat

Základní princip tvorby podkladových map pro variabilní aplikaci hnojiv vycházel z vymezení management zón pro pokusné pozemky na základě identifikace rozložení výnosových hladin za delší časové období. Pro tyto účely jsou běžně využívány víceleté výnosové mapy vytvořené ze záznamů pořízených sklízecí technikou při sklizni, ze kterých je provedena identifikace podprůměrně a nadprůměrně výnosných částí pozemků (Blackmore, 2000; Kleinjan et al., 2007). Ucelený sběr výnosových záznamů sklízecí technikou je ale v zemědělských podnicích spíše výjimečný a vyžaduje pokročilé postupy filtrace odlehlých a chybných hodnot (Širůček, 2014; Vega et al., 2019). V případě zvoleného zemědělského podniku pro poloprovozní testování nejsou historické záznamy ze sklízecí techniky k dispozici, využil se tedy postup vymezení zón relativního výnosového potenciálu z analýzy víceleté řady (8 let) družicových dat. Podrobnosti postupu zpracování družicových snímků a výsledné mapy RVP uvádí (Lukas et al., 2018).

Pro výpočet jsou vybírány scény z druhé poloviny vegetačního období zemědělských plodin s minimální oblačností a aplikací radiometrických a atmosférických korekcí. Z důvodu nezbytné eliminace všech rušivých jevů v obraze je aplikována maska oblačnosti (klasifikace scény) pro vyfiltrování husté i řídké oblačnosti, stínů oblačnosti, oparu a dalších nežádoucích jevů. Příslušná maska je součástí dat zpracování snímků na úrovni L2A, v případě snímků Landsat zpracovaných algoritmem *CFmask* (Zhu et al., 2015), u Sentinel-2 se pak jedná o výsledky zpracování algoritmu *sen2cor* (Vuolo et al., 2016). Z takto připraveného souboru scén je následně vypočtena relativní hodnota pro danou scénu a pozemek a následně střední hodnota napříč všemi připravenými scénami. Původní prostorové rozlišení (30 m pro Landsat, 10 m pro Sentinel-2) je pomocí metod prostorových interpolací vyhlazeno na výsledných 5 m na pixel. S ohledem na prostorové rozlišení vstupních dat nelze kvůli nedostatečnému počtu pixelů provést výpočet pro plochy menší než 5 ha. Výpočet také zahrnuje eliminaci okrajových ploch, které mohou být u pozemků v blízkosti lesních porostů zakryty korunami stromů. Vymezení ploch je dáno hranicemi vedenými v databázi LPIS a nekoresponduje vždy s jednotlivými plodinami; v případě pěstování více plodin na jednom dílu půdních bloků (DPB) je třeba dodat zpřesňující geometrii hranic jednotlivých plodin či ji manuálně upravit.



**Obr. 8** Mapa relativního výnosového potenciálu pro pozemky obhospodařované ZD Kojčice za období 2013-2018 (Lukas et al., 2018). Pokusné pozemky jsou vyznačeny silnou černou linií.

Jedná se o alternativu pro případy absence dat z mapování výnosů při sklizni plodin, ať z důvodu nedostupnosti dostatečného technického vybavení sklízecích mlátiček, anebo pro plodiny, jejichž měření výnosu při sklizni není rozšířeno (silážní kukuřice, pícniny, okopaniny a další skupiny plodin). Relativní výnosový potenciál je vypočten jako procentuální vyjádření dosažené produktivity na daném místě vůči průměrné hodnotě za celý pozemek; vždy jednotlivě pro každé sledované vegetační období s následným zprůměrováním za celou časovou řadu dat.

V případě využití dat dálkového průzkumu Země je základním principem hodnocení analýza nevyrovnanosti porostů ve vybraných částech vegetačního období na základě vegetačních indexů a kvantifikace vůči průměrné hodnotě pozemku v daném termínu sledování. Výsledkem je identifikace výnosově podprůměrných nebo nadprůměrných oblastí na pozemcích napříč sledovanými ročníky. Toto stanovení lze provést pro jakékoli území pokryté dostatečným počtem bezoblačných družicových snímků a digitálním zmapováním hranic pozemků (např. Registr zemědělské půdy LPIS) doplněné o základní agronomickou evidenci pěstovaných plodin. V případě dostupnosti výnosových map lze procentuální rozpětí relativního výnosového potenciálu korigovat o reálně zmapované výnosy na daném území. Postup tvorby map relativního výnosového potenciálu pro ZD Kojčice je popsán ve Specializované mapě s odborným obsahem (Nmap), která je výsledkem řešení projektu za rok

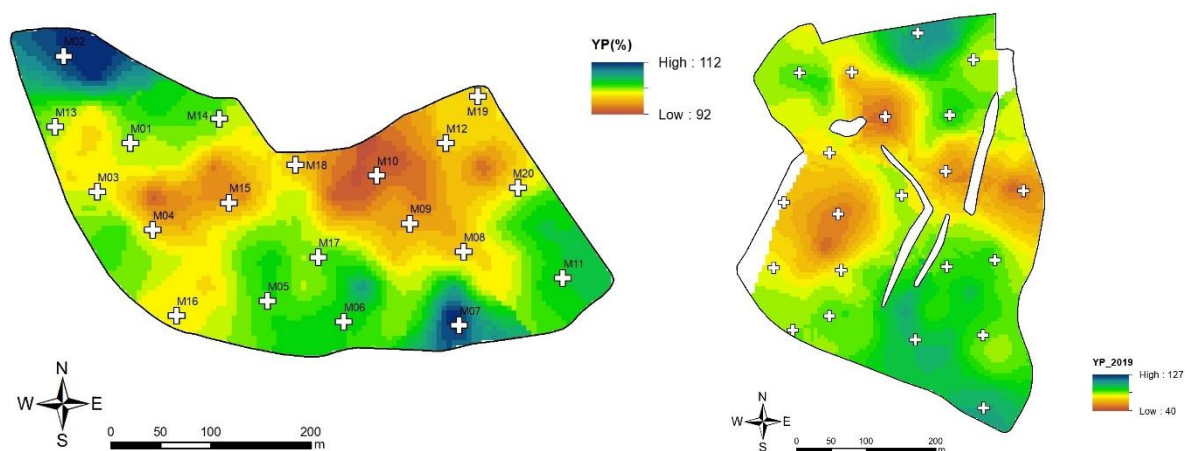


2018 (Lukas et al., 2018). Mapa byla pro každý rok aktualizovaná z multispektrálních snímků zahrnující poslední vegetační období.

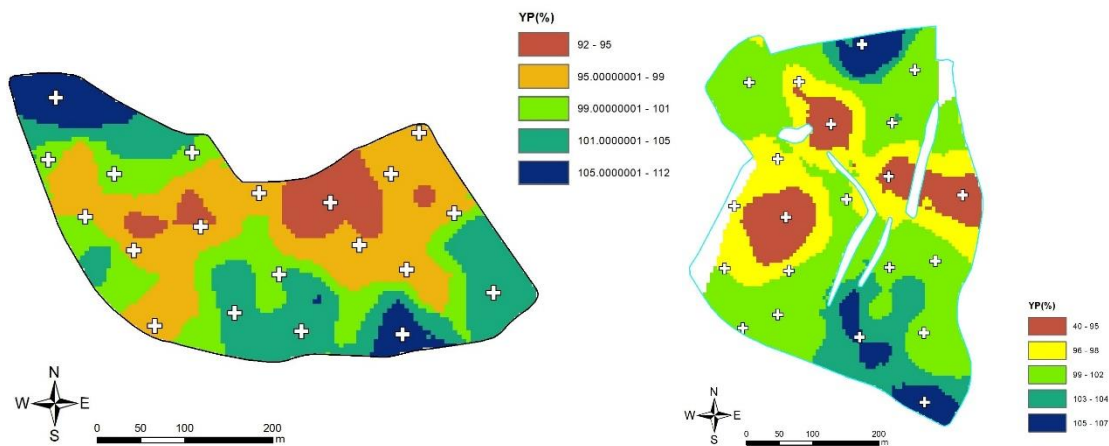
### 4.3. Princip tvorby podkladových map pro variabilní aplikaci dusíkatých hnojiv

Příprava podkladových map vychází z určení průměrné dávky hnojení dle pokrytí potřeby živiny na tvorbu očekávané úrovně výnosu se zohledněním předplodiny, předchozího hnojení statkovými a minerálními hnojivy a rozložení aplikačních dávek v průběhu vegetačního období. Průměrná dávka byla přepočtena dle procentuální hodnoty mapy relativního výnosového potenciálu. Tento způsob přípravy aplikačních map byl použit pro ověřování v roce 2017. V roce 2018 a 2020 byl na základě výsledků řešení projektu v uplynulých letech dlouhodobý trend hodnocení nevyrovnanosti pozemků z map RVP doplněn o korekci rozložení dávek na základě hodnocení aktuálního stavu porostů pomocí vegetačních indexů vypočtených z družicových snímků Sentinel-2. Pro zpracování aplikačních map byl využit software ESRI ArcGIS 10; pro výpočetní operace datových vrstev byly využity nástroje rastrové algebry, pro nahrání do aplikační techniky byly následně mapy převedeny do vektorové podoby (shp).

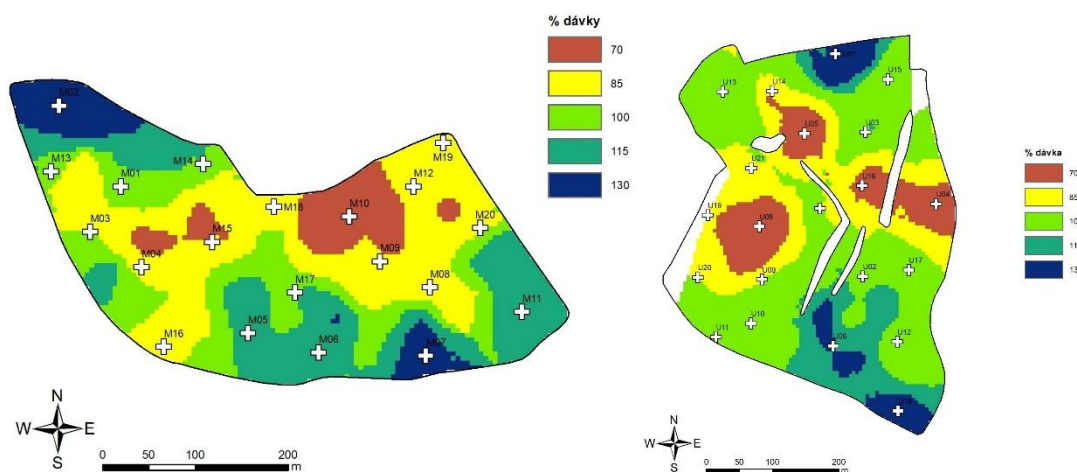
#### Příklad postupu zpracování pro rok 2020



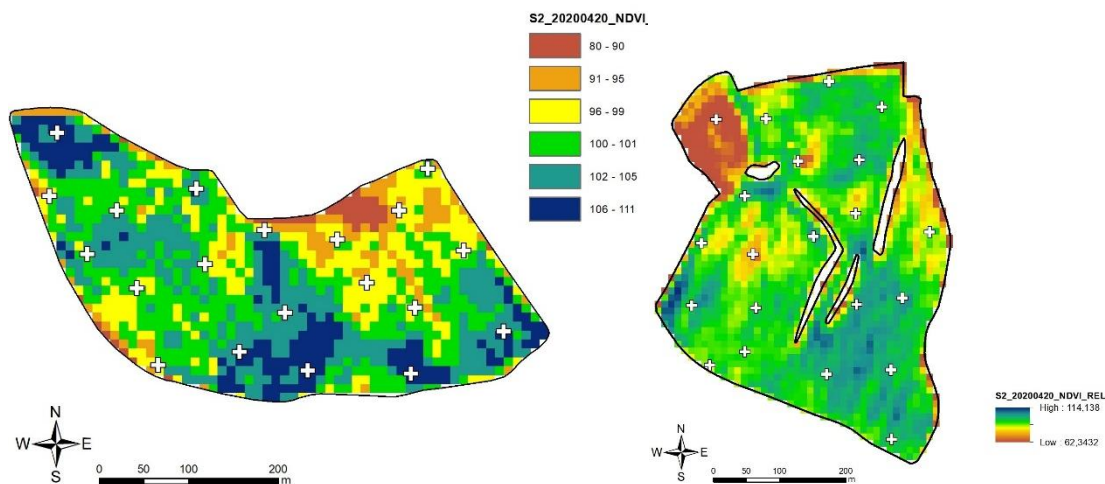
**Obr. 9** Výchozí podkladová mapa relativního výnosového potenciálu členěného po 1 % odchylky výnosu (vlevo pozemek PB5 „Makytí“, vpravo PB6 „U Mouček“). Body vyznačují místa pozemního průzkumu. Mapa reprezentuje dlouhodobé rozložení výnosových hladin odvozených od hodnocení kondice vegetace za posledních 8 let.



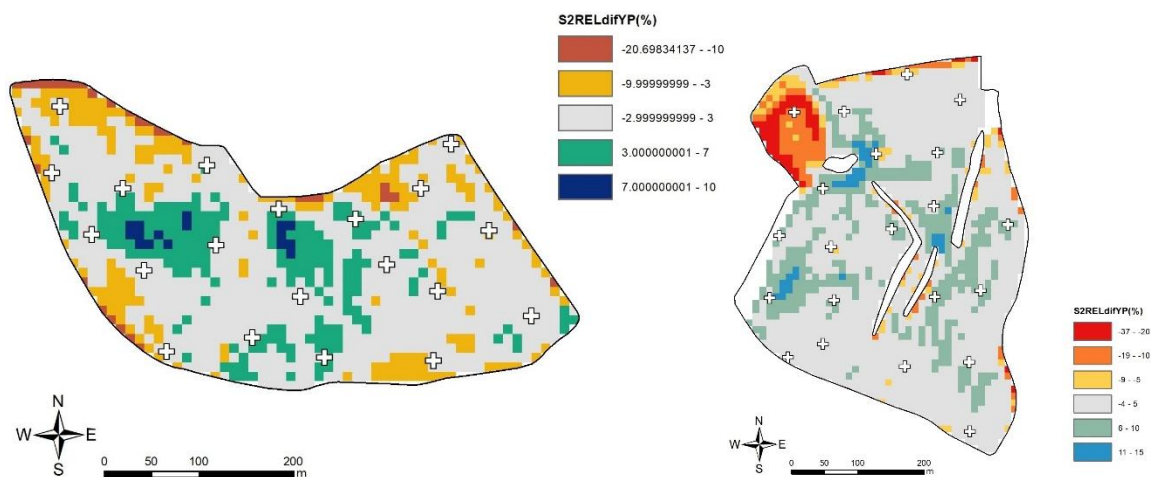
**Obr. 10** Mapa relativního výnosového potenciálu po klasifikaci do tříd výnosových hladin (vlevo pozemek PB5 „Makytí“, vpravo PB6 „U Mouček“).



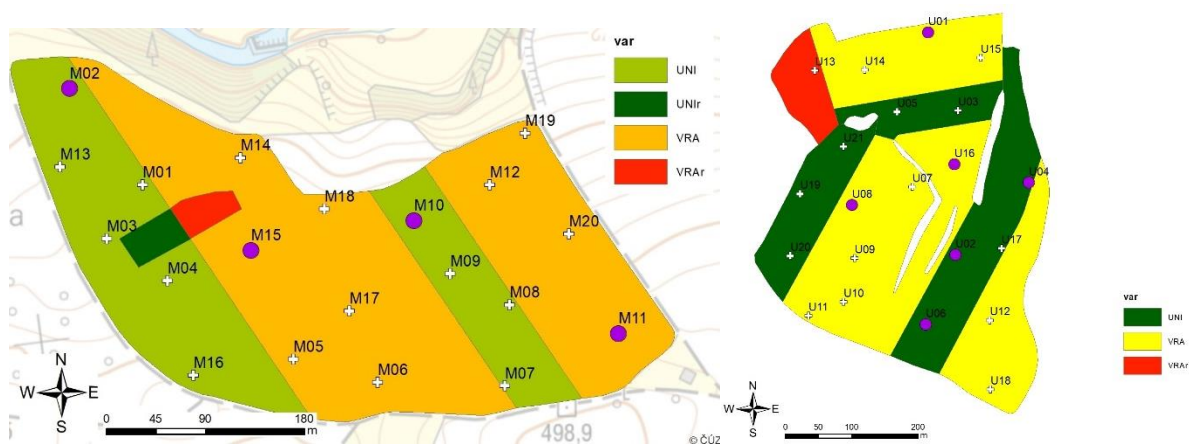
**Obr. 11** Mapa procentuálního rozložení dávky dusíkatého hnojení, vycházející z rozložení výnosového potenciálu a na základě konzultace rozpětí dávek dusíku s agronomeem (vlevo pozemek PB5 „Makytí“, vpravo PB6 „U Mouček“).



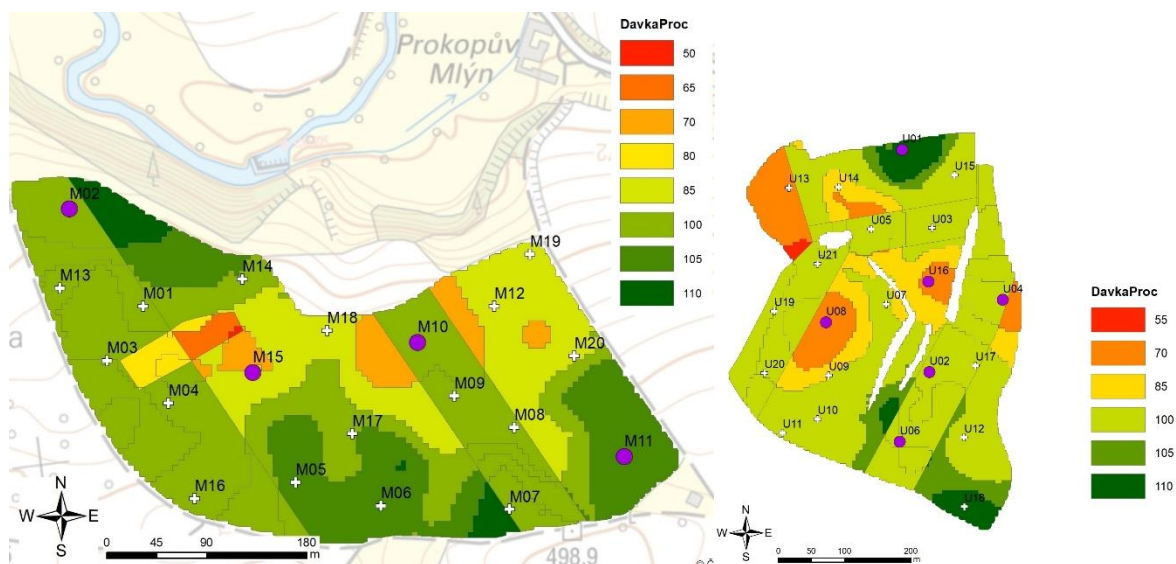
**Obr. 12** Hodnocení aktuálního stavu porostu před aplikací na základě procentuálního rozložení vegetačního indexu NDVI z multispektrálního snímku Sentinel-2 ze dne 20.4.2020. Mapa slouží pro korekci normativní dávky dané relativním výnosovým potenciálem (vlevo pozemek PB5 „Makytí“, vpravo PB6 „U Mouček“).



**Obr. 13** Znázornění rozdílu mezi relativním výnosovým potenciálem a aktuálním stavem porostu z NDVI. 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 horší kondici 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 (vlevo pozemek PB5 „Makytí“, vpravo PB6 „U Mouček“).



**Obr. 14** Na každém pozemku byl vytvořen design polního pokusu se střídáním uniformní/homogenní (UNI) aplikace s variabilní aplikací (VRA). 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 strategií dávkování (posilovací / kompenzační přístup). Vlevo pozemek PB5 „Makytí“, vpravo PB6 „U Mouček“.



**Obr. 15** Výsledná aplikační mapa s relativním rozložením dávky dusíkatého hnojiva vytvořená výše popsaným způsobem (vlevo pozemek PB5 „Makytí“, vpravo PB6 „U Mouček“). Výše průměrné dávky byla stanovena před vlastní aplikací na základě posouzení porostu agronomek a zhodnocení povětrnostních podmínek (za uplynulé období a předpověď na nejbližší dny). Mapa byla nahraná do aplikace iSoyl - viz popis vlastní aplikace hnojiv níže.

#### 4.4. Provedení variabilní aplikace dusíkatých hnojiv na pokusných pozemcích

Vlastní přihnojení porostů pšenice ozimé bylo provedeno pevným minerálním hnojivem LAD (27% N), způsob provedení aplikace se ale lišil dle jednotlivých kategorií přihnojení porostů pšenice ozimé. Regenerační hnojení bylo vždy provedeno formou uniformní aplikace jedním

nebo dvěma aplikačními zásahy, tedy běžným způsobem aplikace hnojiv v zemědělském podniku. Výše dávky dusíku byla korigována dle obsahu N<sub>min</sub> v půdě před aplikací. Variabilní dávkování bylo směřováno na produkční a kvalitativní hnojení, v obou případech bylo takto realizováno v roce 2017 a 2018, v roce 2020 pouze u produkčního hnojení z důvodu vynechání poslední aplikační dávky. Přehled jednotlivých aplikačních zásahů je uveden v **Tab. 3**.

**Tab. 3** Přehled provedených přihnojení dusíkatými hnojivy uniformní (UNI) nebo variabilní (VRA) aplikací

Lokalita	Kat. území	Pozemek	ZKOD	Výměra [ha]	Rozpětí RVP [%]	Aplikace N hnojiv (průměrná dávka kg.ha <sup>-1</sup> )
<b>PB1 (2017)</b>	Dehtáře	Za Vaněčkovi	1708/3	25.3	90-115	14.3.2017 150 kg LAD (UNI) 23.3.2017 150 kg LAD (UNI) <b>25.4.2017 200 kg LAD (VRA)</b> <b>19.5.2017 100 kg LAD (VRA)</b>
<b>PB2 (2017)</b>	Svépravice	Mokřiny	3406/1	41.4	70-120	8.3.2017 150 kg LAD (UNI) 15.3.2017 50 kg LAD (UNI) <b>25.4.2017 200 kg LAD (VRA)</b> <b>19.5.2017 150 kg LAD (VRA)</b>
<b>PB3 (2018)</b>	Kojčice	Vrcha	2905/2	26.5	85-110	4.3.2018 160 kg LAD (UNI) <b>25.4.2018 185 kg LAD (VRA)</b> <b>14.5.2018 130 kg LAD (VRA)</b>
<b>PB4 (2018)</b>	Krasíkovice	Kazy	5005/9	10.2	80-120	4.3.2018 160 kg LAD (UNI) <b>25.4.2018 185 kg LAD (VRA)</b> <b>14.5.2018 130 kg LAD (VRA)</b>
<b>PB5 (2020)</b>	Kojčice	Makytí	2702/4	12.1	80-110	10.3.2020 170 kg LAD (UNI) <b>22.4.2020 255 kg LAD (VRA)</b> 5.5.2020 150 kg LAD (UNI)
<b>PB6 (2020)</b>	Krasíkovice	U Mouček	5905/4	18.2	80-105	10.3.2020 170 kg LAD (UNI) <b>22.4.2020 255 kg LAD (VRA)</b> 5.5.2020 150 kg LAD (UNI)

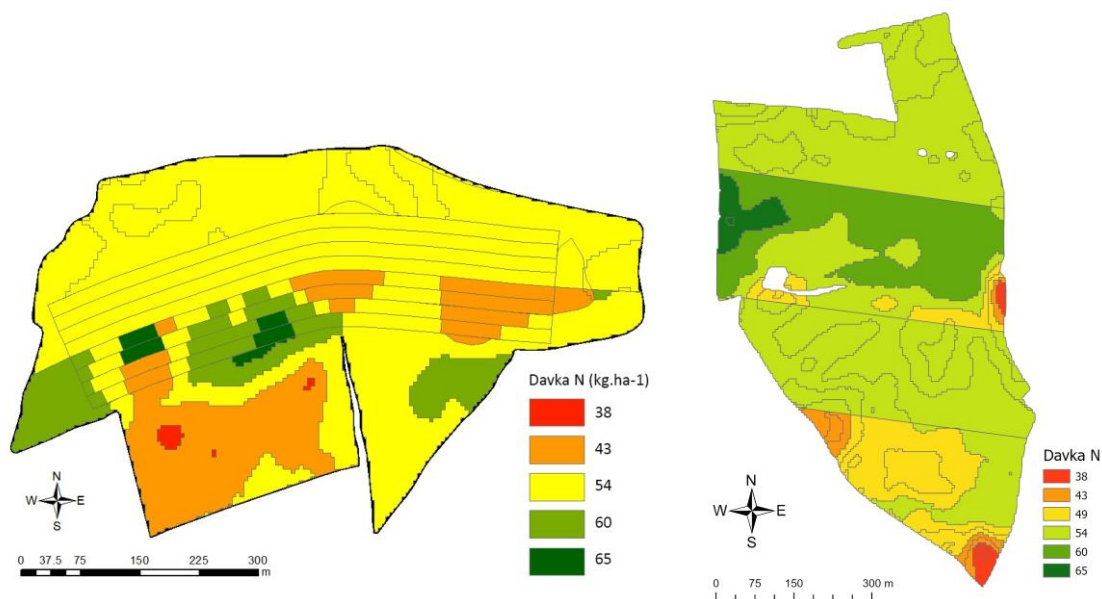
Pro aplikaci bylo použito nesené rozmetadlo Rauch Axis 30.1 s ovládacím terminálem Rauch Quantron schopným přijímat kontinuálně přes sériové rozhraní RS232 příkazy o výši aplikační dávky. V roce 2017 a 2018 byla aplikace řízena navigačním displejem Raven Viper 4 s RTK příjmem pozičního signálu, od roku 2019 byla pro aplikaci určen starší traktor bez navigačního displeje. Pro načítání map bylo tak otestováno řešení iSoyl pro iPad, které pak bylo plně nasazeno v roce 2020. Jedná se o aplikaci schopnou importovat aplikační mapu v shp ze služby Dropbox a přes kabelový převodník RS232 posílat pokyn do ovládacího terminálu rozmetadla. Jedná se o velmi jednoduché a cenově dostupné řešení pro zemědělské podniky nedisponující dostatečnou úrovní vybavení mechanizace pro precizní zemědělství. Navádění celé soupravy probíhalo dle založených kolejových řádků, polohovou přesnost variabilního dávkování lze odhadnout na cca 3 m, což s ohledem na záběr rozmetadla (18 m) a prostorové rozlišení podkladových map (10 m / pixel) pro tyto účely plně dostačuje.



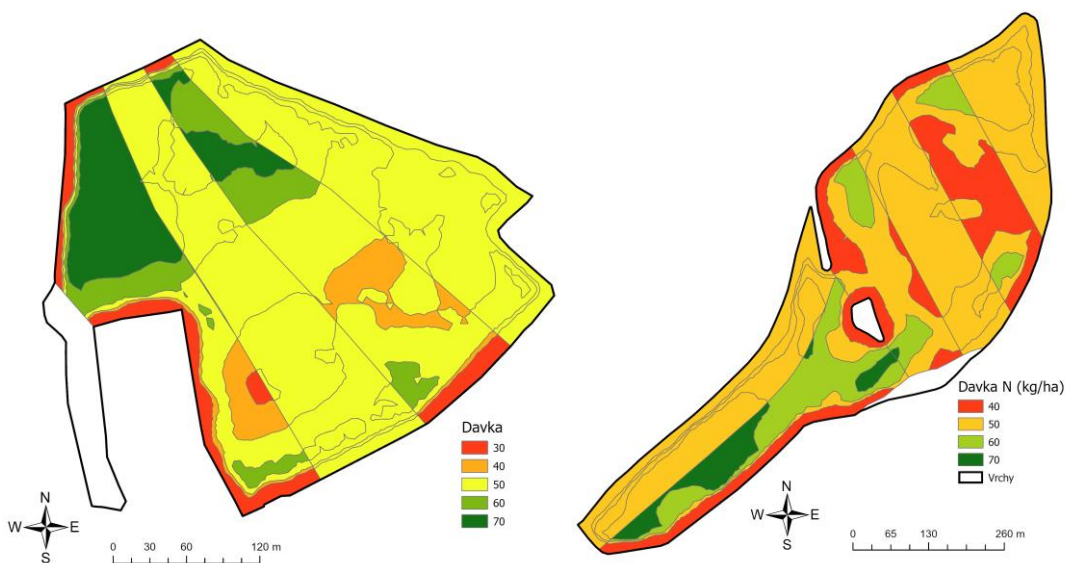
**Obr. 16** Fotodokumentace variabilní aplikace řízené pomocí iSoyl na PB5 „Makytí“ v roce 2020 – tablet s nahanou aplikační mapou posílá informaci o dávce do palubního počítače rozmetadla Rauch.

### Přehled podkladových map pro variabilní aplikaci

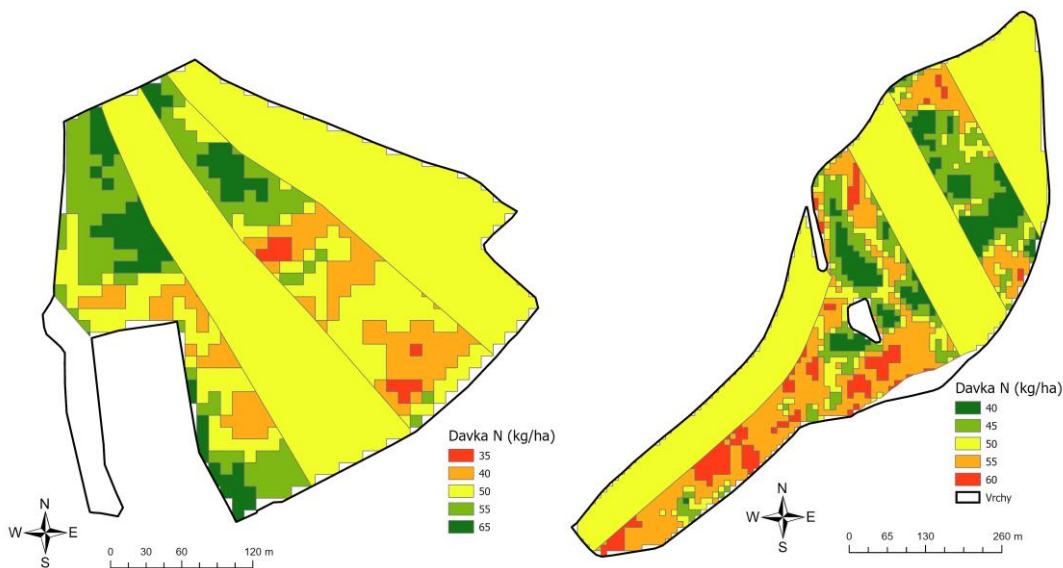
Na níže uvedených obrázcích (**Obr. 17, Obr. 19**) jsou znázorněny aplikační mapy, podle kterých byla provedena variabilní aplikace v roce 2017 a 2018. Mapy pro rok 2020 zobrazuje **Obr. 15**.



**Obr. 17** Podkladová mapa pro variabilní aplikaci produkčního hnojení v roce 2017 (PB1 vlevo, PB2 vpravo). Mapa pro kvalitativní přihnojení je totožná, pouze se sníženými dávkami dusíku (50% u PB1, 75% u PB 2).



**Obr. 18** Podkladová mapa pro ověřování variabilní aplikace produkčního hnojení v roce 2018. Levá část představuje pozemek PB3, pravá PB4.



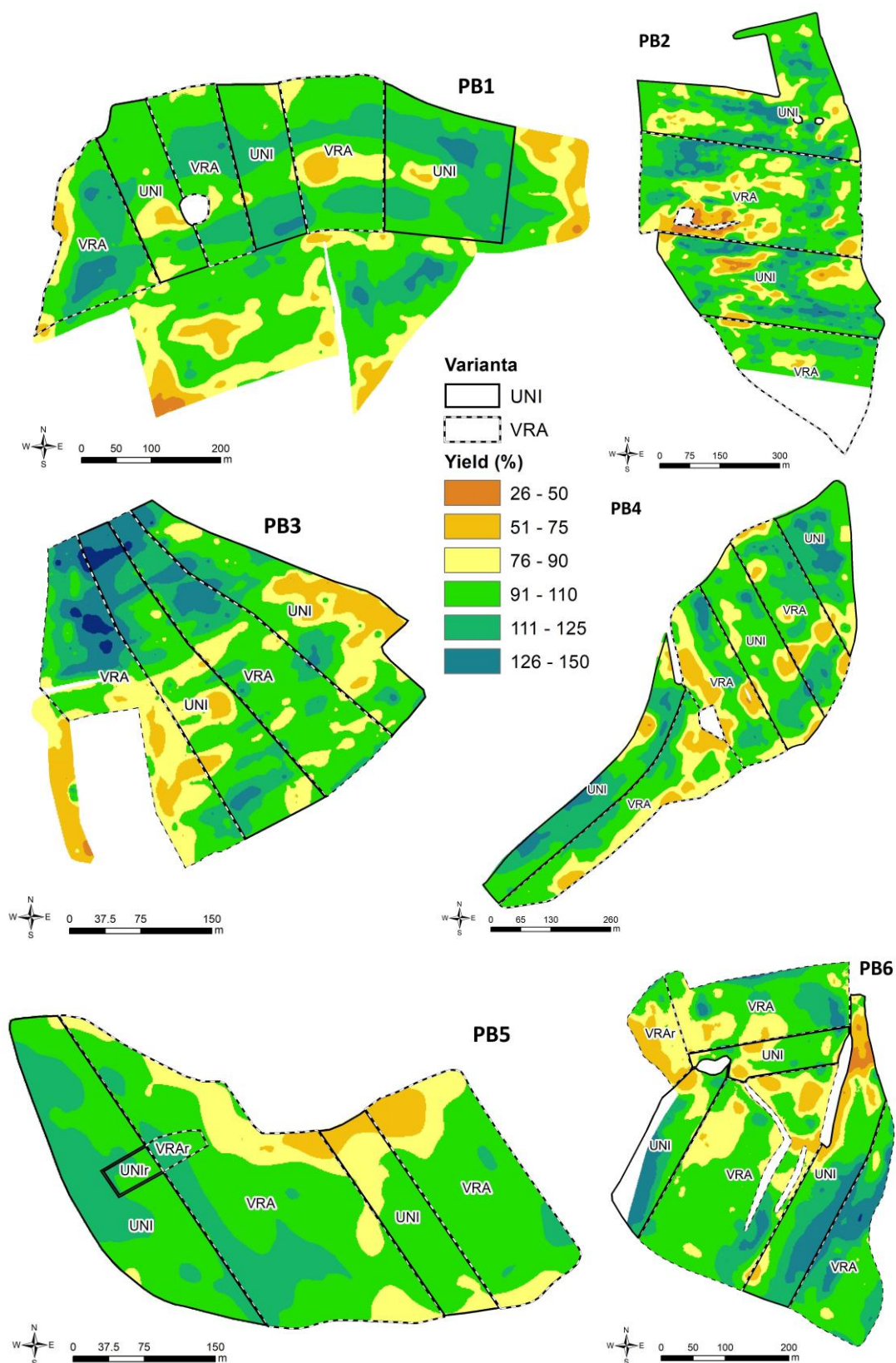
**Obr. 19** Podkladová mapa pro ověřování variabilní aplikace kvalitativního hnojení v roce 2018. Levá část představuje pozemek PB3, pravá PB4.

#### 4.5. Vyhodnocení výnosových dat ve vztahu k variantám aplikace

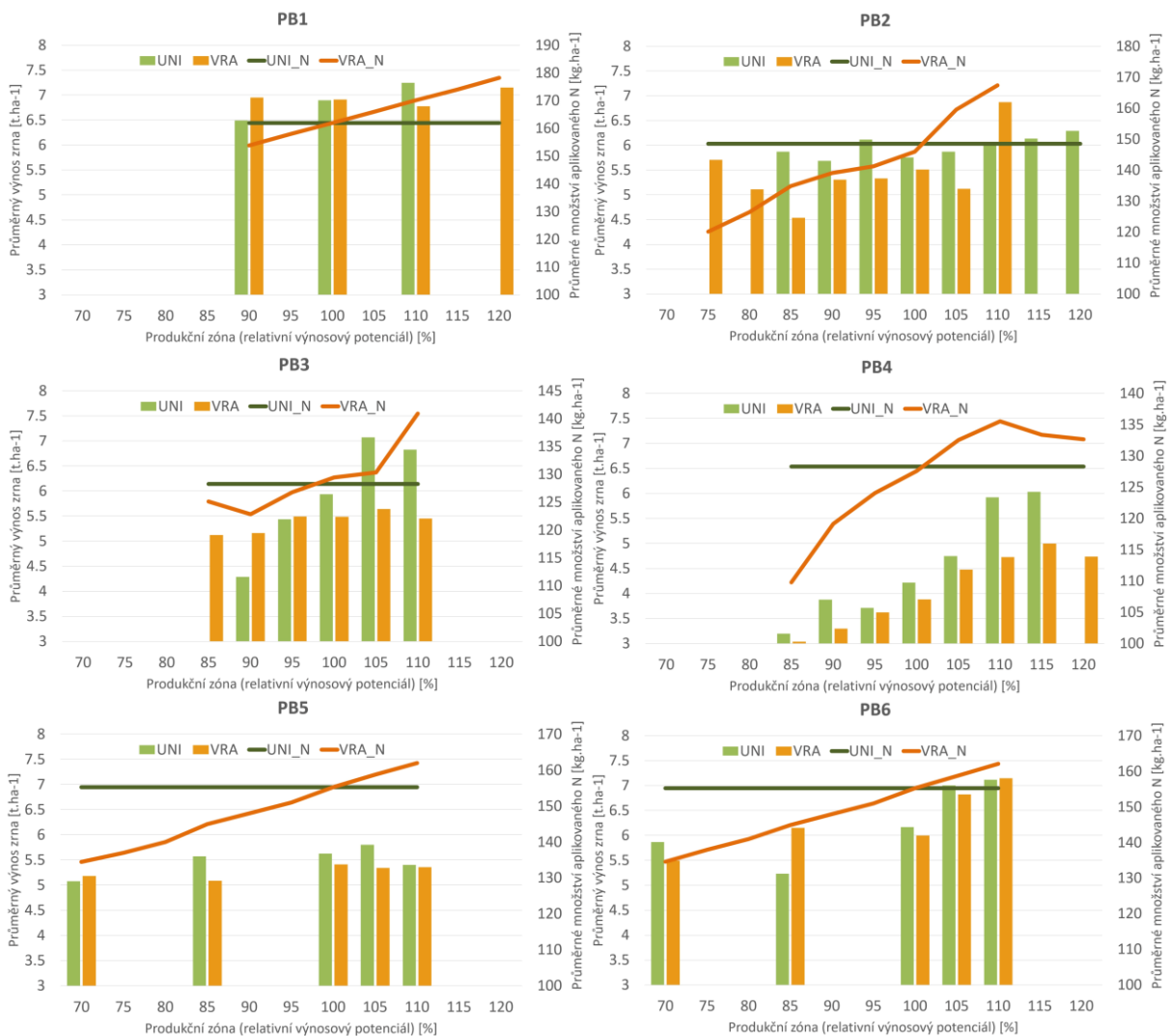
Vývoj sklízecí techniky v současnosti nabízí možnost celoplošného monitorování výnosu sklizené plodiny. Před použitím výnosových map je ale nutné záznamy ze sklízecí mlátičky upravit, neboť jsou zkresleny celou řadou vlivů (Blackmore a Marshall, 1996; Noack, 2007) - provést odstranění chybových, nespolehlivých a odlehlých hodnot daných chybným záznamem polohy, záběru, objížděním překážek a otáčením, apod. Podrobný popis zpracování výnosových záznamů uvádí celá řada zahraničních studií (Leroux et al., 2018; Lyle et al., 2014; Ping a Dobermann, 2005; Sudduth a Drummond, 2007; Vega et al., 2019).

Sklizeň porostů obilnin na pokusných lokalitách byla provedena sklízecí mlátičkou Claas vybavenou výnosoměrným čidlem pro průběžný záznam hodnot výnosu do map. Výnosové mapy byly následně zpracovány v GIS postupy filtrace odlehlých a nespolehlivých hodnot (Mezera et al., 2018). Výsledné mapy výnosu zrna pro jednotlivé pozemky v relativním vyjádření jsou znázorněny na **Obr. 20**.





**Obr. 20** Mapy relativního výnosu zrna vytvořené ze záznamů při sklizni obilnin na pokusných pozemcích s vyznačením ploch uniformní (UNI) a variabilní (VRA) aplikace dusíkatých hnojiv



**Obr. 21** Grafy průměrného výnosu zrna a průměrného množství aplikovaného dusíku v jednotlivých zónách relativního výnosového potenciálu pro obě sledované varianty (UNI, VRA)

Výsledky porovnání průměrných výnosů zrna a množství aplikovaného N pro obě sledované varianty aplikace v jednotlivých zónách relativního výnosového potenciálu ukazují na vyšší význam vlivu produkční schopnosti stanovištních podmínek na dosažené výnosy než úroveň výživy dusíkem (**Obr. 21**). Tento trend je patrný na všech zkoumaných lokalitách. Zvýšení dávky dusíku v zónách s nadprůměrným výnosovým potenciálem nevedlo k očekávané podpoře vyššího odběru živin pro dosažení vyššího výnosu zrna.

Podobně významně se projevil vliv výnosového potenciálu v podprůměrných zónách – zde ale v podobě dosažení nižšího průměrného výnosu zrna. Tento pokles výnosu byl patrný i přes udržení stejné úrovně výživy dusíkem při uniformní aplikaci. Strategie dávkování dusíkatých hnojiv při variabilní aplikaci představovala snížení dávek u ploch s podprůměrným očekávaným výnosem a tím pádem minimalizaci rizika nevyužití aplikovaného dusíku a jeho vyplavení do podzemních vod.

Z tohoto pohledu je jednoznačným doporučením využít při plánování přihnojení porostů pšenice ozimé dusíkatými hnojivy mapy relativního výnosového potenciálu a snížení úrovně

aplikace dusíkatých hnojiv v zónách s nižším očekávaným výnosem zrna formou variabilního dávkování. Současně lze v obdobných produkčních podmínkách očekávat efekt „zastropování“ dávek dusíku na místech s vyšší hodnotou relativního výnosového potenciálu.

Význam variabilní aplikace minerálních hnojiv pro optimalizaci využití dodaných živin zmiňuje celá řada odborných studií. Elbl et al. (2018) poukazují na dosažení o 6 % vyšší efektivity využití dusíku při variabilním dávkování. Jin et al. (2019) ve své studii hodnotili vliv variabilní aplikace dusíkatých hnojiv pomocí simulačních modelů pro cca 2600 pozemků v USA. Z výsledků vyplývá, že (1) variabilní aplikace dusíkatých hnojiv je stěžejí zisková pokud se berou v potaz pouze agronomické přínosy; (2) vyšší ziskovost lze očekávat na pozemcích s vyšší heterogenitou; (3) benefity variabilní aplikace jsou významné, pokud se zohledňují také environmentální přínosy v podobě snížení vyplavování N a emisí N<sub>2</sub>O; a (4) potenciál ovlivnění časové variability (např. mezi-ročníková změna optimálního dávkování N) je více jak trojnásobný než vlastní plošná variabilita sledovaného znaku. Jednoznačnější agronomické přínosy technologií variabilní aplikace lze očekávat při začlenění i dalších postupů, jako jsou variabilní setí či variabilní aplikace přípravků na ochranu rostlin.

## IV. EKONOMICKÁ ANALÝZA

V rámci ověřené technologie byl potvrzen princip korekce aplikované dávky dusíkatých hnojiv na základě podkladové mapy vycházející z relativního výnosového potenciálu a aktuálního hodnocení stavu porostů z družicového monitoringu. To znamená, že potřeba použití intenzity zásahu je stanovena na základě očekávaného výnosu na dané části pozemku (analyzováno na základě historických dat) a diagnostiky stavu porostů z multispektrálních družicových dat. Strategie určení dávky hnojení vychází z principu redukce dávky dusíkatých hnojiv v místech s historicky podprůměrnými výnosy zrna, čímž dochází k efektivnějšímu využití živiny a současně ke snížení rizika kontaminace podzemních vod dusičnany při přehnojení (v případě hnojení průměrnou dávkou na pozemek). V rámci sledovaného území ukázaly výsledky řešení projektu na neefektivnost navyšování dávek dusíku v místech s nadprůměrnými výnosy, pro tyto plochy lze doporučit hnojení průměrnou dávkou.

Předpokládané přínosy je obtížné kvantifikovat, neboť se jedná o kombinaci položek environmentálních, zemědělských i celospolečenských. Ekonomické přínosy vycházejí z redukce celkového množství aplikovaných hnojiv, výše redukce intenzity hnojení je odvislá od rozsahu (výměry) pozemků a jejich plošné variability. Další přínosy jsou v souladu s všeobecným zájmem celé společnosti v oblasti ochrany životního prostředí.

Ekonomický přínos ověřené technologie variabilní aplikace dusíkatého přihnojení porostů pšenice ozimé na sledovaných pozemcích ZD Kojčice činil 100 – 120 Kč.ha<sup>-1</sup> pro jeden aplikační zásah ve srovnání s uniformní aplikací (při dávce aplikačního zásahu ve výši cca 70 kg N na ha). Kromě plošné variability pozemků bude zajisté výše přínosů významně ovlivněna produkčními podmínkami daného stanoviště (zejména pedo-klimatické a povětrnostní podmínky), intenzitou hospodaření a specifiky pěstební technologie plodiny. Předkládaná technologie má výrazný potenciál přispět ke snížení negativních dopadů zemědělské činnosti na životní prostředí.

## V. DOPORUČENÍ A ZÁVĚR

Výsledky ověřené technologie variabilní aplikace dusíkatých hnojiv ukázaly na pozitivní efekt snížení aplikačních dávek minerálního N na plochách s podprůměrným výnosovým potenciálem. Snížením aplikační dávky N při variabilním dávkování na těchto plochách omezuje riziko vyplavování N, zejména z propustných částí půdy. Na místech s vyšší hodnotou výnosového potenciálu lze doporučit dávky odpovídající průměrné hodnotě očekávaného výnosu zrna za daný pozemek. Navyšování dávek nepřineslo efekt zvýšení efektivity používání minerálních hnojiv.

Z uvedeného vyplývá, že celková spotřeba aplikovaného dusíku v rámci variabilního hnojení pro pšenici ozimou by měla být nižší oproti homogenní aplikaci, a to z důvodu navrženého snížení dávek N na méně úrodných a propustnějších částech pozemku. Snížené dávky N na propustnějších částech (tj. s vyšší infiltrací) by zároveň snížily i riziko vyplavení dusičnanů do spodních částí půdního profilu (malá nebo žádná dostupnost pro porost) a do povrchových a podzemních vod ve zranitelných oblastech dusičnany. Vliv nevyrovnanosti pozemků na výnos zrna pšenice v podobě prostorové variability výnosového potenciálu byl výraznější v období vodního deficitu, při dostatečné půdní vlhkosti se variabilita půdních podmínek na výši výnosu neprojevila.

## VI. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- Blackmore, S. The interpretation of trends from multiple yield maps. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2000, vol. 26, no. 1, pp. 37-51. ISSN 0168-1699
- Blackmore, S., Marshall, C. Yield mapping; errors and algorithms, in 3rd International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, USA, 1996.
- Diker, K., Heermann, D. F., Brodahl, M. K. Frequency analysis of yield for delineating yield response zones. *Precision Agriculture*. 2004, vol. 5, no. 5, pp. 435-444. ISSN 13852256 (ISSN)
- Dorigo, W. A., Zurita-Milla, R., de Wit, A. J. W., Brazile, J., Singh, R., Schaepman, M. E. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2007, vol. 9, no. 2, pp. 165-193. ISSN 15698432
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., Bargellini, P. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*. 2012, vol. 120, pp. 25-36. 5/15/. ISSN 0034-4257
- Elbl, J., Lukas, V., Kintl, A., Kynický, J., Brtnický, M. Variable – rate nitrogen application in wheat production on the basis of satellite images analysis to increase yield and reduce environmental risks. In. *18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2018*, International Multidisciplinary Scientific Geoconference, 2018, p. 725-732. ISBN 13142704 (ISSN)
- Hatfield, J. L., Gitelson, A. A., Schepers, J. S., Walthall, C. L. Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. *Agron J*. 2008, vol. 100, no. Supplement\_3, pp. S-117-131. May 7, 2008
- Irons, J. R., Dwyer, J. L., Barsi, J. A. The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. *Remote Sensing of Environment*. 2012, vol. 122, no. 0, pp. 11-21. 7//. ISSN 0034-4257
- Jin, Z. N., Archontoulis, S. V., Lobell, D. B. How much will precision nitrogen management pay off? An evaluation based on simulating thousands of corn fields over the US Corn-Belt. *Field Crops Research*. 2019, vol. 240, pp. 12-22. Jul. ISSN 0378-4290
- Kleinjan, J., Clay, D. E., Carlson, C. G., Clay, S. A. Productivity zones from multiple years of yield monitor data, In: Pierce, F. J. et al. (eds.) GIS applications in agriculture, pp. 65-80, Boca Raton: CRC Press, 2007. ISBN 9780849375262
- Klír, J., Kunzová, E., Čermák, P. *Rámcová metodika výživy rostlin a hnojení*, 2. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., 2008. ISBN 978-80-87011-61-4
- Kumhálová, J., Zemek, F., Novák, P., Brovkina, O., Mayerová, M. Use of landsat images for yield evaluation within a small plot. *Plant, Soil and Environment*. 2014, vol. 60, no. 11, pp. 501-506. ISSN 12141178 (ISSN)
- Lawes, R. A., Robertson, M. J. Whole farm implications on the application of variable rate technology to every cropped field. *Field Crops Research*. 2011, vol. 124, no. 2, pp. 142-148. 2011/11/14/. ISSN 0378-4290
- Leroux, C., Jones, H., Clenet, A., Dreux, B., Becu, M., Tisseyre, B. A general method to filter out defective spatial observations from yield mapping datasets. *Precision Agriculture*. 2018, vol. 19, no. 5, pp. 789-808. October 01. ISSN 1573-1618
- Lukas, V., Neudert, L., Duffková, R., Fučík, P., Mezera, J. *Mapa výnosového potenciálu pro Zemědělské družstvo Kojčice* Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2018, 40 s. ISBN 978-80-7509-631-9
- Lukas, V., Ryant, P., Neudert, L., Dryšlová, T., Gnip, P., Smutný, V. *Stanovení a optimalizace diferencovaných dávek dusíkatých hnojiv v precizním zemědělství*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2012, 48 s. ISBN 978-80-7375-686-4
- Lyle, G., Bryan, B. A., Ostendorf, B. Post-processing methods to eliminate erroneous grain yield measurements: review and directions for future development. *Precision Agriculture*. 2014, vol. 15, no. 4, pp. 377-402. 2014/08/01. ISSN 1385-2256

- Mezera, J., Lukas, V., Elbl, J., Smutný, V. Spatial analysis of crop yields maps in precision agriculture. In Cerkal, R. et al. *MendelNet 2018: Proceedings of 25th International PhD Students Conference*, Brno: Mendel University in Brno, 2018, p. 60-65. ISBN 978-80-7509-597-8
- Neudert, L., Lukas, V. *PRECIZNÍ ZEMĚDĚLSTVÍ - Technologie a metody v rostlinné produkci*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015, 240 s. ISBN 978-80-7509-311-0
- Noack, P. O. *Ertragskartierung im Getreidebau*. Darmstadt: KTBL, 2007, 40 s. ISBN 3939371424
- Ping, J. L., Dobermann, A. Processing of yield map data. *Precision Agriculture*. 2005, vol. 6, no. 2, pp. 193-212. ISSN 13852256
- Quarmby, N. A., Milnes, M., Hindle, T. L., Silleos, N. Use of multi-temporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction. *International Journal of Remote Sensing*. 1993, vol. 14, no. 2, pp. 199-210. ISSN 01431161 (ISSN)
- Rehák, Š., Bárek, V., Jurík, L., Čistý, M., Igaz, D., Adam, Š. *Zavlažovanie pol'ných plodín, zeleniny a ovocných sádov*. VEDA, vydavateľ'stvo Slovenskej akadémie vied, 2015. ISBN 978-80-224-1429-6.
- Robertson, M. J., Lyle, G., Bowden, J. W. Within-field variability of wheat yield and economic implications for spatially variable nutrient management. *Field Crops Research*. 2008, vol. 105, no. 3, pp. 211-220. 2008/02/01/. ISSN 0378-4290
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., C.E. W., Allen, R. G., Anderson, M. C., Helder, D., Irons, J. R., Johnson, D. M., Kennedy, R., Scambos, T. A., Schaaf, C. B., Schott, J. R., Sheng, Y., Vermote, E. F., Belward, A. S., Bindschadler, R., Cohen, W. B., Gao, F., Hipple, J. D., Hostert, P., Huntington, J., Justice, C. O., Kilic, A., Kovalskyy, V., Lee, Z. P., Lyburner, L., Masek, J. G., McCorkel, J., Shuai, Y., Trezza, R., Vogelmann, J., Wynne, R. H., Zhu, Z. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*. 2014, vol. 145, pp. 154-172. ISSN 00344257 (ISSN)
- Sudduth, K. A., Drummond, S. T. Yield Editor: Software for Removing Errors from Crop Yield Maps. *Agron J*. 2007, vol. 99, no. 6, pp. 1471-1482. October 15, 2007
- Širůček, P. *Zpracování a interpretace výnosových map jako podklad pro agronomické rozhodování*. Diplomová práce, Mendelova univerzita v Brně, 2014. 99.
- Thenkabail, P. S. Biophysical and yield information for precision farming from near-real-time and historical Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*. 2003, vol. 24, no. 14, pp. 2879-2904. ISSN 01431161 (ISSN)
- Vega, A., Córdoba, M., Castro-Franco, M., Balzarini, M. Protocol for automating error removal from yield maps. *Precision Agriculture*. 2019. ISSN 1385-2256
- Vuolo, F., Zoltak, M., Pipitone, C., Zappa, L., Wenng, H., Immitzer, M., Weiss, M., Baret, F., Atzberger, C. Data Service Platform for Sentinel-2 Surface Reflectance and Value-Added Products: System Use and Examples. *Remote Sensing*. 2016, vol. 8, no. 11, pp. 16. Nov. ISSN 2072-4292
- Wall, L., Larocque, D., Léger, P. M. The early explanatory power of NDVI in crop yield modelling. *International Journal of Remote Sensing*. 2008, vol. 29, no. 8, pp. 2211-2225. ISSN 01431161 (ISSN)
- Wittry, D. J., Mallarino, A. P. Comparison of Uniform- and Variable-Rate Phosphorus Fertilization for Corn-Soybean Rotations. *Agronomy Journal*. 2004, vol. 96, no. 1, pp. 26-33.
- Zhu, Z., Wang, S., Woodcock, C. E. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4-7, 8, and Sentinel 2 images. *Remote Sensing of Environment*. 2015, vol. 159, pp. 269-277. 3/15/. ISSN 0034-4257

## VII. SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY VZNIKU OVĚŘENÉ TECHNOLOGIE

- Duffková, R., Lukas, V., Fučík, P., Marval, Š. Může precizní zemědělství zvýšit účinnost dusíkatých hnojiv? *Úroda*. 2019, vol. 67, no. 12, pp. 18-22. ISSN 0139-6013
- Haberle, J., Duffková, R., Raimanová, I., Fučík, P., Svoboda, P., Lukas, V., Kurešová, G. The 13C Discrimination of Crops Identifies Soil Spatial Variability Related to Water Shortage Vulnerability. *Agronomy*. 2020, vol. 10, no. 11, pp. 1691. ISSN 2073-4395
- Lukas, V., Elbl, J., Širůček, P., Neudert, L., Mezera, J., Duffková, R. Význam zpracování aplikačních map pro lokálně cílenou agrotechniku zemědělských plodin. *Agromanuál*. 2020, vol. 15, no. 9-10, pp. 78-81. ISSN 1801-7673
- Lukas, V., Neudert, L., Širůček, P., Elbl, J., Duffková, R. Estimation of winter wheat parameters for site-specific crop management by unmanned aerial multispectral imaging. In. *19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2019*, International Multidisciplinary Scientific Geoconference, 2019, p. 533-540. ISBN 13142704 (ISSN)
- Mezera, J., Lukas, V., Elbl, J., Kintl, A., Smutný, V. Vyhodnocení variabilního přihnojování porostů pšenice ozimé systémem Isaria. *Úroda*. 2019, vol. 67, no. vědecká příloha, pp. 351-358. ISSN 0139-6013
- Lukas, V., Neudert, L., Duffková, R., Fučík, P., Mezera, J. *Mapa výnosového potenciálu pro Zemědělské družstvo Kojčice* Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2018, 40 s. ISBN 978-80-7509-631-9
- Mezera, J., Lukas, V., Elbl, J., Smutný, V. Spatial analysis of crop yields maps in precision agriculture. In Cerkal, R. *et al. MendelNet 2018: Proceedings of 25th International PhD Students Conference*, Brno: Mendel University in Brno, 2018, p. 60-65. ISBN 978-80-7509-597-8



## VIII. PROTOKOL O OVĚŘENÍ TECHNOLOGIE

### Protokol o ověření technologie

**Název Ověřené technologie:**

Ověřená technologie pro variabilní přihnojení dusíkem pomocí nástrojů GIS a vyhodnocení efektivity využití živin v rozdílných vláhových podmínkách

**Autoři Ověřené technologie:**

Ing. Vojtěch Lukas, Ph.D.  
Ing. Lubomír Neudert, Ph.D.  
Ing. Renata Duffková, Ph.D.  
Ing. Jan Haberle, CSc.  
doc. Ing. Jakub Brom, Ph.D.  
Ing. Igor Horniaček  
Milan Vaněček

**Předmět ověřování:**

Praktické využívání nových postupů aplikace diferencovaných dávek dusíkatého hnojení . . .

**Ověřující pracoviště:**

Ústav agrosystémů a bioklimatologie AF, Mendelova univerzita v Brně – *spoluřešitel projektu*  
Zemědělské družstvo Kojčice – *zemědělský podnik, uživatel technologie*

**Termín ověření:**

Únor 2017 (*výběr ověřovací lokality*) – Listopad 2020 (*vyhodnocení výsledků a zpracování technické dokumentace*)

**Technická dokumentace:**

Viz. Příloha - Technická dokumentace výsledku - (*popis technologie včetně protokolu o způsobu a vlastním testování ověřené technologie*)

**Závěrečné konstatování:**

Technologie byla ověřena formou poloprovozního polního pokusu na pozemcích ZD Kojčice v letech 2017 až 2020. Ověřování potvrdilo princip korekce aplikační dávky přihnojování dusíkatými hnojivy v průběhu vegetace dle podkladové mapy vytvořené z vegetačních indexů vypočtených z multispektrálních družicových snímků. Základem stanovení dávky hnojení je odvození normativní dávky dusíku dle očekávaného výnosu na základě rozložení relativního výnosového potenciálu, který

je vypočten z víceleté série (8 let) družicových dat Landsat a Sentinel-2. Normativní dávka je dále korigována dle průběžné diagnostiky výživného stavu porostu z dostupných družicových snímků Sentinel-2. Výsledkem postupů zpracování prostorových dat v GIS je aplikační mapa, která slouží jako podklad pro provedení variabilní aplikace. Vlastní aplikace byla provedena zemědělskou mechanizací ZD Kojčice (nesené rozmetadlo minerálních hnojiv) s přípravou pro automatizované řízení dávkování.

Přínos postupů, uvedených v technologii je obtížné kvantifikovat, neboť se jedná o kombinaci položek environmentálních, zemědělských i celospolečenských. Ekonomické přínosy vycházejí z dosažených stabilních výnosů při snížení celkové dávky hnojení dané optimální distribucí dávek s ohledem na produktivitu stanoviště. Další přínosy jsou v souladu s všeobecným zájmem celé společnosti v oblasti ochrany životního prostředí. Předkládaná technologie má výrazný potenciál přispět ke snížení negativních dopadů zemědělské činnosti na životní prostředí, zejména v oblasti ochrany vod před znečištěním dusičnany. Konkrétní výše přínosů je odvislá od prostorové variability pozemků, členitosti terénu a intenzity hospodaření.

Technologie „Variabilní přihnojení dusíkem pomocí nástrojů GIS a vyhodnocení efektivity využití živin v rozdílných vláhových podmínkách“ byla navržena a ověřena v rámci řešení výzkumného projektu TACR č. TH02030133 s názvem „Zemědělský systém hospodaření integrující efektivní využití živin plodinami a ochranu vod před plošnými zdroji znečištění“.

<p>Za autorský tým MENDELU Ing. Vojtěch Lukas, Ph.D. Ústav agrosystémů a bioklimatologie AF Mendelova univerzita v Brně</p> <p>V Brně dne: 30. 11. 2020</p>	 (podpis)
---	--

<p>Za uživatele technologie Ing. Pavel Svárovský Miloslav Vaněček Zemědělské družstvo Kojčice</p> <p>V Kojčicích dne: 30. 11. 2020</p>	 (podpis)
--	--

**Název: Variabilní přihnojení dusíkem pomocí nástrojů GIS a vyhodnocení efektivity využití živin v rozdílných vláhových podmínkách**

Autoři: Ing. Vojtěch Lukas, Ph.D.  
Ing. Lubomír Neudert, Ph.D.  
Ing. Renata Duffková, Ph.D.  
Ing. Jan Haberle, CSc.  
doc. Ing. Jakub Brom, Ph.D.  
Ing. Igor Horniaček  
Milan Vaněček

Vydala: Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 BRNO

Vydání: první, 2020

Počet stran:

Vydáno bez jazykové úpravy.

Publikace je poskytována bezplatně.

Kontakt na autory: vojtech.lukas@mendelu.cz

