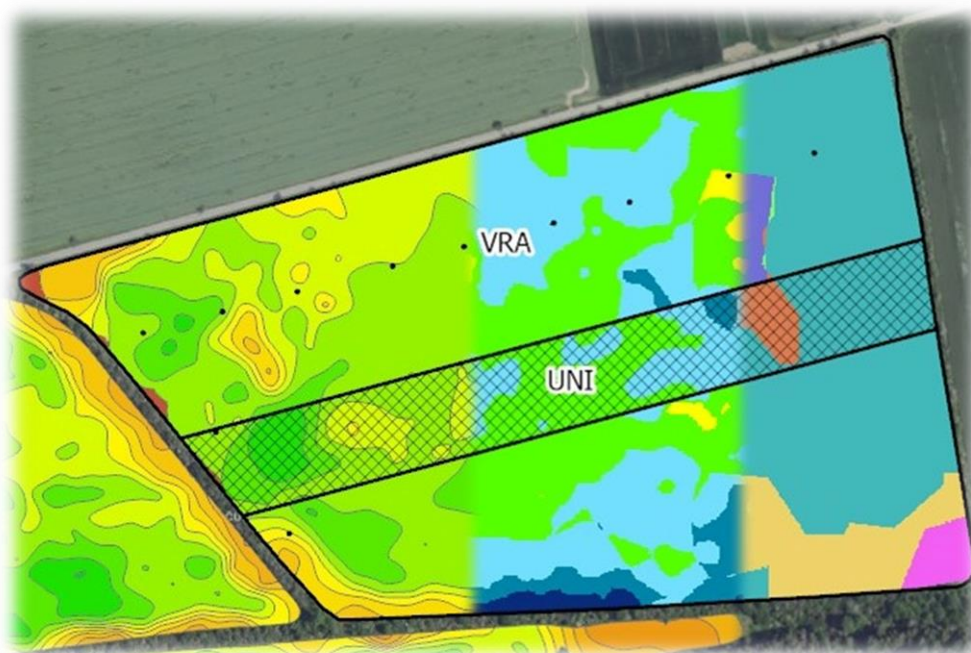


Ověřená technologie (Z_{tech})



Příprava aplikačních map pro variabilní aplikaci hnojiv v GIS na základě hodnocení nevyrovnanosti porostů a agrochemických vlastností půdy

Lukas V., Duffková R., Krček V., Neudert L., Mezera J., Elbl J., Širůček P.

Výstup z projektu TAČR SS01020309

„Precizní zemědělství na pozemcích s regulovaným drenážním odtokem jako nástroj pro ochranu vod a zvýšení efektivity rostlinné výroby“

Technická dokumentace výsledku

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

● Mendelova
● univerzita
● v Brně
●



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

AGRA
Řísuty s.r.o.

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

**Příprava aplikačních map pro variabilní
aplikaci hnojiv v GIS na základě
hodnocení nevyrovnanosti porostů a
agrochemických vlastností půdy**

Z_{tech} – Ověřená technologie

Vojtěch Lukas, Renata Duffková, Vítězslav Krček,
Lubomír Neudert, Jiří Mezera, Jakub Elbl, Petr Širůček

2022

Příprava aplikačních map pro variabilní aplikaci hnojiv v GIS na základě hodnocení nevyrovnanosti porostů a agrochemických vlastností půdy

Cílem ověřené technologie je popsat postupy zpracování vstupních dat a tvorbu pěstitelských doporučení pro plošně diferencovanou výživu rostlin a jejich ověření v praxi. Zahrnuje postupy sběru dat o nevyrovnanosti porostů a heterogenitě agrochemických vlastností metodami digitálního mapování půdy, spektrálního měření porostů dálkovým průzkumem či záznamu výnosových map při sklizni plodin. Nosnou částí jsou postupy zpracování faremních dat v GIS prostředí cílené na doporučení v podobě předpisových map pro lokálně cílenou aplikaci dusíkatých hnojiv a zásobního hnojení. Postupy byly ověřeny v zemědělské společnosti AGRA Řisuty s.r.o.

Preparation of variable rate application maps based on the crop sensing and soil nutrient mapping

The aim of the verified technology is to describe the procedures for processing input data and preparation of variable plant nutrition and their verification in practice. It includes crop sensing and mapping of soil heterogeneity by methods of digital soil mapping, spectral measurement of crops by remote sensing or recording yield maps during crop harvesting. The part of text describes the processing of farm data in the GIS environment focused on recommendations in the form of prescription maps for variable rate application of fertilizers. The procedures were verified in the agricultural company AGRA Řisuty s.r.o.

Ověřená technologie je výsledkem řešení výzkumného projektu **TAČR SS01020309** s názvem „**Precizní zemědělství na pozemcích s regulovaným drenážním odtokem jako nástroj pro ochranu vod a zvýšení efektivity rostlinné výroby**“.

Autorský kolektiv:

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

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

Ing. Vítězslav Krček, Ph.D., AGRA Řisuty s.r.o.

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

Ing. Jiří Mezera, Mendelova univerzita v Brně

Ing. Jakub Elbl, Ph.D., Mendelova univerzita v Brně

Ing. Petr Širůček, Mendelova univerzita v Brně

Technická dokumentace výsledku

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

© Mendelova univerzita v Brně, 2022

I. ÚVOD

Prezentovaná ověřená technologie „Příprava aplikačních map pro variabilní aplikaci hnojiv v GIS na základě hodnocení nevyrovnanosti porostů a agrochemických vlastností půdy“ si klade za cíl praktické využití technologií a metod hodnocení stavu stanoviště a porostů polních plodin a jejich uplatnění při lokálně cílené aplikaci minerálních hnojiv, jako součást postupů tzv. precizního zemědělství.

Dokumentace ověřené technologie popisuje pracovní postupy, které upravují intenzitu hnojení podle produkčního potenciálu daného místa. Vymezení produkčních zón vychází z hodnocení stavu porostů v průběhu několika vegetačních období prostřednictvím vegetačních indexů z multispektrálních družicových dat. Na místech s nižším očekávaným výnosem plodin je dávka hnojení snížena a naopak. 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 aplikace minerálních hnojiv

Moderní geoinformační technologie využívané v rostlinné produkci umožňují reagovat na plošnou nevyrovnanost stanovištních podmínek a přizpůsobit jim pěstební zásahy formou lokálně cíleného hospodaření – precizního zemědělství. Cílem precizního zemědělství je rozdílným obhospodařováním uvnitř každého pozemku dosáhnout zvýšené efektivity využívání materiálových vstupů (hnojiva, pesticidy, PHM, apod.) při respektování půdních vlastností, stavu rostlin, dosahovaného výnosu a agro-environmentálních omezení daného stanoviště.

V oblasti výživy rostlin, 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. Lze vycházet z měření aktuálního stavu agronomicky významného jevu, jako je např. stanovení obsahu přístupných živin v půdě pro aplikaci zásobního hnojení nebo diagnostiku hodnocení výživného stavu rostlin pomocí spektrálních měření. Další možností je vycházet při návrhu variabilních aplikací z konceptu vymezení produkčních zón za delší časové období a následně nastavit úroveň prováděného pěstebního zásahu. Oba přístupy lze také kombinovat – normativní dávku živiny nastavit dle produkční zóny a následně provést korekci dle aktuálně zjištěného stavu (výživný stav porostu, obsah přístupných živin).

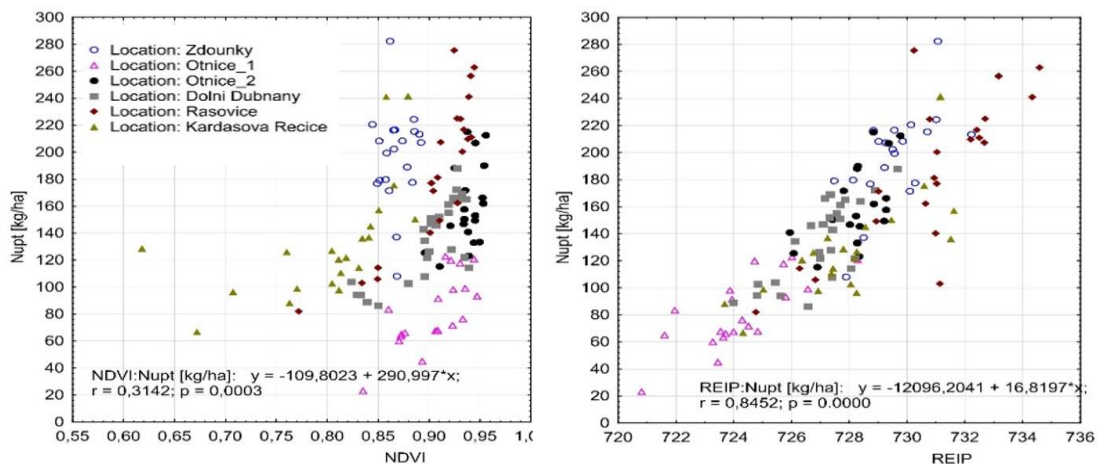
1.1. Přihnojení porostů dusíkatými hnojivy

Diagnostika výživného stavu rostlin pomocí spektrálních měření

Senzorovou diagnostiku porostů plodin na principu spektrálního měření lze využít k odhadu strukturního stavu porostu a obsahu dusíku v rostlinách, např. pomocí vegetačních indexů získaných z pozemních on-the-go plodinových senzorů nebo dálkového průzkumu Země. Na základě odvození obsahu chlorofylu v rostlinách je možné připravit předpisové mapy pro cílenou aplikaci dusíkatých hnojiv. Vegetačních indexů je celá řada, kromě zdroje spektrálních dat se liší také v citlivosti na biofyzikální parametry rostlin – stupeň zapojení porostu, množství nadzemní biomasy rostlin, obsah chlorofylu, stres suchem, predikce výnosů apod. (Mulla, 2013).

Nejčastěji využívaným vegetačním indexem je Normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index), který je vypočten z odrazivosti z červené a blízce infračervené části elektromagnetického záření podle rovnice $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$. NDVI je vhodný pro jednoduché vyhodnocení ve vztahu k zapojení a hustoty porostu. Pokročilejší systémy detekují záření v úzké oblasti záření v rozsahu 680 až 730 nm (tzv. red-edge pásmo, RE), která je charakteristická náhlým zvýšením odrazivosti záření u vegetace.

Red-edge vegetační indexy jsou více citlivé na změny v obsahu chlorofylu v rostlinách a netrpí jako NDVI sníženou citlivostí při vyšším množství biomasy, tzv. saturačním efektem NDVI. Jsou tedy vhodnější pro diagnostiku výživného stavu rostlin dusíkem i v pozdějších fázích vývoje (Obr. 1). Jedná se např. o indexy Red Edge Inflection Point (REIP), NDRE nebo NRERI.



Obr. 1 Porovnání vztahu odběru N rostlinami (Nupt) s vegetačními indexy NDVI a REIP (Sentinel-2, různé lokality 2017-2020). Silná pravostranná kumulace hodnot NDVI poukazuje na saturační efekt tohoto vegetačního indexu

Pro hodnocení stavu porostů lze v praxi využít dvou metod – dálkového průzkumu Země v podobě družicového, leteckého či bezpilotního multispektrálního snímkování nebo pozemní měření online senzorovými systémy umístěnými přímo na aplikační technice. Družicové snímky zachycují rozsáhlé území v krátkém časovém intervalu a současně vysokou periodicitou v řádech dnů. Díky svým vlastnostem a bezplatnou dostupností je jedním z nejčastěji využívaných zdrojů družicových multispektrálních dat pro precizní zemědělství program Copernicus Evropské kosmické agentury (ESA) se dvěma družicemi Sentinel-2 (A/B). Družice Sentinel 2A byla vypouštěna v roce 2015, v březnu 2017 byla doplněna o druhou družici Sentinel 2B. V tandemu poskytují snímky s periodicitou 5 dní (3-4 dny pro naši zeměpisnou šířku). Obě družice pořizují multispektrální obrazová data ve 13 spektrálních pásmech s prostorovým rozlišením až 10 m / pixel. Konfigurace spektrálních pásem umožňuje výpočet vegetačních indexů v oblasti red-edge (Drusch et al., 2012).

Identifikace výnosových úrovní v rámci pozemků

Sklízecí technika v současnosti nabízí možnost celoplošného monitorování výnosu sklizených plodin a jeho záznam do map, zejména u zrnin a případně pícnin. Jde o velmi cennou informaci o plošné nevyrovnanosti dosahovaných výnosů pro následnou optimalizaci pěstebních technologií. Kromě vyhodnocení a plošného znázornění ekonomické efektivity pěstování slouží také pro kalkulaci bilance živin dle úrovně odběru živin odvezenou produkcí v jednotlivých částech pozemků. Významné je také vymezení tzv. produkčních zón kombinací výnosových záznamů za více ročníků, které umožňuje identifikovat nadprůměrně či podprůměrně výnosné plochy v rámci jednotlivých zemědělských pozemků.



Obr. 2 Vymezení produkčních zón z družicových snímků vychází z hodnocení zapojení stavu porostů v jednotlivých ročnících – méně produkční místa vykazují opakovaně nižší hodnoty vegetačních indexů (příklad NDVI ze Sentinel-2)

V případě absence výnosových záznamů lze produkční zóny definovat z vegetačních indexů družicových snímků. Na rozdíl od výnosových záznamů multispektrální snímky nenesou informaci o dosaženém výnose, ale identifikují rozdíly v rozložení relativního výnosu na základě víceletých trendů hodnocení stavu vegetace (Obr. 2). 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. 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.

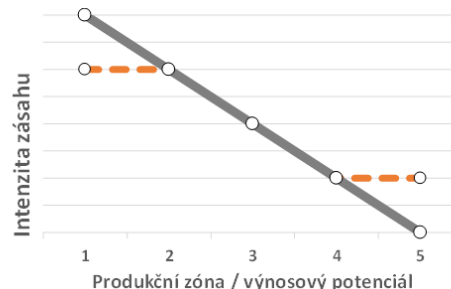
Posilovací (aditivní)

- 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

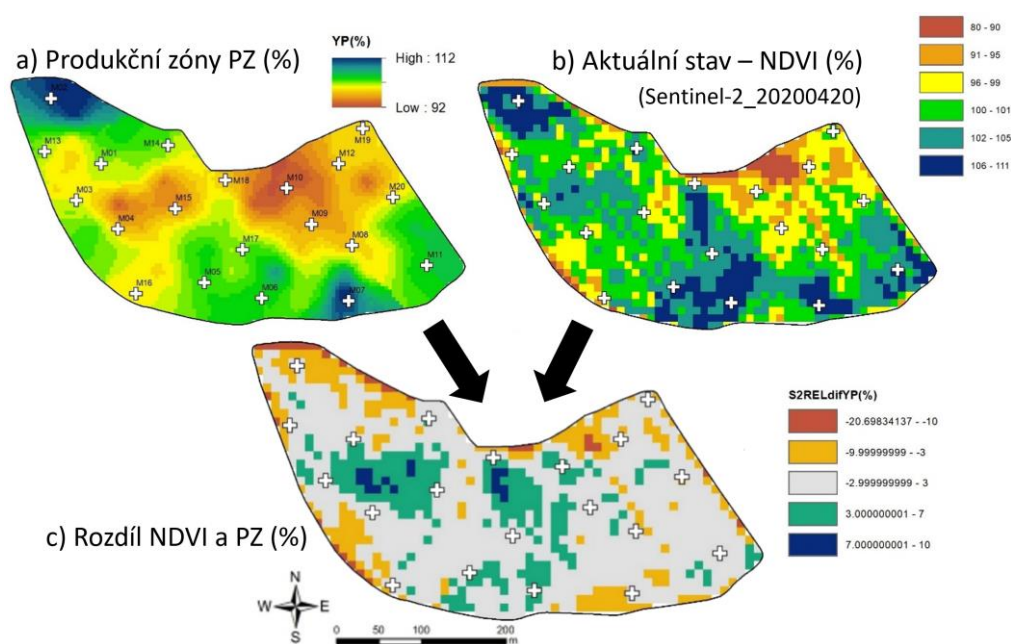
- Intenzita zásahu se snižuje se zvyšující se hodnotou výnosového potenciálu



Obr. 3 Strategie určení intenzity variabilně prováděného zásahu na základě vymezení produkčních zón (Lukas et al., 2020a)

Zohlednění dlouhodobých trendů produktivity půdy představuje v podstatě tradiční postup agronomického rozhodování opírajícího se o očekávaný výnos plodin, který je v případě precizního zemědělství zpřesněn do podoby vymezení výnosových hladin v rámci jednotlivých pozemků.

V některých případech je ideální kombinovat oba přístupy variabilní aplikace N hnojiv, jak diagnostiky aktuálního stavu porostů, tak vymezení produkčních zón z víceletých záznamů. Při stanovení dávky dusíkatého hnojení se vychází z pokrytí potřeby odběru N na očekávanou úroveň výnosu v dané části pozemku, odvozené z víceletých výnosových map či družicových snímků. Tato dávka je ale současně korigována dle diagnostiky výživného stavu rostlin z aktuálního družicového průřezu (Lukas et al., 2020a). Cílem je hnojením podpořit porost s předpokladem dosažení vyššího výnosu. Naopak na místech s obvykle dosahovaným nižším výnosem je dávka snižována. Nedochozí tedy ke srovnání porostu aplikací zvýšené dávky u porostu v horší kondici, ale k diferenciaci dle rozložení očekávaného výnosu (Obr. 4).

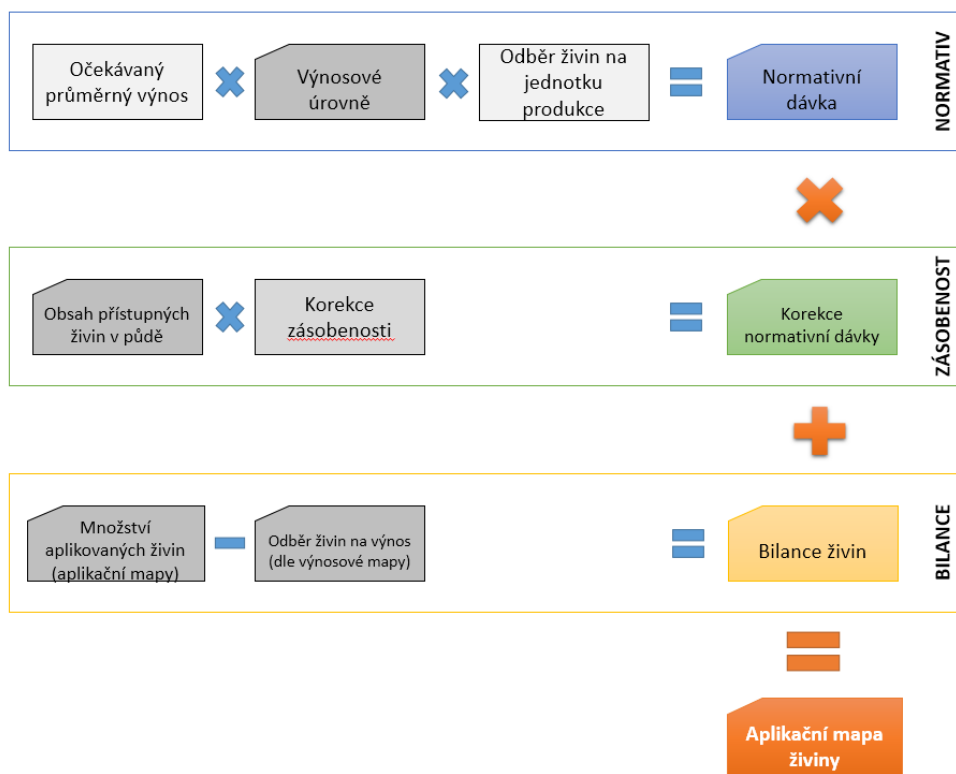


Obr. 4 Znárodnění mapy vymezení produkčních zón z družicových dat 2014-2020 (a) a aktuálním stavem porostu z NDVI (b). Kladné hodnoty rozdílu obou map (c), reprezentované zelenou až modrou barvou, ukazují na lepší stav porostu, než byl očekáván na daném místě dle rozložení výnosového potenciálu. Pro 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 (Lukas et al., 2020a)

1.2. Hodnocení obsahu přístupných živin v půdě a zásobní hnojení

Při stanovení úrovně zásobního hnojení se vychází z pokrytí odběru živin na dosahovanou produkci a obsahu přístupných živin (P, K, Mg, Ca) v půdě. Cílem je distribuovat dávky hnojiv s ohledem na výnosové rozdíly, neboť rozdílný celkový odběr živin může významně ovlivňovat zásobenost živin v půdě. Plošná nevyrovnanost výnosu se může významně podílet na rozložení obsahu živin v půdě - vyšší odběr živin v oblastech s nadprůměrnými výnosy vede při uniformní aplikaci ke snížení obsahu přístupných živin v půdě. Cílem variabilní aplikace zásobního hnojení je postihnout tyto rozdíly, zajistit vyrovnanou bilanci živin a dosažení dobré zásobenosti na celé ploše.

Základem stanovení dávky P, K, a Mg živin je bilanční metoda, kdy jsou do půdy navraceny živiny odebrané ve sklizených produktech. Prvním krokem je určení normativní dávky se zohledněním výnosových úrovní z výnosových map či vymezení zón relativního výnosového potenciálu z družicových dat. Následně je provedena korekce normativní dávky na základě hodnocení obsahu přístupných živin z půdního vzorkování optimalizovaného pomocí metod sensorového mapování půdy (DPZ, geofyzikální měření). Posledním krokem je zpřesnění bilance živin zohledněním odběru živin z výnosových map poslední sklizně a přísunu živin aplikací minerálních či organických hnojiv v uplynulém období (Obr. 5, Lukas et al., 2018b).

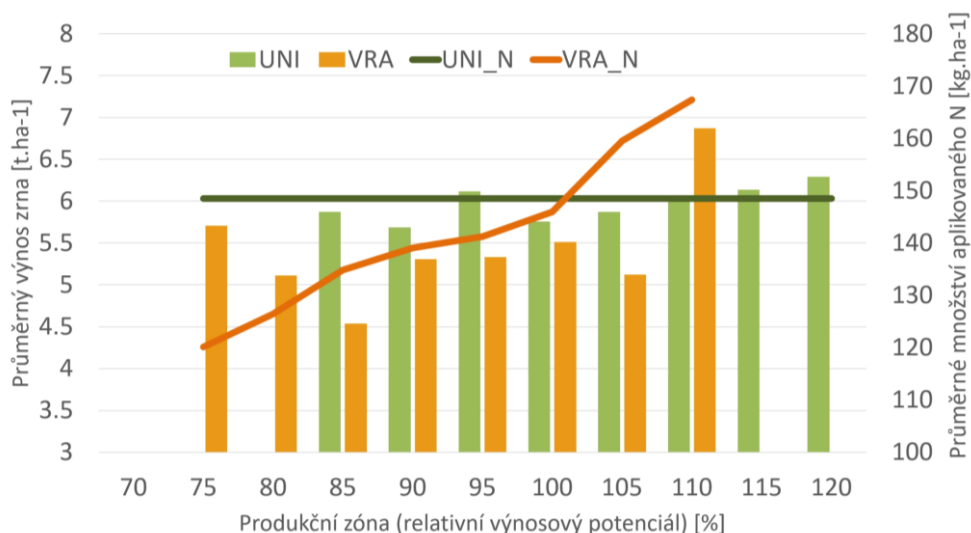


Obr. 5 Schématický návrh postupu zpracování aplikačních map zásobního hnojení v GIS prostředí (Lukas et al., 2018b)

2. Přínosy variabilní aplikace hnojiv

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 jen obtížně 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 N₂O; 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 dle autorů očekávat při začlenění i dalších postupů, jako jsou variabilní seti či variabilní aplikace přípravků na ochranu rostlin.

Porovnání průměrných výnosů zrna a množství aplikovaného N pro uniformní a variabilního přihnojení porostu pšenice dusíkatými hnojivy na několika lokalitách na Pelhřimovsku (2017-2020) poukázal na vyšší význam vlivu stanovištních podmínek na dosažené výnosy než úroveň výživy dusíkem (Lukas et al., 2020a). Zvýšení dávky dusíku v zónách s nadprůměrným výnosovým potenciálem nevedlo k očekávané podpoře odběru živin pro dosažení vyššího výnosu zrna (Obr. 6).



Obr. 6 Graf průměrného výnosu zrna a množství aplikovaného dusíku v jednotlivých zónách relativního výnosového potenciálu pro uniformní (UNI) a variabilní (VRA) přihnojení porostu pšenice ozimé (Lukas et al., 2020a).

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. Z tohoto pohledu lze doporučit využít mapy relativního výnosového potenciálu a snížit úroveň aplikace dusíkatých hnojiv v

zónách s nižším očekávaným výnosem zrna s cílem minimalizovat riziko nevyužití aplikovaného dusíku a jeho vyplavení do podzemních vod. Současně lze v obdobných produkčních podmínkách očekávat efekt „zastropování“ dávek dusíku na místech s vyšší hodnotou relativního výnosového potenciálu.

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.

III. OVĚŘENÁ TECHNOLOGIE

1. Popis Ověřené technologie

Úkolem Ověřené technologie je v praxi ověřit a zhodnotit postup, který byl navržen řešiteli v rámci řešení projektu TAČR č. **SS01020309** s názvem „**Precizní zemědělství na pozemcích s regulovaným drenážním odtokem jako nástroj pro ochranu vod a zvýšení efektivity rostlinné výroby**“. Ověřovaný postup slouží k praktickému stanovení diferencovaných dávek při přihnojování porostů polních plodin na základě vymezení produkčních zón pozemků.

2. Vlastní ověření a dosažené výsledky

Testování **Precizní zemědělství na pozemcích s regulovaným drenážním odtokem jako nástroj pro ochranu vod a zvýšení efektivity rostlinné výroby** proběhlo formou poloprovozního polního testování na pozemcích zemědělské společnosti AGRA Řisuty s.r.o. v průběhu roku 2022.

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. Vyhodnocení výnosových dat ve vztahu k dosahovanému výnosu.
6. Příprava aplikačních map pro variabilní aplikaci fosforečných hnojiv

2.1. Popis testovacích lokalit

Variabilní aplikace hnojiv na pozemcích obhospodařovaných zemědělským podnikem AGRA Řisuty s.r.o. (Tab. 1) byla provedena na základě spolupráce se společností Varistar s.r.o. Základem pro stanovení dávek hnojiv byly podkladové mapy relativního výnosového potenciálu, které byly pro vybrané aplikace dusíkatých hnojiv doplněny o hodnocení aktuálního stavu porostu z družicových snímků Sentinel-2.

Tab. 1 Přehled půdních bloků AGRA Řisuty s.r.o. vybraných pro ověřování variabilní aplikace dusíkatých hnojiv v roce 2022

| Pozemek | Výměra | ZKOD | Plodina | Svažitost | Nadmořská výška | Eroze |
|---------------|----------|--------|---------------|-----------|-----------------|-------|
| Velká močidla | 23,19 ha | 0506 | Pšenice ozimá | 4,54° | 328,34 m. n. m. | MEO |
| Pod Hvězdou | 7,41 ha | 1305/4 | Řepka ozimá | 3,56° | 361,84 m. n. m. | NEO |
| Za Frajmankou | 14,61 ha | 2303/2 | Řepka ozimá | 3,00° | 364,56 m. n. m. | NEO |
| Za Řachem | 16,98 ha | 1602/7 | Pšenice ozimá | 5,17° | 353,37 m. n. m. | MEO |

Návrh a vyhodnocení variabilní aplikace bylo provedeno na pozemku „Za Řachem“ s pšenicí ozimou o výměře 16,98 ha pro aplikaci dusíkatých hnojiv a pozemek „Velká Močidla“ o výměře 23,19 ha pro návrh variabilní aplikace zásobního hnojení fosforečnými hnojivy.

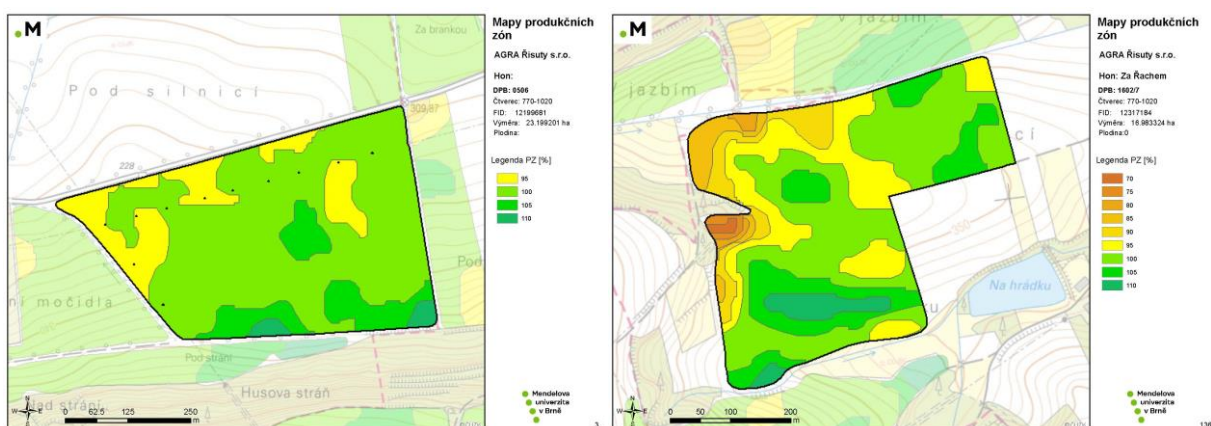
2.2. Stanovení relativního výnosového potenciálu z družicových dat

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., 2018a).

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 3 ha, při nevhodném (protáhlém) tvaru pozemků menší než 5ha. 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.

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, píce, 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.



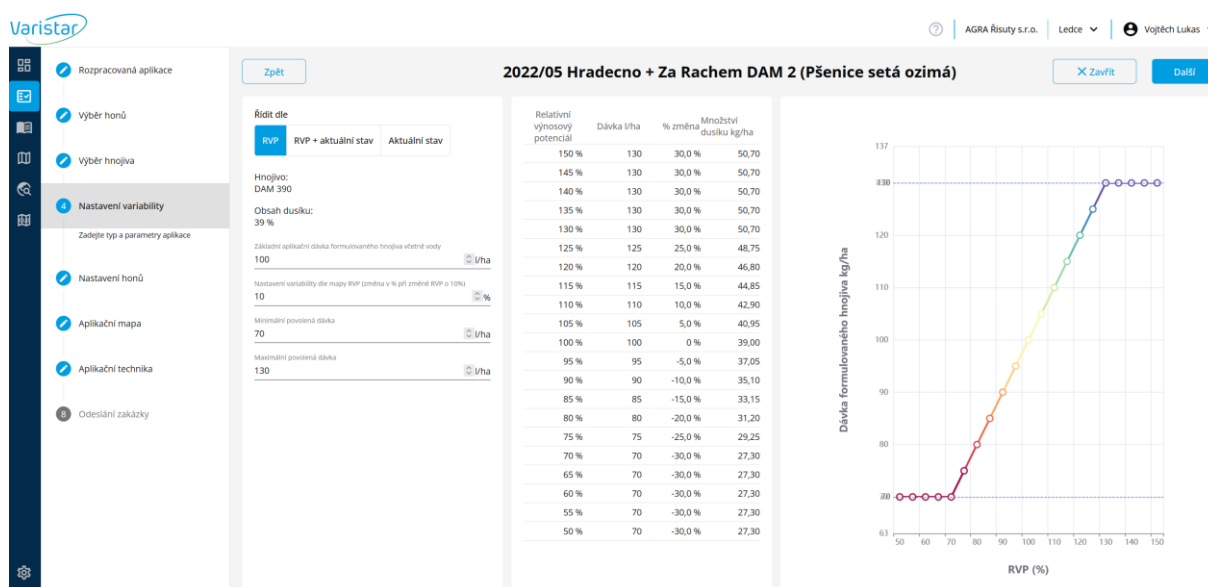
Obr. 7 Mapové znázornění rozložení relativního výnosového potenciálu (RVP) na ověřovaných pozemcích AGRA Řisuty s.r.o. (Lukas et al., 2020b)

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 AGRA Řisuty s.r.o. je popsán ve Specializované mapě s odborným obsahem (Nmap), která je výsledkem řešení projektu za rok

2020 (Lukas et al., 2020b). Mapa byla pro každý rok aktualizovaná z multispektrálních snímků zahrnující poslední vegetační období.

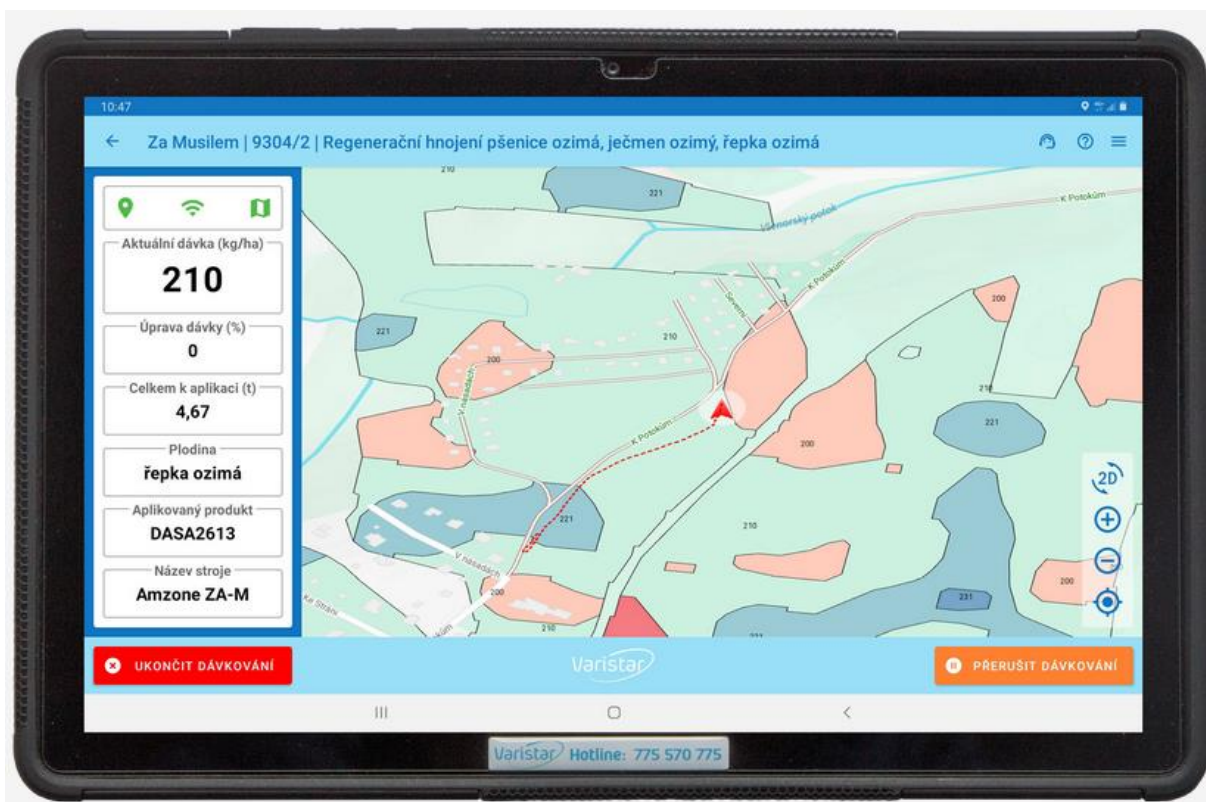
2.3. Příprava aplikačních map pro variabilní aplikaci dusíkatých hnojiv

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 hnojiv a rozložení aplikačních dávek v průběhu vegetačního období. Průměrná dávka byla přepočtena dle procentuální hodnoty mapy relativního výnosového potenciálu. U vybraných aplikací v pozdních vegetačních fázích byla dávka korigována dle hodnocení stavu porostů na základě aktuálních snímků Sentinel-2, podstatné bylo dostatečné zapojení porostu pro diagnostiku stavu na základě vegetačních indexů.



Obr. 8 Náhled tvorby zakázky variabilní aplikace hnojiv v portálu Varistar

Tvorba aplikačních map pro jednotlivé pozemky a prováděné pěstební zásahy byly realizovány prostřednictvím řešení společnosti Varistar s.r.o. To zahrnuje software část (portál) pro tvorbu aplikačních map, nedefinování základní dávky včetně minimální a maximální hodnoty dávky. Z portálu je pak zakázka aplikace odeslána na hardware jednotku **Varistar One**, která zajišťuje ovládání dávkování přes řídicí jednotku aplikátoru. Pokud je aplikátor vybaven možností záznamu, jsou současně získány také data záznamu aplikace formou bodových dat s trajektorií pojezdu aplikační techniky.



Obr. 9 Terminál Varistar One pro přenos aplikačních map a řízení variabilního dávkování (foto: Varistar s.r.o.)

Řešení Varistar One umožňuje jednoduché ovládání aplikace s využitím rozhraní kompatibilního s řídicími jednotkami běžně používaných rozmetadel, postřikovačů a secích strojů. Podkladová data pro aplikaci jsou stahována online bez nutnosti přenášení souborů na USB discích a zásahu obsluhy. Uživatel má ale možnost ručně upravit dávkování, aplikovaná dávka a pozemek se zobrazují na displeji. Terminál provádí také záznam aplikace formou bodových dat provedeného dávkování.



Obr. 10 Nainstalovaný terminál Varistar One v kabině traktoru AGRA Řisuty s.r.o. se zobrazenou aplikační mapou pro rozmetadlo pevných minerálních hnojiv Amzone ZA-M (vlevo) a záběr na soupravu při aplikaci (foto: Varistar s.r.o.)



Obr. 11 Variabilní aplikace kapalných hnojiv samojízdným postřikovačem Fendt Rogator (foto: Varistar s.r.o.)

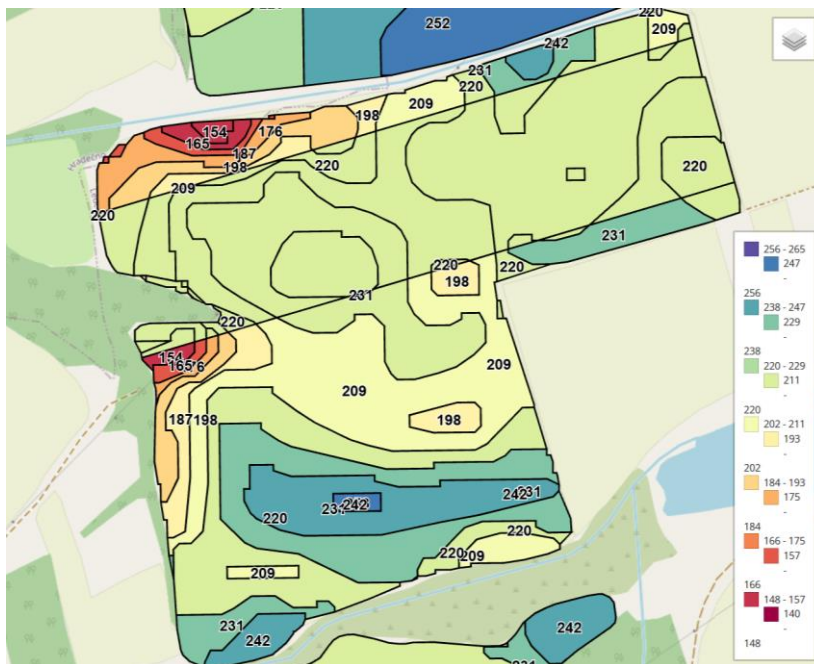
2.4. Provedení variabilní aplikace dusíkatých hnojiv na pokusných pozemcích

Dusíkatá výživa byla rozdělena do několika dávek dělených před setím a v průběhu vegetace plodin. Rozpis aplikací pro jednotlivé pozemky včetně doplňujících údajů jsou uvedeny v Tab. 2. Aplikace základní dávky před setím byla provedena uniformně pevnými minerálními hnojivy (Amofos, 100 kg/ha). Regenerační hnojení ozimých plodin brzy na jaře bylo již provedeno formou variabilní aplikace na základě map relativního výnosového potenciálu. Podobně bylo realizováno produkční hnojení obilnin.

Tab. 2 Soupis provedených aplikací dusíkatých hnojiv na pokusném pozemku Za Řachem (pšenice ozimá)

| Aplikace | Datum | Produkt | Prům. dávka hnojiva | Přísun N (kg/ha) | Dávka hnojiva (kg/ha) | Přísun N (kg/ha) |
|------------------|------------|------------|---------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
| Uniformně | 23.09.2021 | Amofos | 100 kg/ha | 12 | 100 | 12 |
| VRA dle mapy RVP | 24.02.2022 | LAD, 27% N | 220 kg/ha | 59 | 154 - 286 | 42 - 77 |
| VRA dle mapy RVP | 05.05.2022 | Močovina | 220 kg/ha | 101 | 154 - 286 | 71 - 132 |
| SUMA | | | | 173 | | 124 - 196 |

Aplikační mapy a záznamy o provedené aplikaci pro vybrané pozemky ze systému Varistar

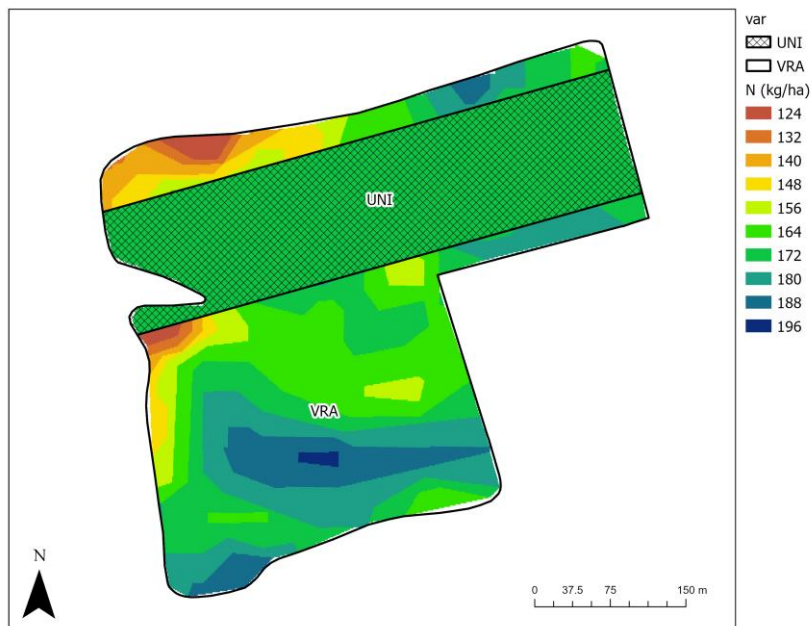


Obr. 12 Regenerační hnojení pšenice ozimé na pozemku Za Řachem, hnojivo LAD27 s průměrnou dávkou 217 kg/ha (rozsah dávkování 169-315 kg LAD/ha). Severní část pozemku byla vyčleněna pro uniformní aplikaci hnojiva.

Mapa zakázky 2022/2 pšenice LAD Ledce



Obr. 13 Záznam provedené aplikace regeneračního hnojení na pozemku Za Řachem



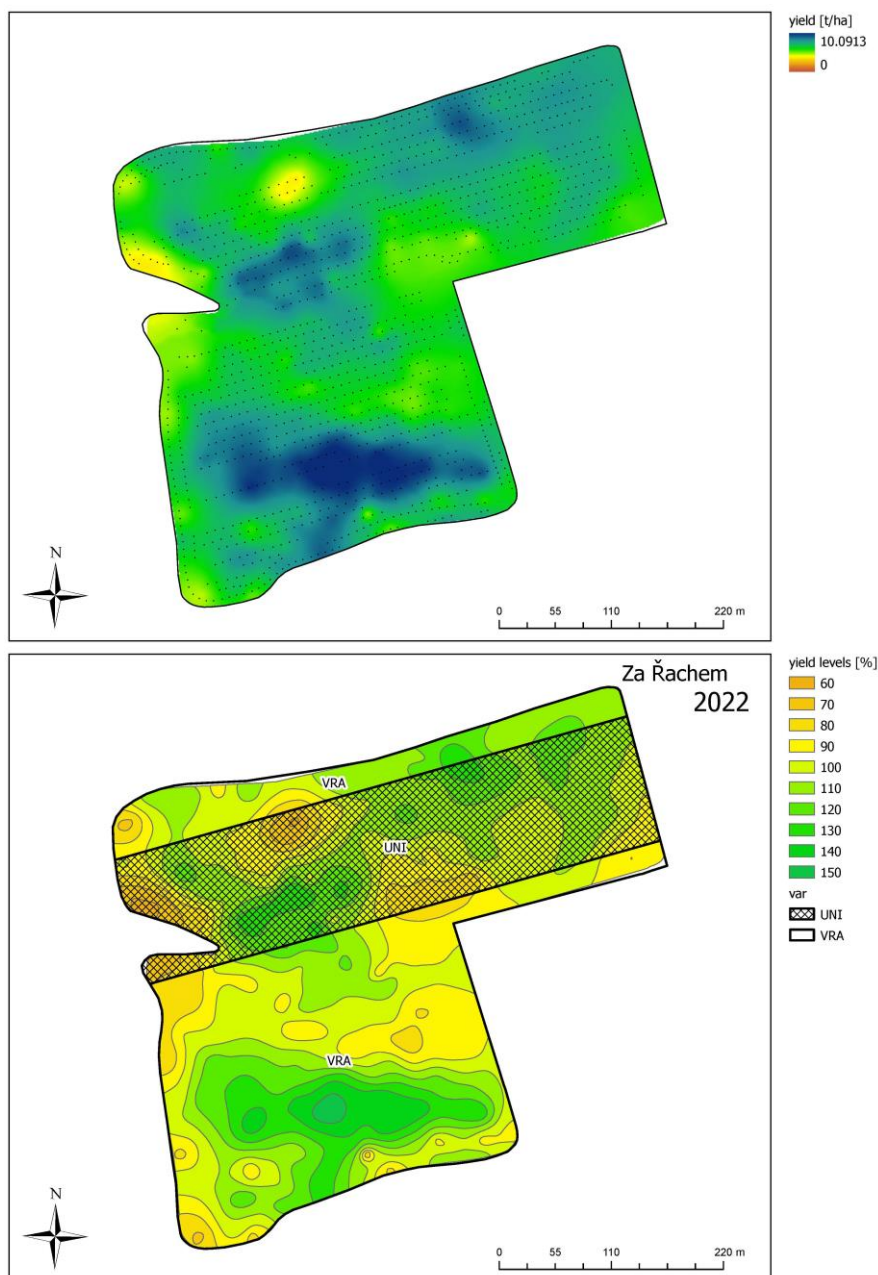
Obr. 14 Souhrn aplikovaného dusíku minerálními hnojivy na pozemku Za Řachem (rozsah 124-196 kg N / ha). Severní část pozemku byla vyčleněna pro uniformní aplikaci průměrné dávky (173 kg N / ha).

2.5. Vyhodnocení výnosových dat ve vztahu k variantám aplikace

Sklizeň porostů obilnin a olejnin na pokusných lokalitách byla provedena sklízecí technikou Claas a New Holland vybavených 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) a kalibrovány dle údajů průměrných výnosů zrna za pozemky evidovaných při odvozu zrna ve vážním deníku. Výsledné mapy výnosu zrna pro jednotlivé pozemky v absolutním a relativním vyjádření jsou znázorněny na Obr. 15.

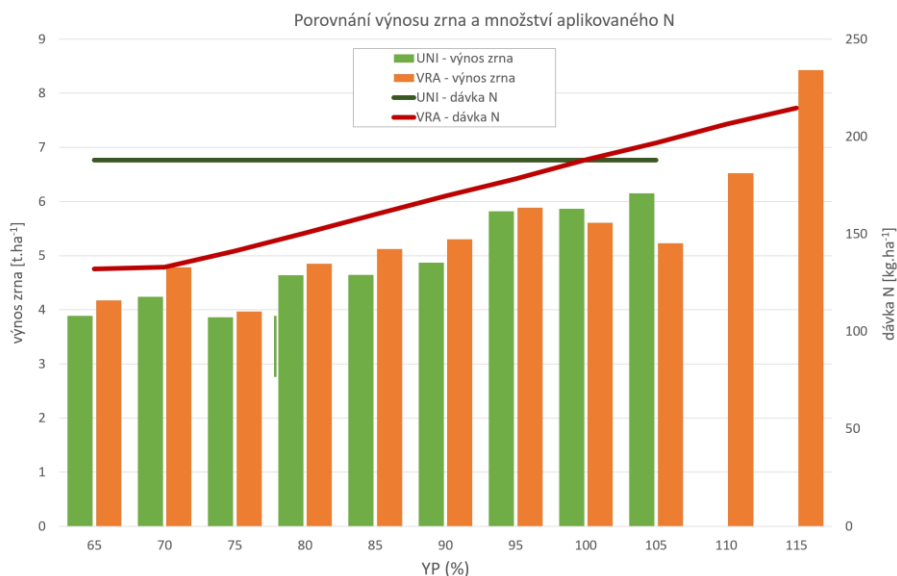
Tab. 3 Základní statistické parametry výnosu zrna pro uniformní (UNI) a variabilní (VRA) aplikaci v roce 2022

| Pozemek | Plodina | Varianta | Plocha [ha] | Průměr [t/ha] | Medián [t/ha] | Min [t/ha] | Max [t/ha] |
|-----------|---------|----------|-------------|---------------|---------------|------------|------------|
| Za Řachem | pšenice | UNI | 6.383 | 5.821 | 5.955 | 0.000 | 7.712 |
| | ozimá | VRA | 10.588 | 5.928 | 5.878 | 0.000 | 8.622 |



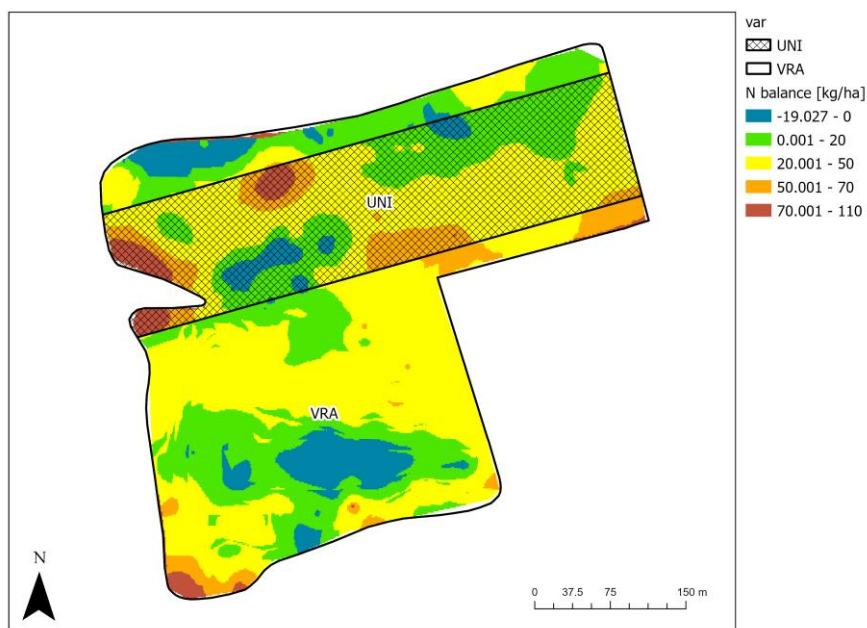
Obr. 15 Mapy absolutního (nahore) a relativního (dole) výnosu zrna vytvořené ze záznamů při sklizni pšenice ozimé na pozemku Za Řachem s vyznačením ploch uniformní (UNI) a variabilní (VRA) aplikace dusíkatých hnojiv

Souhrnné statistické hodnocení dosažených výnosů (Tab. 3) ukazuje na mírné zvýšení výnosu u varianty variabilní aplikace (VRA = 5.928 t.ha⁻¹) oproti uniformní variantě (UNI = 5.821 t.ha⁻¹). Rozdíl činí 107 kg.ha⁻¹. Podrobnější rozčlenění dosažených výnosů napříč výnosovými zónami u obou variant aplikace je patrné z grafu na Obr. 16.



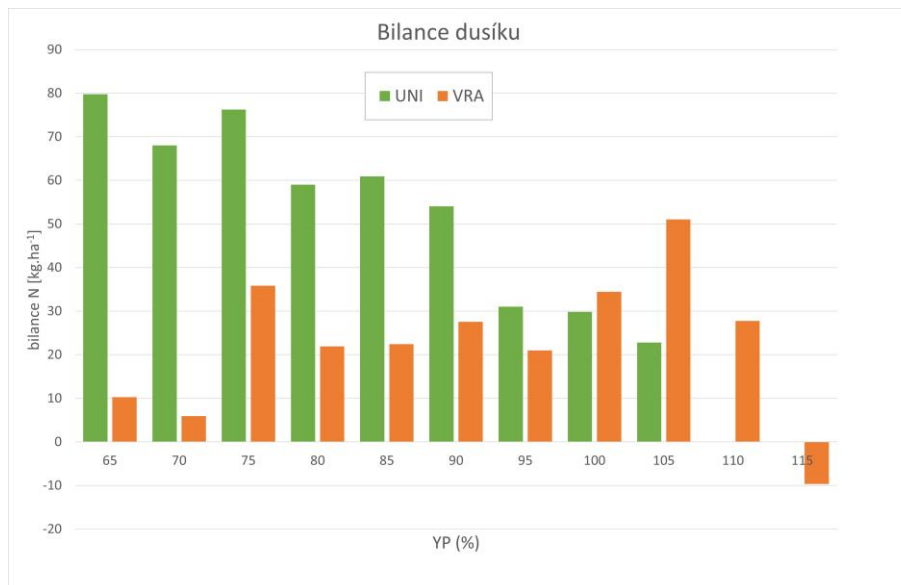
Obr. 16 Graf průměrného výnosu zrna a průměrného množství aplikovaného dusíku v jednotlivých zónách relativního výnosového potenciálu pro obě sledované varianty (UNI, VRA) na pozemku Za Řachem (2022)

Dosažené výnosy v rámci jednotlivých zón ukazují na obdobný trend změny výnosu napříč výnosovými zónami u obou variant hnojení (Obr. 16). Ze zohlednění množství aplikovaného dusíku z výsledků porovnání vyplývá, že zařazení do produkční zóny mělo větší vliv na výnosy než úroveň výživy dusíkem. Snížení dávky dusíku v zónách s podprůměrným výnosovým potenciálem nevedlo ke snížení výnosu zrna. Pokles výnosu zrna 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.



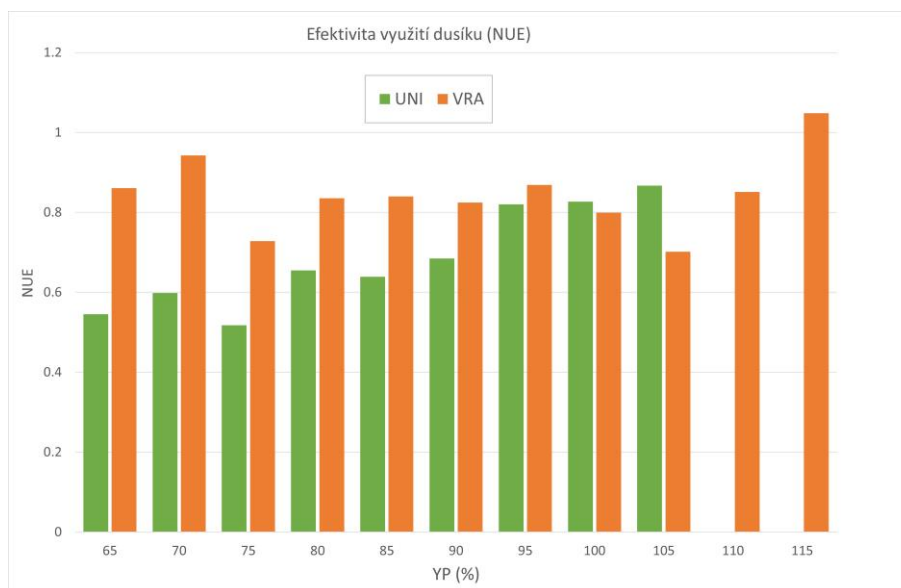
Obr. 17 Mapa prostorových diferencí výpočtu bilance dusíku ro pozemek Za Řachem

Z rozložení výnosových záznamů byl stanoven odběr dusíku na dosaženou produkci a porovnáním se souhrnem aplikovaného dusíku z uniformních a variabilních aplikací byla vypočtena bilance dusíku a stanoveny plošné diference v rámci sledovaného území (Obr. 17).



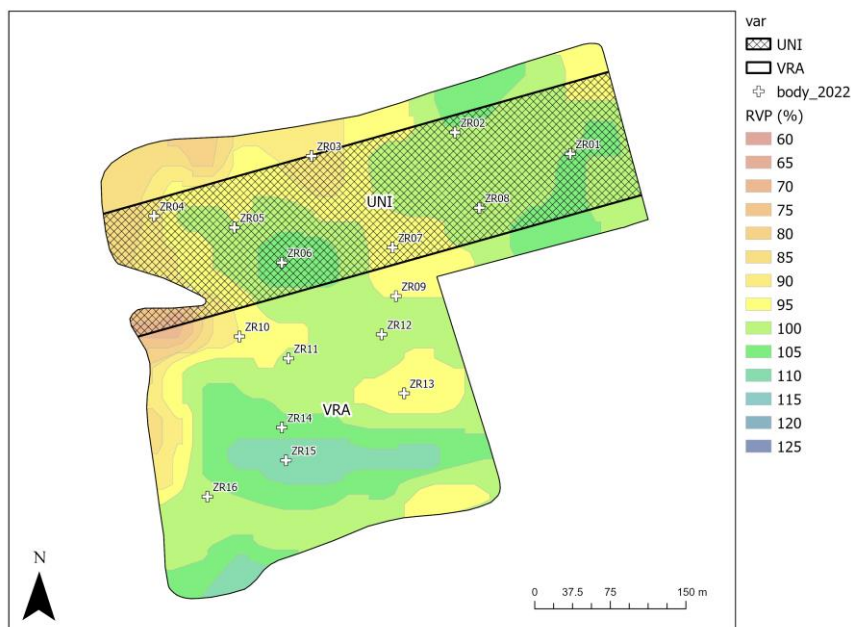
Obr. 18 Graf bilance N v jednotlivých zónách relativního výnosového potenciálu pro obě sledované varianty (UNI, VRA) na pozemku Za Řachem (2022)

Grafické znázornění výsledků bilance vypočtené pro obě varianty pokusu na Obr. 18 ukazuje na významné množství N nevyčerpaného na odběr živiny pro tvorbu produkce v uniformní variantě. Nejmarkantnější je tento rozdíl u výnosově slabých zón, kde dochází k přehnojení porostu v rozsahu od 10 do 69 kg N na ha. Podobně je ovlivněna efektivita využití dusíku (NUE), která je vyšší u variabilní aplikace u podprůměrných výnosových zón (Obr. 19).



Obr. 19 Graf efektivitu využití dusíku (NUE) v jednotlivých zónách relativního výnosového potenciálu pro obě sledované varianty (UNI, VRA) na pozemku Za Řachem (2022)

Na základě těchto výsledků lze doporučit využít při plánování přihnojení porostů pšenice ozimé dusíkatými hnojivy podkladové mapy relativního výnosového potenciálu s následným snížením úrovně aplikace dusíkatých hnojiv v zónách s nižším očekávaným výnosem zrna formou variabilního dávkování.

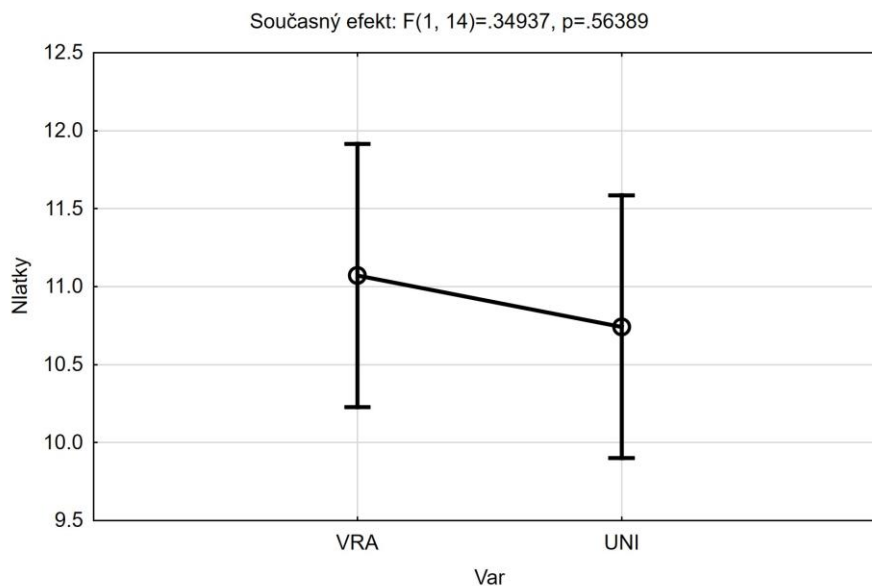


Obr. 20 Mapa rozložení odběrových míst klasů pro před sklizní pro stanovení kvantitativních a kvalitativních parametrů zrna

Kromě plošného sledování kvantitativních parametrů (výnosu) zrna byl na pozemku proveden těsně před sklizní porostu odběr vzorků zrna na 16 místech pokrývajících rozložení variant pokusu (UNI, VRA) a výnosové zóny (Obr. 20). Základní statistické údaje rozlišené dle variant aplikace jsou uvedeny v Tab. 4. Statistické vyhodnocení metodou ANOVA nevykázalo průkazné rozdíly mezi variantami (Obr. 21), ale znázorňuje trend mírného zvýšení obsahu N-látek u variabilní aplikace.

Tab. 4 Základní statistický souhrn výsledku stanovení kvalitativních parametrů zrna (obsah N-látek a objemová hmotnost) pro varianty variabilní (VRA) a uniformní (UNI) aplikace na pozemku Za Řachem

| | var | n | Průměr | Medián | Min. | Max. | Sm.odch. | Var.koef. |
|----------------|-----|---|--------|--------|--------|--------|----------|-----------|
| N-látky (%) | UNI | 8 | 10,74 | 10,70 | 8,99 | 12,26 | 1,25 | 11,65 |
| Obj. hm. (g/l) | UNI | 8 | 748,46 | 755,43 | 702,46 | 786,80 | 33,10 | 4,42 |
| N-látky (%) | VRA | 8 | 11,07 | 11,34 | 9,53 | 12,35 | 0,95 | 8,58 |
| Obj. hm. (g/l) | VRA | 8 | 748,31 | 738,38 | 690,82 | 812,00 | 38,12 | 5,09 |



Obr. 21 Grafické vyjádření výsledků ANOVA porovnávajícího obsah N-látek v zrnu pšenice ozimé pro variantu variabilní (VRA) a uniformní (UNI) aplikace dusíkatých hnojiv.

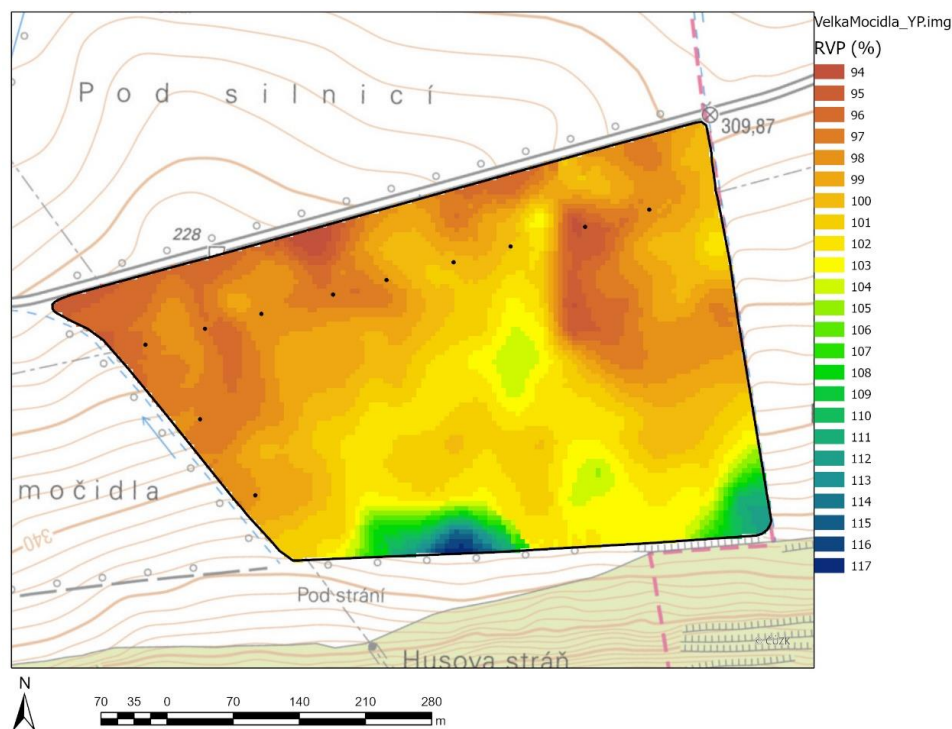
2.6. Příprava aplikačních map pro variabilní aplikaci fosforečných hnojiv

Na vybraném pozemku o výměře 23 ha (Velká močidla u Řisut) bylo provedeno hodnocení variability agrochemických vlastností půdy formou vzorkování půdy. Z odebraných půdních vzorků byl stanoven obsah přístupných živin v půdě dle metodiky Mehlich 3 a následně byl navržen postup tvorby aplikačních map se zohledněním obsahu živin v půdě a očekávaným odběrem živin na plánovaný výnos (odběrový normativ) (Lukas a kol., 2018).

Stanovení odběrového normativu dle mapy relativního výnosového potenciálu

Stanovení odběrového normativu pro variabilní aplikaci fosforečných hnojiv vychází z výnosových hladin podle mapy relativního výnosového potenciálu (RVP) a normativní dávky fosforu pro plánovaný odběr této živiny porostem.

Mapa relativního výnosového potenciálu (RVP) je vypočtena z družicových snímků Landsat a Sentinel-2 a na základě vegetačních indexů vymezuje zóny s obdobným rozložením stavu porostu, z kterých lze následně odvodit procentuální rozložení výnosových hladin (Obr. 22).



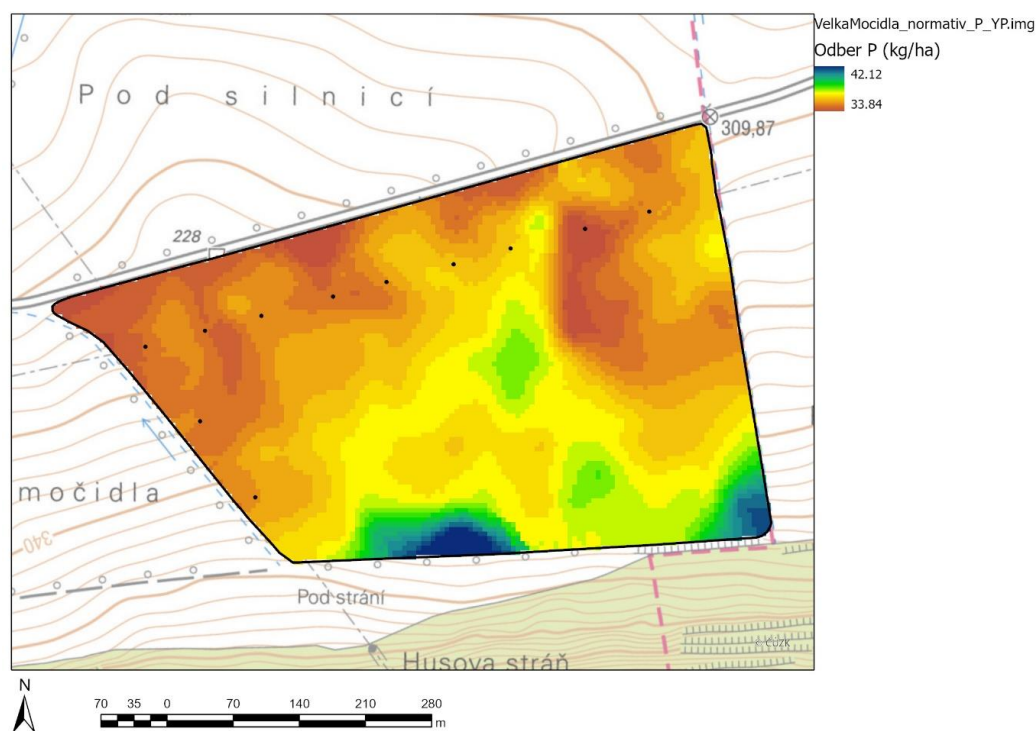
Obr. 22 Relativní výnosový potenciál pozemku Velká Močidla.

Stanovení normativní dávky definuje pokrytí odběru živiny plánovaným výnosem (Obr. 23). Vychází z tabulkových hodnot odběru P na jednotku produkce (pšenice ozimá = 4,0 kg/t výnosu, Klír et al. 2008, *Tab. 5*). Průměrný očekávaný výnos pšenice ozimé na tomto pozemku byl určen ve výši 9 t zrna na ha, průměrný odběr tedy činil 36 kg P na ha.

Tab. 5 Průměrný odběr živin ve sklizených produktech (Klír et al. 2008)

Tabulka 8: Průměrný obsah rostlinných živin, jejich odběr ve sklizených hlavních a vedlejších produktech (HP, VP), celkový odběr živin (HP + VP) v přepočtu na 1 t hlavního produktu

| Plodina | Produkt | Obsah živin (% v suš.) | | | sušina % | HP : VP 1,0 : | Průměrný odběr živin (kg/t) | | | | |
|-----------------|---------|------------------------|------|------|-------------|------------------|-----------------------------|-----|-------------------------------|------|------------------|
| | | N | P | K | | | N | P | P ₂ O ₅ | K | K ₂ O |
| Obilniny | | | | | | | | | | | |
| Pšenice ozimá | zrno | 2,24 | 0,39 | 0,44 | 85 | | 19,0 | 3,3 | 7,6 | 3,7 | 4,5 |
| | sláma | 0,61 | 0,11 | 1,18 | 85 | | 5,2 | 0,9 | 2,1 | 10,0 | 12,0 |
| | celkem | | | | | 0,80 | 23,2 | 4,0 | 9,2 | 11,7 | 14,1 |



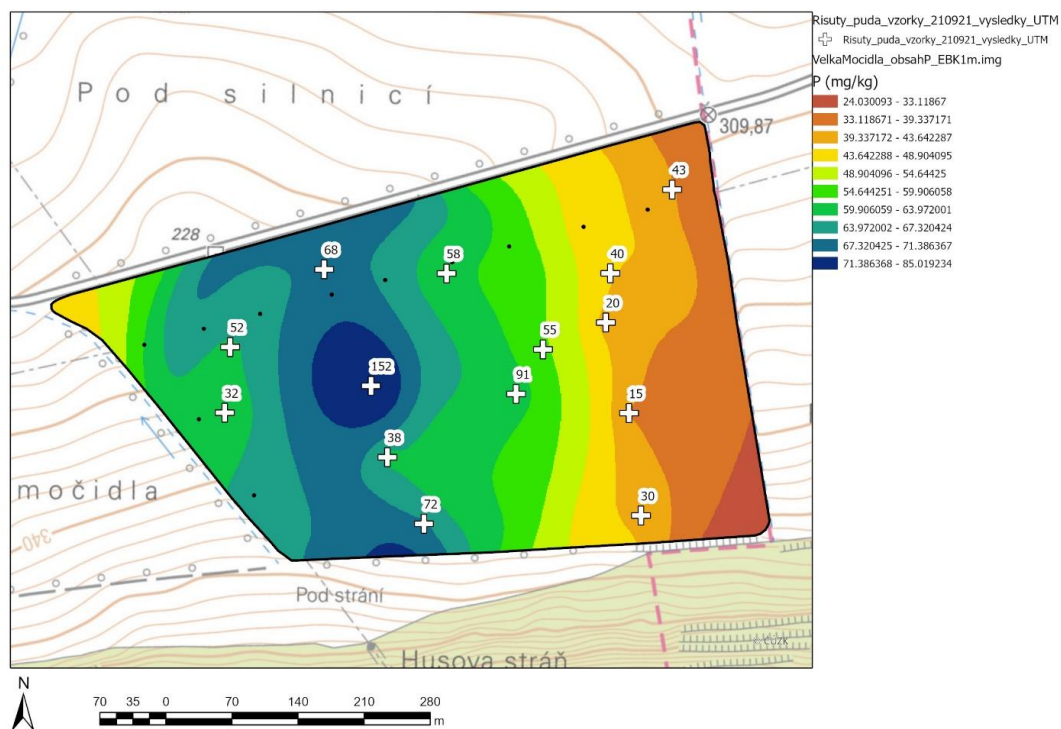
Obr. 23 Normativ odběru fosforu pro plánovaný výnos pšenice ozimé, Velká Močidla (Řisuty).

Korekce dávky dle hodnocení obsahu přístupného fosforu v půdě

Hodnocení zásobenosti půd P bylo provedeno na základě stanovení obsahu přístupného P v hloubce 0-30 cm z půdních vzorků odebraných v první pol. září 2021 (Tab. 6). Hodnoty přístupného P se pohybovaly mezi 15 – 152 mg/kg, jak je vidět na mapě, která byla vytvořena metodou Empirical Bayesian Kriging (Obr. 24). Obsah přístupného P podle Mehlicha III v mg/kg < 50 je hodnocen jako nízký, mezi 51 – 80 mg/kg jako vyhovující, mezi 81-155 jako dobrý, mezi 116 – 185 jako vysoký a vyšší obsahy jsou hodnoceny jako velmi vysoké.

Tab. 6 Výsledky hodnocení obsahu přístupného fosforu, Velká Močidla, září 2021.

| | n | Průměr | Medián | Minimum | Maximum | Sm.odch. | Var.koef. |
|---------|----|--------|--------|---------|---------|----------|-----------|
| P_0-30 | 14 | 54.71 | 47.50 | 15.00 | 152.00 | 34.88 | 63.75 |
| P_30-60 | 14 | 20.93 | 12.00 | 3.00 | 68.00 | 21.87 | 104.49 |



Obr. 24 Celoplošná mapa obsahu P sestavená metodou prostorových interpolací Empirical Bayesian Kriging (EBK). Body znázorňují místa odběru vzorků a s popisem hodnot obsahu P jednotlivých vzorků.

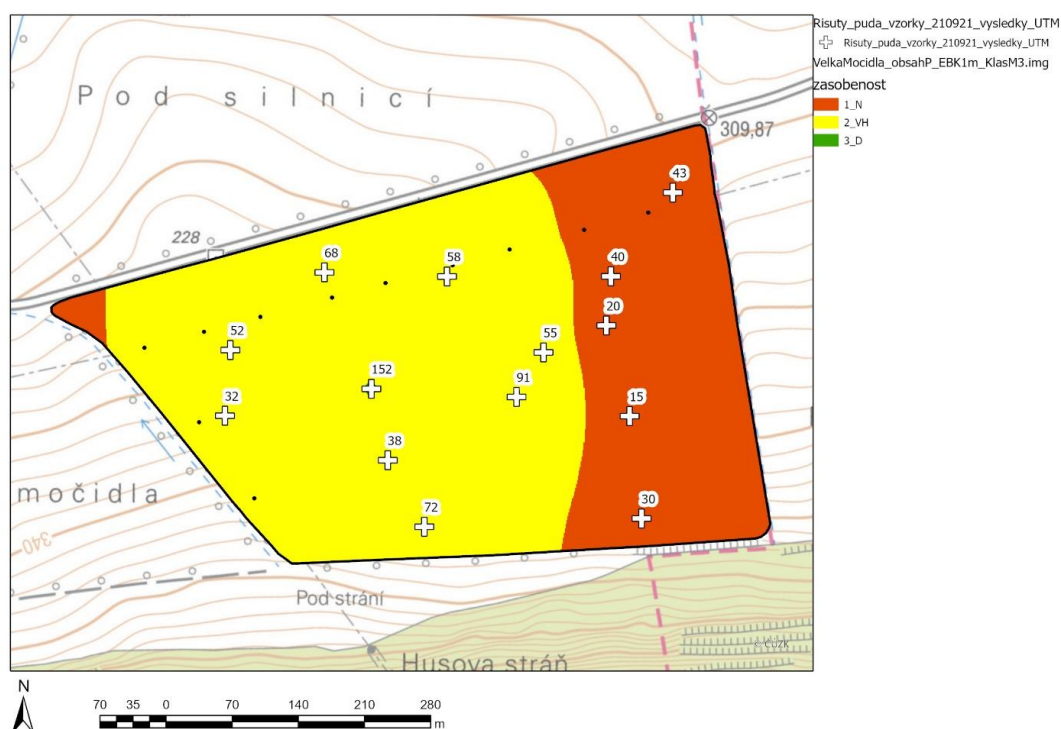
Klasifikace obsahu přístupného P byla provedena ve dvou variantách (A) členěním do 5 tříd zásobenosti dle metodiky Mehlich3 (Tab. 7, Obr. 25) a (B) dle bilančního koeficientu klasifikovaného do 15 tříd po 10 % (Tab. 8, Obr. 26, BK10 - Klír a kol., 2008, upravil Lukas a kol., 2018).

Tab. 7 Korekce hnojení na základě hodnocení obsahu přístupných živin v půdě dle metodiky Mehlich 3

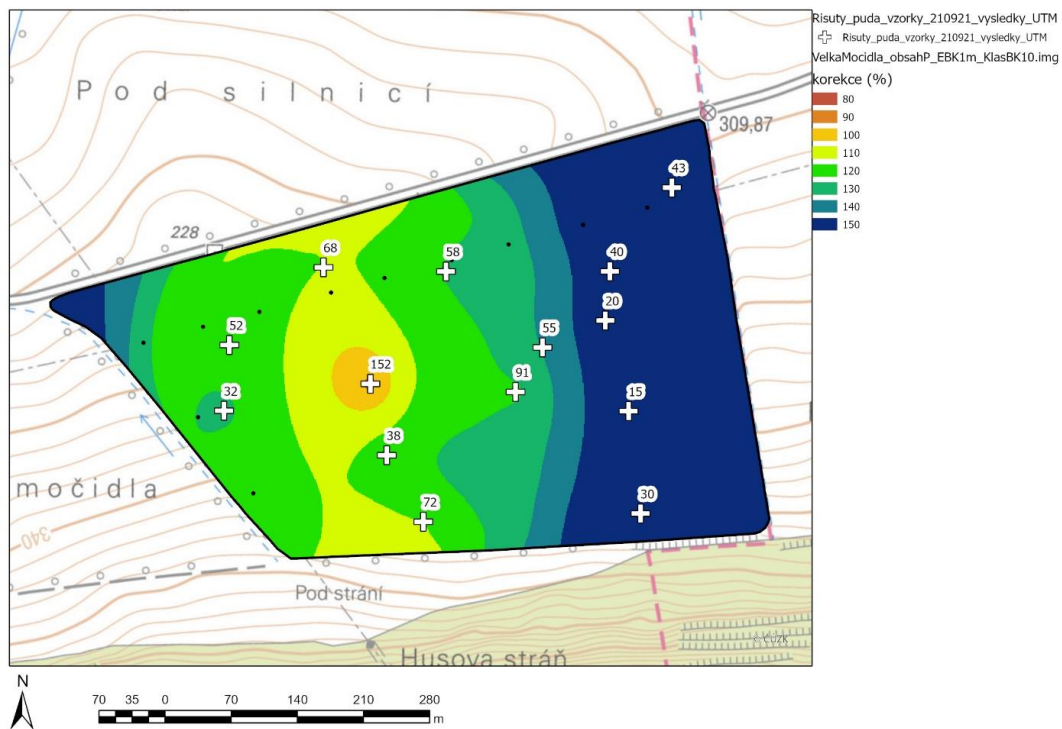
| Obsah P, K, Mg v půdě | Hodnocení |
|-----------------------|--|
| nízký (N) | potřeba výrazného dosycení příslušnou živinou (+ 50 % normativu) |
| vyhovující (VH) | potřeba mírného dosycení příslušnou živinou (+ 25 % normativu) |
| dobrá (D) | potřeba pouze nahrazovacího hnojením příslušnou živinou (normativ) |
| vyšší (V) | potřeba vypustit hnojení do dosažení kategorie dobré |
| velmi vyšší (VV) | hnojení příslušnou živinou je zbytečné až nepřijatelné |

Tab. 8 Hodnoty bilančního koeficientu pro kategorie obsahu přístupného fosforu a draslíku členěné po 10 %, včetně rozlišení druhu půdy koeficientem (Lukas a kol., 2018)

| BK (%) | Lehká půda | Střední půda | Těžká půda | |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| Obsah K (po překódování na druh půdy) | | | | Obsah P |
| 150 | 10000 - 10100 | 20000 - 20105 | 30000 - 30170 | 0 - 50 |
| 140 | 10100 - 10113 | 20105 - 20118 | 30170 - 30189 | 50 - 56 |
| 130 | 10113 - 10125 | 20118 - 20131 | 30189 - 30207 | 56 - 62 |
| 120 | 10125 - 10137 | 20131 - 20144 | 30207 - 30225 | 62 - 68 |
| 110 | 10137 - 10149 | 20144 - 20157 | 30225 - 30243 | 68 - 74 |
| 100 | 10149 - 10161 | 20157 - 20170 | 30243 - 30261 | 74 - 80 |
| 90 | 10161 - 10173 | 20170 - 20184 | 30261 - 30279 | 80 - 84 |
| 80 | 10173 - 10184 | 20184 - 20198 | 30279 - 30297 | 84 - 91 |
| 70 | 10184 - 10195 | 20198 - 20212 | 30297 - 30315 | 91 - 94 |
| 60 | 10195 - 10207 | 20212 - 20226 | 30315 - 30333 | 94 - 98 |
| 50 | 10207 - 10218 | 20226 - 20240 | 30333 - 30351 | 98 - 102 |
| 40 | 10218 - 10230 | 20240 - 20254 | 30351 - 30369 | 102 - 104 |
| 30 | 10230 - 10241 | 20254 - 20268 | 30369 - 30387 | 104 - 108 |
| 20 | 10241 - 10253 | 20268 - 20282 | 30387 - 30405 | 108 - 112 |
| 10 | 10253 - 10265 | 20282 - 20296 | 30405 - 30423 | 112 - 115 |
| 0 | >10265 | >20296 | >30423 | >115 |



Obr. 25 Klasifikace obsahu přístupného P členěním do 5 tříd zásobenosti dle metodiky Mehlich3

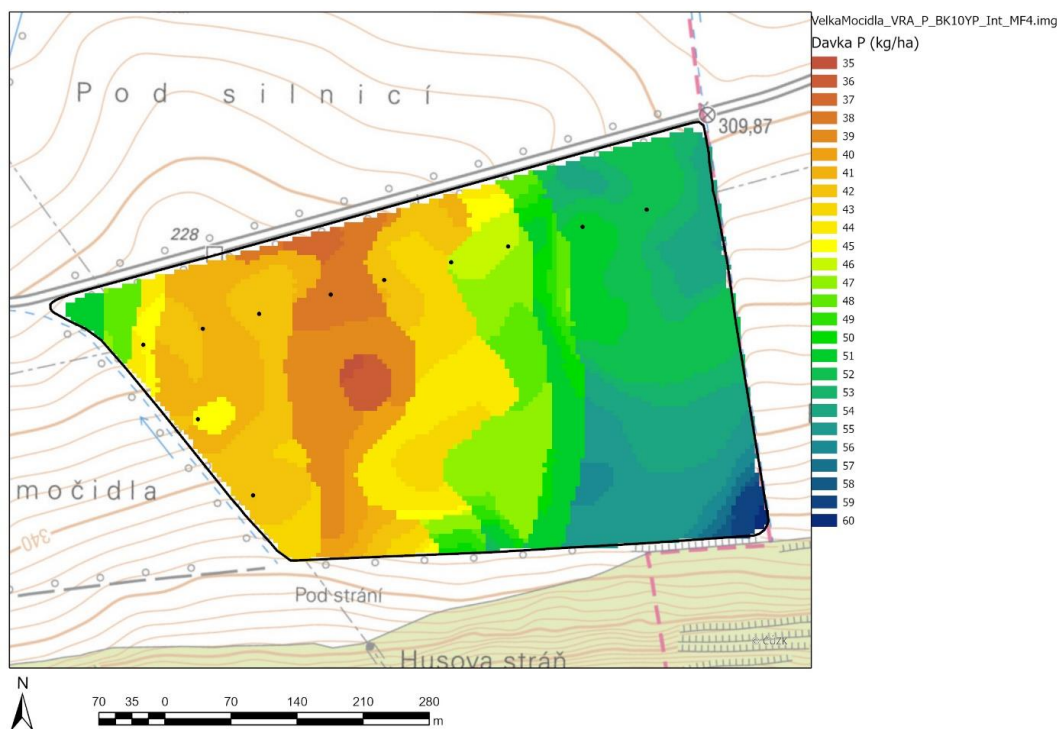


Obr. 26 Klasifikace obsahu přístupného P členěním dle bilančního koeficientu klasifikovaného do 15 tříd po 10 % (BK 10).

Z důvodu podrobnějšího členění je pro účely variabilního hnojení vhodnější klasifikace BK10.

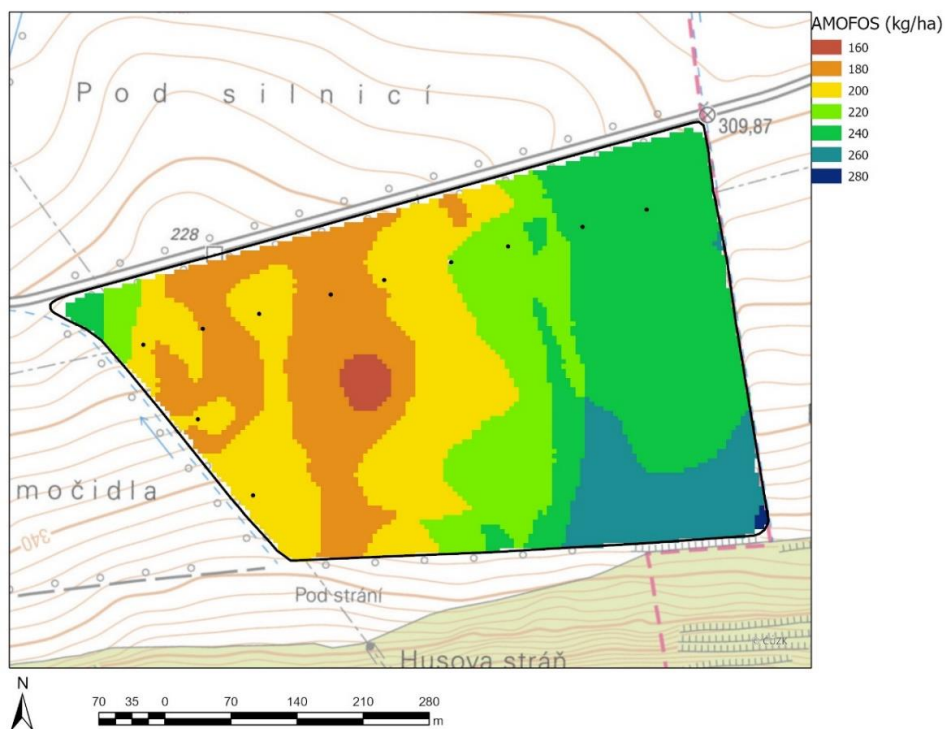
Kombinace normativní dávky a korekce dle obsahu živiny v půdě pro stanovení dávky fosforečného hnojiva

Na základě kombinace potřeby pokrytí odběru fosforu výnosem (normativ) s korekcí na obsah P v půdě (BK10) byla stanovena variabilní dávka P v kg/ha (Obr. 27).

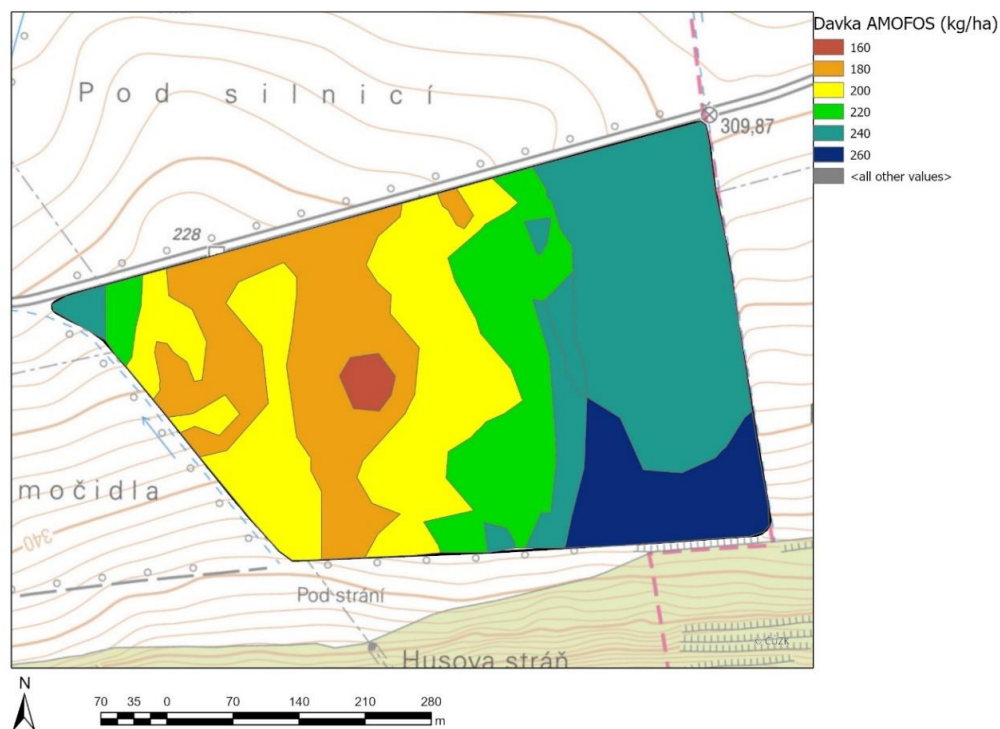


Obr. 27 Dávka fosforu (kg/ha) na základě kombinace normativu a korekce na obsah fosforu v půdě (BK10).

Dávka fosforu byla převedena na dávku hnojiva (AMOFOS, 52 % P₂O₅) a provedena generalizace mapy – rozčlenění dávkování po 20 kg hnojiva, převedení do vektorového formátu a zjednodušení geometrie aplikačních zón (Obr. 28 a Obr. 29).



Obr. 28 Dávka fosforu převedena na dávku hnojiva (AMOFOS, 52 % P₂O₅) s rozčleněním dávkování po 20 kg hnojiva (vektorový formát)



Obr. 29 Dávka fosforu převedena na dávku hnojiva (AMOFOS, 52 % P₂O₅) s rozčleněním dávkování po 20 kg hnojiva (zjednodušená geometrie aplikačních zón)

Předpokládanou spotřebu hnojiva AMOFOS variabilní aplikací pro jednotlivé dávky a plochy k nim připadajícím shrnuje *Tab. 9*. Průměrná dávka hnojiva na pozemek se pohybuje na úrovni 218 kg/ha. Při uniformní aplikaci by byla by byla spotřeba hnojiva AMOFOS na úrovni 165 kg hnojiva na ha, což je dáno převažujícím zastoupením vyhovujícího obsahu živiny na pozemku. Uniformní aplikací by ale nebyla dostatečně pokryta potřeba dosycení na ploše vykazující nízkou zásobu fosforu.

Tab. 9 Spotřeba hnojiva AMOFOS pro plochy s jednotlivými dávkami při variabilní aplikaci.

| AMOFOS (kg/ha) | Plocha (ha) | Celková dávka (kg/ha) |
|-------------------------------|-------------|-----------------------|
| 160 | 0,3 | 41,9 |
| 180 | 4,7 | 849,2 |
| 200 | 6,0 | 1192,3 |
| 220 | 3,6 | 795,7 |
| 240 | 9,9 | 2376,4 |
| 260 | 2,1 | 534,0 |
| Celkový součet | 26,5 | 5789,6 |
| Průměrná dávka (kg/ha) | | 218,4 |

IV. EKONOMICKÁ ANALÝZA

Předpokládané přínosy ověřené technologie vychází z optimalizace používání minerálních hnojiv formou variabilních aplikací v návaznosti na hodnocení nevyrovnanosti půdních podmínek v rámci jednotlivých pozemků.

V případě dusíkaté výživy je hlavním přínosem redukce aplikačních dávek dusíkatých minerálních hnojiv na plochách s nižší očekávanou úrovní výnosu při variabilní aplikaci hnojiv. Kvantifikace těchto přínosů je odvislá od výměry těchto ploch v rámci jednotlivých pozemků a úrovně plošné nevyrovnanosti. Pro vymezení výnosových úrovní lze využít mapy relativního výnosového potenciálu vypočtené z dat družicového monitoringu nebo výnosových záznamů pořízených při sklizni. Výsledky porovnání bilance dusíku poukázaly na nevyužití 10 až 69 kg N na ha při uniformní aplikaci. 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.

Při návrhu variabilní aplikace zásobního hnojení je dávka stanovena na základě kombinace zohlednění výnosových úrovní v rámci pozemků a plošné variability obsahu přístupných živin v půdě. V případě ověřovaného pozemku vedla variabilní aplikace k navýšení průměrné dávky hnojení fosforečnými hnojivy z důvodu zvýšené potřeby dosycení na části pozemku, která by uniformní aplikací nebyla pokryta.

Kromě ekonomických výsledků lze také očekávat přínosy environmentální, které se odvíjejí od vyrovnání bilance živin a snížení rizika vyplavování forem dusíku do podzemních vod.

V. DOPORUČENÍ A ZÁVĚR

Výsledky ověření technologie variabilní aplikace dusíkatých hnojiv na pozemku AGRA Řisuty s.r.o. ukázaly na pozitivní efekt snížení aplikačních dávek minerálního N na plochách s podprůměrným výnosovým potenciálem. Úprava dávek hnojení tímto způsobem formou variabilní aplikace přináší vyrovnanou bilanci dusíku a 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.

Z uvedeného vyplývá, že celková spotřeba aplikovaného dusíku v rámci variabilního hnojení pro pšenici ozimou může být snížena oproti homogenní aplikaci, a to z důvodu navrženého snížení dávek N na méně úrodných a propustnějších částech pozemku. Tento rozdíl bude výraznější na pozemcích vykazující vyšší nevyrovnanost půdních podmínek. Snížené dávky N na méně produktivních částech by zároveň minimalizovalo riziko vyplavení dusičnanů do spodních částí půdního profilu a do povrchových a podzemních vod ve zranitelných oblastech dusičnany. Předkládaná technologie má tak výrazný potenciál přispět ke snížení negativních dopadů zemědělské činnosti na životní prostředí.

Variabilní aplikace zásobních hnojiv je silně odvislá od plošné variability obsahu přístupných živin v půdě. V rámci modelového ověřování vykazovala variabilní aplikace potřeby vyššího dosycení na části pozemku s nižším obsahem živiny (a vyšší produktivitou), což se projevilo na zvýšení dávky variabilní aplikace oproti uniformní. Pokrytí lokálních nevyrovnaností přispívá k vyrovnané bilanci a minimalizaci výnos-limitujícího vlivu agrochemických vlastností.

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
- 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)
- 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)
- 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
- 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
- Lukas, V., Neudert, L., Duffková, R., Fučík, P., Mezera, J. *Mapa výnosového potenciálu pro Zemědělské družstvo Kojčice* Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2018a, 40 s. ISBN 978-80-7509-631-9
- Lukas, V., Neudert, L., Duffková, R., Haberle, J., Brom, J., Horniaček, I., Vaněček, M., *Variabilní přihnojení dusíkem pomocí nástrojů GIS a vyhodnocení efektivity využití živin v rozdílných vláhových podmínkách. Ověřená technologie.*, Brně, M. u. v., 2020a.
- Lukas, V., Neudert, L., Duffková, R., Mezera, J., Horniaček, I., Širůček, P., Krček, V. Mapa relativního výnosového potenciálu pro pozemky AGRA Řisuty, Mendelova univerzita v Brně, 2020b, p. 76.
- Lukas, V., Neudert, L., Širůček, P., Kraus, M., Novák, J., Mezera, J., Zemek, F., Pikl, M., Žížala, D. Postupy tvorby aplikačních map se zohledněním variability agrochemických vlastností půdy a výnosové úrovně pozemků, Mendelova univerzita v Brně, 2018b.
- 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
- Mulla, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*. 2013, vol. 114, no. 4, pp. 358-371. 4//. ISSN 1537-5110
- 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)
- 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
- 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 TECHNOLIE

- 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
- 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., Duffková, R., Mezera, J., Horniaček, I., Širůček, P. and Krček, V. Mapa relativního výnosového potenciálu pro pozemky AGRA Řisuty, Mendelova univerzita v Brně, 2020, p. 76.
- Lukas, V., Neudert, L., Širůček, P., Kraus, M., Novák, J., Mezera, J., Zemek, F., Píkl, M. and Žížala, D. Postupy tvorby aplikačních map se zohledněním variability agrochemických vlastností půdy a výnosové úrovně pozemků, Mendelova univerzita v Brně, 2018.
- Lukas, V., Neudert, L., Širůček, P., Novák, J. and Elbl, J. 2021. Význam variabilní aplikace fosforečných a draselných hnojiv u cukrové řepy. *Listy cukrovarnické a řepářské*. 137(12), 417-422.
- Mezera, J., Lukas, V., Horniaček, I., Smutný, V. and Elbl, J. 2022. Comparison of Proximal and Remote Sensing for the Diagnosis of Crop Status in Site-Specific Crop Management. *Sensors*. 22(1), 19.
- Žížala, D., Lukas, V. and Kumhálová, J. 2021. Dálkový průzkum Země a precizní zemědělství. Zemědělský svaz ČR,

VIII. PROTOKOL O OVĚŘENÍ TECHNOLOGIE

Protokol o ověření technologie

Název Ověřené technologie:

Příprava aplikačních map pro variabilní aplikaci hnojiv v GIS na základě hodnocení nevyrovnanosti porostů a agrochemických vlastností půdy

Autoři Ověřené technologie:

doc. Ing. Vojtěch Lukas, Ph.D., Mendelova univerzita v Brně
Ing. Renata Duffková, Ph.D., Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.
Ing. Vítězslav Krček, Ph.D., AGRA Řisuty s.r.o.
Ing. Lubomír Neudert, Ph.D., Mendelova univerzita v Brně
Ing. Jiří Mezera, Mendelova univerzita v Brně
Ing. Jakub Elbl, Ph.D., Mendelova univerzita v Brně
Ing. Petr Širůček, Mendelova univerzita v Brně

Předmět ověřování:

Praktické využívání nových postupů tvorby aplikačních map pro variabilní aplikaci hnojiv na základě vymezení produkčních zón z družicových dat a hodnocení plošné nevyrovnanosti agrochemických vlastností půdy.

Ověřující pracoviště:

Ústav agrosystémů a bioklimatologie AF, Mendelova univerzita v Brně – *spoluřešitel projektu*
Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i. – *řešitel projektu*
AGRA Řisuty s.r.o. – *zemědělský podnik, uživatel technologie*

Termín ověření:

Únor 2021 (*výběr ověřovací lokality*) – Listopad 2022 (*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:

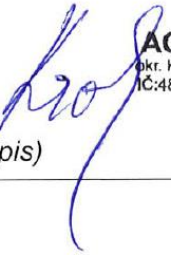
Předpokládané přínosy ověřené technologie vychází z optimalizace používání minerálních hnojiv formou variabilních aplikací v návaznosti na hodnocení nevyrovnanosti půdních podmínek v rámci jednotlivých pozemků. Výsledky ověření technologie variabilní aplikace dusíkatých hnojiv na pozemku AGRA Řisuty s.r.o. ukázaly na pozitivní efekt snížení aplikačních dávek minerálního N na plochách s

podprůměrným výnosovým potenciálem. Úprava dávek hnojení tímto způsobem formou variabilní aplikace přináší vyrovnanou bilanci dusíku a 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.

Z uvedeného vyplývá, že celková spotřeba aplikovaného dusíku v rámci variabilního hnojení pro pšenici ozimou může být snížena oproti homogenní aplikaci, a to z důvodu navrženého snížení dávek N na méně úrodných a propustnějších částech pozemku. Tento rozdíl bude výraznější na pozemcích vykazující vyšší nevyrovnanost půdních podmínek. Snížené dávky N na méně produktivních částech by zároveň minimalizovalo riziko vyplavení dusičnanů do spodních částí půdního profilu a do povrchových a podzemních vod ve zranitelných oblastech dusičnany. Předkládaná technologie má tak výrazný potenciál přispět ke snížení negativních dopadů zemědělské činnosti na životní prostředí.

Technologie „Příprava aplikačních map pro variabilní aplikaci hnojiv v GIS na základě hodnocení nevyrovnanosti porostů a agrochemických vlastností půdy“ byla navržena a ověřena v rámci řešení výzkumného projektu TAČR č. SS01020309 s názvem „Precizní zemědělství na pozemcích s regulovaným drenážním odtokem jako nástroj pro ochranu vod a zvýšení efektivity rostlinné výroby“.

| | |
|--|--|
| <p>Za autorský tým MENDELU Ing. Vojtěch Lukas, Ph.D. Ústav agrosystémů a bioklimatologie AF Mendelova univerzita v Brně</p> <p>V Brně dne: 29. 11. 2022</p> |  <p>(podpis)</p> |
|--|--|

| | |
|--|--|
| <p>Za uživatele technologie Ing. Vítězslav Krček, Ph.D., AGRA Řisuty s.r.o.</p> <p>V Leducích dne: 30. 11. 2022</p> |  <p>AGRA Řisuty s.r.o. okr. Kladno, Ledeč 162, PSČ 273 05 IČ:489 53 229 DIČ: CZ48953229</p> <p>(podpis)</p> |
|--|--|

Název: Příprava aplikačních map pro variabilní aplikaci hnojiv v GIS na základě hodnocení nevyrovnanosti porostů a agrochemických vlastností půdy

Autoři: doc. Ing. Vojtěch Lukas, Ph.D.
Ing. Renata Duffková, Ph.D.
Ing. Vítězslav Krček, Ph.D.
Ing. Lubomír Neudert, Ph.D.
Ing. Jiří Mezera
Ing. Jakub Elbl, Ph.D.
Ing. Petr Širůček

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

Vydání: první, 2022

Počet stran: 40

Vydáno bez jazykové úpravy.

Publikace je poskytována bezplatně.

Kontakt na autory: vojtech.lukas@mendelu.cz

