

METODIKA PRO PRAXI

# Postupy tvorby aplikačních map se zohledněním variability agrochemických vlastností půdy a výnosové úrovně pozemků

Lukas V. a kol.



MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

**Postupy tvorby aplikačních map se  
zohledněním variability agrochemických  
vlastností půdy a výnosové úrovně  
pozemků**

N<sub>met</sub> – Certifikovaná metodika pro praxi

VOJTĚCH LUKAS, LUBOMÍR NEUDERT, PETR ŠIRŮČEK, MICHAL  
KRAUS, JAROSLAV NOVÁK, JIŘÍ MEZERA, FRANTIŠEK ZEMEK,  
MIROSLAV PIKL, DANIEL ŽÍŽALA

2018

### **Postupy tvorby aplikačních map se zohledněním variability agrochemických vlastností půdy a výnosové úrovně pozemků**

Metodika popisuje postupy tvorby aplikačních map na základě digitálního mapování půdy a z výsledků půdního vzorkování a způsob stanovení dávky variabilní aplikace hnojiv s ohledem na stav zásobenosti půd přístupnými živinami a plošnou nevyrovnanost výnosových úrovní v rámci jednotlivých pozemků. Současně zahrnuje výsledky porovnání těchto postupů s ohledem na celkové množství aplikovaných hnojiv a přesnost rozložení dávek v rámci půdních bloků.

### **Creating of variable rate application maps based on the mapping of spatial variability of soil agrochemical properties and crop yield heterogeneity**

The methodology describes how to create application maps based on digital soil mapping and soil sampling results and how to determine the dose of variable rate application of fertilizer addressed to spatial variability of nutrient content in soil and crop yields within the field. It includes also the results of a comparison of these procedures with respect to the total amount of fertilizer applied and the accuracy of the dose distribution across the fields.

#### **Poděkování:**

Metodika vznikla jako součást řešení výzkumného projektu Ministerstva zemědělství NAZV QJ1610289 „Optimalizace využití produkčního potenciálu půdy lokálně cílenou agrotechnikou“.

#### **Autorský kolektiv:**

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

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

Ing. Petr Širůček - ROSTĚNICE a.s.

Ing. Michal Kraus - ROSTĚNICE a.s.

Ing. Jaroslav Novák, Ph.D. - Mendelova univerzita v Brně

Ing. Jiří Mezera - Mendelova univerzita v Brně

doc. Ing. Mgr. František Zemek, Ph.D. - Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i. (Czechglobe)

Ing. Miroslav Píkl, Ph.D. - Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i. (Czechglobe)

Mgr. Daniel Žížala, Ph.D. - Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., Oddělení půdní služby

#### **Oponenti:**

Ing. Jan Hrubý, CSc. - Výzkumný ústav pícninářský, spol. s r.o.

Ing. Josef Svoboda - Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský

Metodiku schválil Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský pod č.j. UKZUZ 091371/2019

Ministerstvo zemědělství doporučuje tuto metodiku pro využití v praxi.

**© Mendelova univerzita v Brně, 2018**

**ISBN 978-80-7509-630-2**

## OBSAH

|       |  |    |
|-------|--|----|
| I.    | Cíl metodiky .....   | 4  |
| II.   | Vlastní metodika .....   | 5  |
| 1.    | Úvod .....   | 5  |
| 2.    | Mapování prostorové variability půdy .....   | 7  |
| 2.1.  | Dostupné mapové podklady o půdních vlastnostech .....                              | 8  |
| 2.2.  | Nepřímé metody identifikace variability půdy .....                                 | 9  |
| 2.3.  | Stratifikace pozemků a optimalizace vzorkování půdy.....                           | 13 |
| 2.4.  | Tvorba celoplošných půdních map pomocí prostorových interpolací .....              | 16 |
| 3.    | Postupy tvorby aplikačních map zásobního hnojení .....                             | 18 |
| 3.1.  | Stanovení normativní dávky se zohledněním výnosových úrovní.....                   | 19 |
| 3.2.  | Korekce normativu dle zásobenosti půdy živinami .....                              | 23 |
| 3.3.  | Úprava dávky hnojení dle bilance živin .....                                       | 27 |
| 3.4.  | Příklad postupu zpracování aplikačních map zásobního hnojení v GIS prostředí ..... | 29 |
| 4.    | Případová studie - vyhodnocení navrhovaného postupu.....                           | 31 |
| III.  | Srovnání novosti postupů .....   | 37 |
| IV.   | Popis uplatnění certifikované metodiky .....                                       | 37 |
| V.    | Ekonomické aspekty .....   | 37 |
| VI.   | Seznam použité literatury .....  | 38 |
| VII.  | Seznam publikací, které předcházely metodice .....                                 | 42 |
| VIII. | Poznámky.....  | 43 |

## I. CÍL METODIKY

Cílem metodiky je návrh postupů tvorby aplikačních map pro variabilní aplikaci hnojiv v precizním zemědělství, které bude zohledňovat plošnou nevyrovnanost obhospodařovaných pozemků. Vychází z metod digitálního mapování půdy a optimalizace půdního vzorkování pro efektivní zachycení prostorových změn agrochemických vlastností půdy a následně tvorby celoplošných půdních map. Pozornost je také věnována způsobu stanovení dávky variabilní aplikace hnojiv pomocí geografických informačních systémů (GIS) s ohledem na stav zásobenosti půd přístupnými živinami a identifikaci rozdílných výnosových úrovní uvnitř každého pozemku. Součástí metodiky je také seznámení s výsledky porovnání navrhovaných postupů na vybraném zemědělském podniku a jejich vyhodnocení s ohledem na celkové množství aplikovaných hnojiv a přesnost rozložení dávek v rámci půdních bloků.

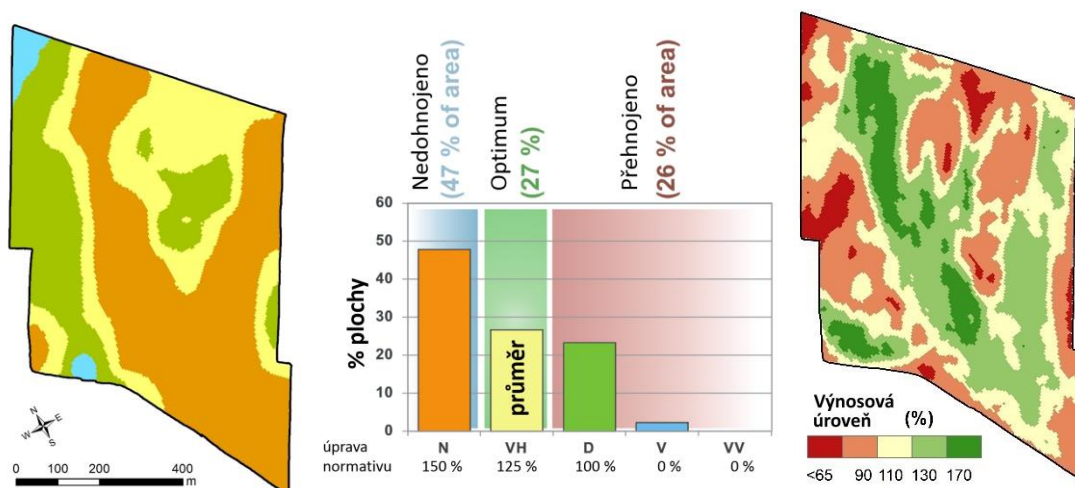
Předkládaná metodika je určena pro poradenské subjekty, společnosti zabývající se prodejem hnojiv a poskytováním služeb v oblasti hnojení, zemědělské podniky, výzkumné a vzdělávací instituce a širokou odbornou veřejnost. Vedle informací z odborné literatury byly při přípravě textu využity výsledky řešení výzkumného projektu NAZV QJ1610289 "Optimalizace využití produkčního potenciálu půdy lokálně cílenou agrotechnikou".

## II. VLASTNÍ METODIKA

### 1. Úvod

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. Tohoto cíle lze dosáhnout pouze v případě, že heterogenitu pozemků umíme efektivně stanovit. Mapování pozemků tak představuje obecně první a nezbytný krok při precizním zemědělství.

Postupy mapování pro účely variabilní aplikace hnojiv se liší dle prováděného zásahu. Může se jednat o zásobní hnojení, kde sledujeme obsah přístupných živin (P, K, Mg), vápnění půdy dle výměnné půdní reakce (pH) nebo přihnojování dusíkatými hnojivy během vegetace na základě hodnocení výživného stavu. Zásadním rozdílem je sběr potřebných informací o půdních vlastnostech nebo hodnocení stavu porostů. Podstatnou informací je také plošné členění dosahovaného výnosu z výnosových map, ideálně za víceleté časové období.



Obr. 1 Význam variabilní aplikace hnojiv na příkladu obsahu přístupného fosforu v půdě a porovnání s výnosovou úrovní v procentuální škále stanovenou z víceleté řady výnosových map na 52ha pozemku (Přísnovice, okr. Brno-venkov) (Lukas et al., 2017).

Nejen že plošná nevyrovnanost půdních vlastností výrazně ovlivňuje výnosy plodin, ale také nevyrovnanost výnosu se může podílet na změně obsahu živin v půdě, jak ilustruje Obr. 1. Na ploše s vyšším dosahovaným výnosem zrna byl zjištěn nižší obsah přístupného fosforu v půdě, který při uniformním hnojení dle průměrné zásobenosti na pozemku nelze postihnout. Při paušální dávce hnojení stanovené dle průměrného obsahu přístupného fosforu vykazuje necelá polovina pozemku s nízkou zásobeností (47 %) vyšší potřebu hnojení, čtvrtina výměry (23 %) odpovídá průměrné dávce pro celý pozemek a naopak zbyvající plocha (26 %) s dobrou zásobeností je přehnojena o 25 % normativní dávky (Lukas et al., 2017). Právě variabilní aplikace hnojiv může postihnout tyto rozdíly a cílit na vyrovnanou bilanci živin a dosažení dobré zásobenosti na celé ploše. Na první pohled se může zdát, že se jedná o ojedinělý případ, výsledky podrobněji prováděného vzorkování u zemědělských

podniků ale často potvrzují značnou nevyrovnanost pozemků. Ostatně v rámci agrochemického zkoušení zemědělských půd je u větších půdních bloků hodnocena nevyrovnanost jednotlivých agrochemických vlastností a tento údaj může pěstitelům sloužit jako prvotní informace o nezbytnosti podrobnějšího průzkumu.

Agrochemické vlastnosti půdy patří k významným faktorům ovlivňujícím výnosy plodin a kvalitu produkce, zejména zásoba přístupných živin (P, K, Mg) a výměnná půdní reakce (pH půdy). V zemědělské praxi ČR je zásoba přístupných živin a hodnota výměnné půdní reakce monitorována Agrochemickým zkoušením zemědělských půd (AZZP) v rámci činnosti Ústředního kontrolního a zkušebního ústavu zemědělského (ÚKZÚZ), který zabezpečuje odběr půdních vzorků, provádí laboratorní analýzy, zpracovává výsledky a předává je k využití MZe ČR a dalším subjektům. AZZP představuje pravidelné zjišťování vybraných parametrů půdní úrodnosti s cílem poskytnout podklady pro možné usměrnění používání hnojiv (Smatanová, 2018). Toto sledování probíhá periodicky již od roku 1961 (Klement et al., 2012), v současnosti je prováděno v šestiletých cyklech na základě zákona č. 156/1998 Sb. o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích, substrátech a agrochemickém zkoušení zemědělských půd (zákon o hnojivech) ve znění pozdějších předpisů a vyhlášky č. 275/1998 Sb. o agrochemickém zkoušení zemědělských půd a zjišťování půdních vlastností lesních pozemků ve znění pozdějších vyhlášek. Způsob odběru půdních vzorků uvádí v doporučených pracovních postupech Smatanová (2018), laboratorní postupy stanovení obsahu přístupných živin jsou popsány v Jednotných pracovních postupech vydávaných na ÚKZÚZ (Zbiral, 2016).

Z výsledků agrochemického zkoušení zemědělských půd za období 2012 – 2017 (Smatanová a Sušil, 2018) vyplývá, že v případě **půdní reakce** je průměrná hodnota pH zemědělské půdy v ČR 6,1, dále 30 % sledované zemědělské půdy má extrémní, silně kyselou a kyselou půdní reakci (pH do 5,5) a dalších 39,4 % má slabě kyselou půdní reakci (pH 5,6 až 6,5). Tzn. téměř 70 % výměry zemědělské půdy by bylo třeba pravidelně vápnit alespoň udržovací dávkou. Naopak 13,6 % výměry zemědělské půdy vykazovalo půdní reakci alkalickou (pH nad 7,2) bez potřeby vápnění. Z hodnocení obsahu **fosforu** v půdě vyplývá potřeba intenzivního hnojení na více než 25 % zemědělské půdy a mírné dosycení touto živinou na dalších 28 % výměry, tzn. polovina (53 %) výměry zemědělské půdy v ČR potřebuje hnojení fosforem. Vysoká zásoba bez potřeby hnojení byla zjištěna na 25 % zemědělské půdy. V případě obsahu přístupného **draslíku** je hnojení vyžadováno na 35 % zemědělské půdy ČR (7 % intenzivně, 28 % mírné dosycení). Hnojení není třeba provádět na 23 % výměry. Obsah **hořčíku** je nedostatečný na 14 % zemědělské půdy, naopak vysoký obsah na 21 % výměry.

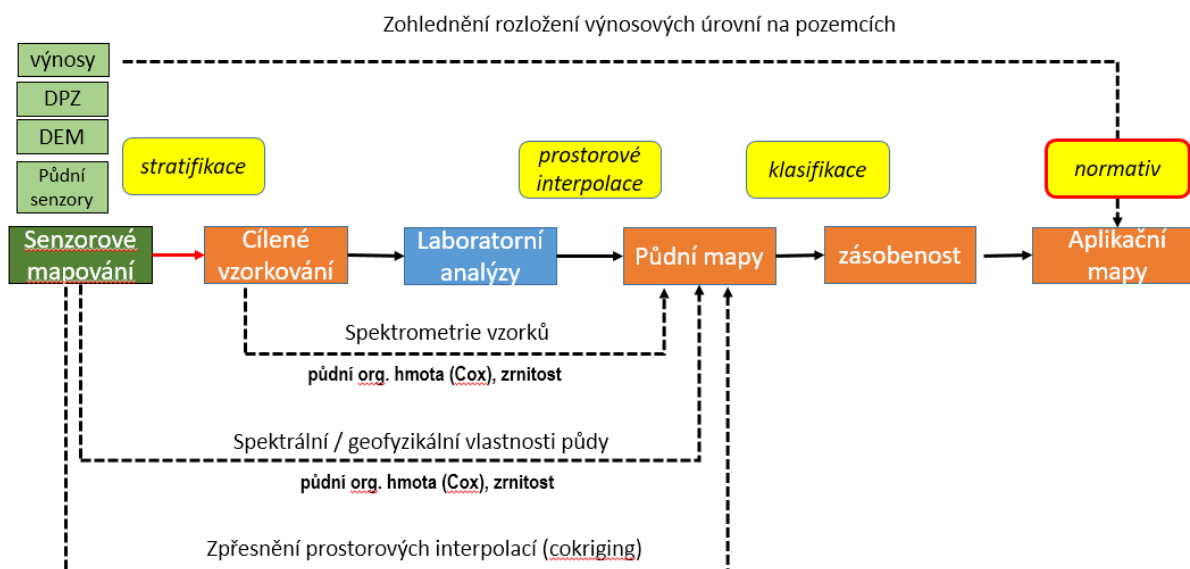
Z časového porovnání mezi posledními dvěma cykly AZZP (Smatanová et al., 2017) vyplývá negativní trend ve vývoji agrochemických vlastností orné půdy, ale již ne tak významný v porovnání s předchozím cyklem. V případě půdní reakce dochází k postupnému okyselování půdy – snížení pH u orné půdy o 0,1 a zvýšení výměry kyselé půdy o 1,5 %. Mezi dvěma posledními cykly nedošlo ke změně průměrného obsahu přístupného fosforu, výměra orné půdy s nízkým obsahem P se zvýšila o 2 %. U ostatních živin bylo zaznamenáno zvýšení obsahu (K – průměrné zvýšení obsahu o 13 mg.kg<sup>-1</sup> a snížení podílu orné půdy s nízkou zásobeností o 3 %, Mg – průměrné zvýšení obsahu o 5 mg.kg<sup>-1</sup>).



## 2. Mapování prostorové variability půdy

Zjištění variability je prvním a kritickým krokem v precizním zemědělství, neboť nelze obhospodařovat variabilitu, pokud ji neznáme (Pierce a Nowak, 1999). Prostorová variabilita pozemků představuje základní vstupní informaci pro diferencovanou aplikaci. Právě nevyrovnanost pozemků je základním předpokladem pro využití tohoto způsobu hospodaření, neboť bez ní má koncept precizního zemědělství jen pramalý význam. Jinými slovy pozemky, které se jeví jako relativně vyrovnané, není nutné obhospodařovat diferencovaně, lze použít tradiční celoplošně uniformní přístup.

Variabilita půdních podmínek je způsobena celou řadou faktorů, jejichž vliv se mění s ohledem na prostorové měřítko sledování. V regionálním měřítku převládá vliv klimatických faktorů, způsob využití půdy, vegetační pokryv a charakteristiky povrchu krajiny. Na úrovni pole jsou hlavními faktory ovlivňujícími variabilitu půdní typ, reliéf terénu, předplodina a předchozí způsob hospodaření. Ve větším měřítku pak mohou mít vliv směr řádků porostu, způsob aplikace živin, technologie zpracování půdy a stupeň utužení půdy. Další faktory, jako je voda a člověk, mohou způsobit příznivé i nežádoucí změny v půdě a podílet se na zvýšení půdní proměnlivosti (Borůvka, 2001). Brodský et al. (2001) zmiňují vliv historického scelování pozemků s rozdílným způsobem hospodaření na půdní variabilitu.



Obr. 2 Schéma navrhovaného postupu mapování nevyrovnanosti půdních podmínek v precizním zemědělství s využitím metod digitálního mapování půdy

V rámci řešení výzkumného projektu Ministerstva zemědělství NAZV QJ1610289 „Optimalizace využití produkčního potenciálu půdy lokálně cílenou agrotechnikou“ byl navržen postup mapování plošné variability půdních podmínek v rámci jednotlivých pozemků a tvorba aplikačních map pro variabilní provádění zásobního hnojení. Schématická podoba jednotlivých kroků je znázorněna na Obr. 2. Uvedený postup mapování půdních podmínek lze zjednodušeně rozdělit do následujících kroků:

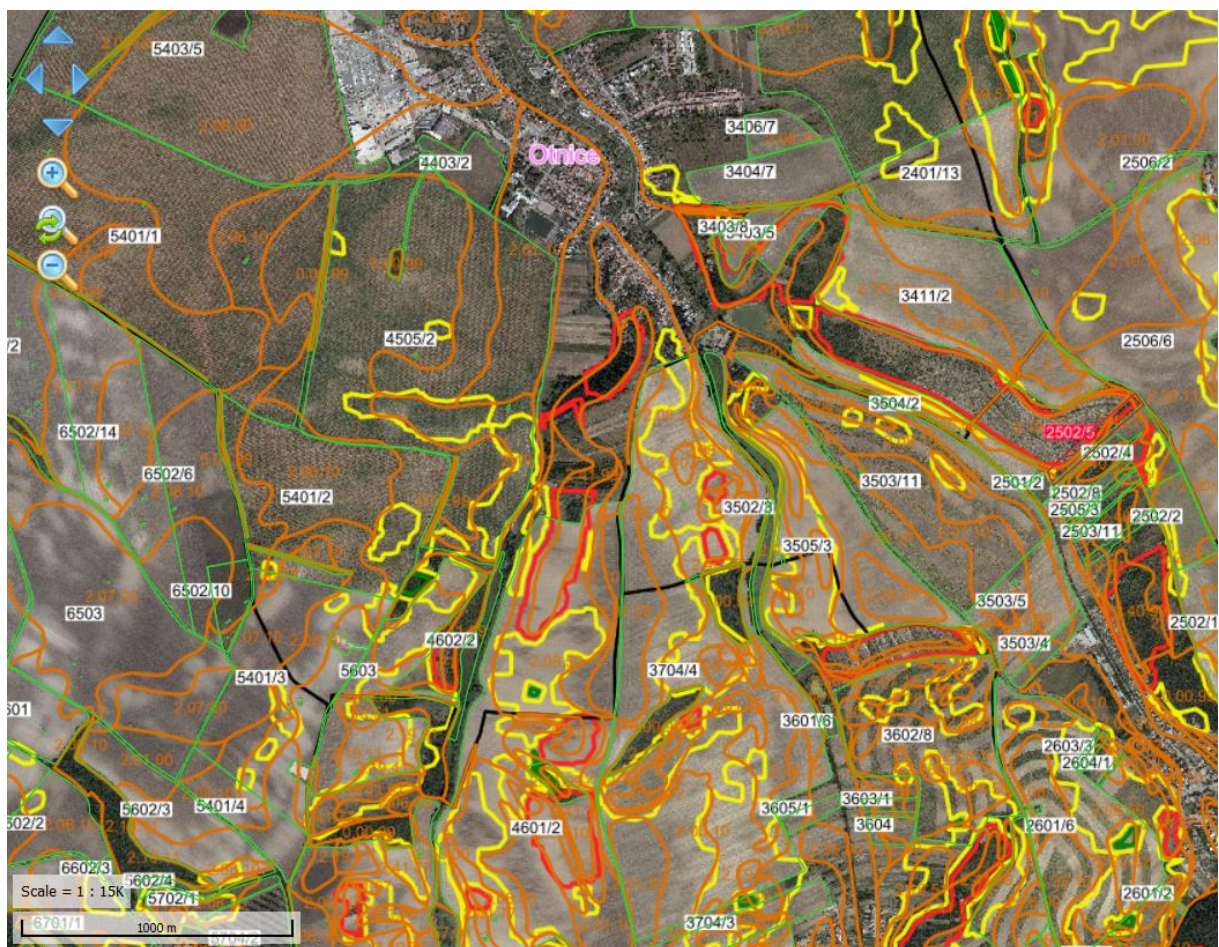
1. **Senzorové mapování** plošné nevyrovnanosti pozemků s využitím nepřímých metod pozemního geofyzikálního měření a dálkového průzkumu.
2. **Stratifikace pozemků** na základě sensorového mapování a návrh optimalizované sítě **pro odběr půdních vzorků**.
3. **Výpočet celoplošných půdních map** z výsledků laboratorních analýz metodami prostorových interpolací doplněných o data sensorového měření půdy.

Výsledné půdní mapy dále vstupují do procesu korekce dávky hnojení, tento postup je popsán v kapitole 3.

## 2.1. Dostupné mapové podklady o půdních vlastnostech

Jedním ze základních zdrojů informací o prostorové variabilitě půdy a jejích vlastnostech jsou půdní mapy. Využitelnost těchto map je dána jejich aktuálností, dostupností v digitální podobě pro implementaci do geografických informačních systémů (GIS) a měřítkem, které představuje detailnost zachycení prostorových jevů.

Základní mapové podklady o půdních vlastnostech vycházejí z „Komplexního průzkumu půd ČSSR“, který probíhal v letech 1961 – 1971. Výstupem byly mapové materiály v měřítku 1:10000 a průvodní zprávy o půdních podmínkách a zúrodňovacích opatřeních na úrovni tehdejších zemědělských podniků. Tyto materiály se po doplnění terénním průzkumem staly základem pro vytvoření map bonitace zemědělského půdního fondu na základě BPEJ jednotek. V digitální podobě nabízí tyto mapy Státní pozemkový úřad volně ke stažení ve formátu *shapefile* (<https://www.spucr.cz/bpej/celostatni-databaze-bpej>) nebo jsou zpřístupněny jako podkladová vrstva v Registru půdy (LPIS). Významnou podkladovou vrstvou v oblasti hospodaření na orné půdě je vymezení erozně ohrožených oblastí (MEO, SEO, NEO) na svažitých pozemcích, také dostupnou v rámci LPIS (Obr. 3). Další pedologické mapy pak poskytuje veřejnosti Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.,



Obr. 3 Okno mapové aplikace Veřejný registr půdy LPIS se zobrazenými vrstvami BPEJ a erozně ohroženosti půdy

Kromě mapových podkladů o půdních vlastnostech mohou být pro popis a identifikaci příčiny heterogenity pozemků využity informace o jejich užívání. Zdrojem informací o vlastnicích půdy je katastr nemovitostí (KN), vedený Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK); údaje o užívání pozemku eviduje Registr půdy (LPIS) spravovaný Ministerstvem zemědělství. Oba mapové podklady jsou snadno dostupné přes Veřejný export dat LPIS (<http://eagri.cz/public/app/eagriapp/lpisdata/>), Veřejný registr půdy (<http://eagri.cz/public/app/lpisext/lpis/verejny2/plpis/>) či formou WMS služeb.

Dalším významným informačním zdrojem pro hodnocení nevyrovnanosti půdy jsou podklady pro analýzu reliéfu terénu. Digitální model reliéfu České republiky 4. generace (DMR 4G) a 5. generace (DMR 5G) představují zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě výšek diskrétních bodů v pravidelné síti (5 x 5 m) bodů (DMR 4G) a v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) bodů (DMR 5G). Model vznikl z dat pořízených metodou leteckého laserového skenování výškopisu území České republiky v letech 2009 až 2013. Data poskytuje ČÚZK.

Oblast pedologie, která se zabývá tvorbou geograficky vztažených informací o půdě s využitím polních a laboratorních měření, se nazývá **digitální mapování půdy** - *Digital Soil Mapping*, (Lagacherie et al., 2007)). Kromě informací o půdních charakteristikách získávaných tradičním půdním průzkumem začleňuje také údaje o reliéfu terénu a data nepřímého měření fyzikálních veličin. Digitální mapování je charakterizováno jako prediktivní, neboť využívá metod pro odhad hodnot půdních vlastností na místech, kde nejsou tyto charakteristiky známy (Borůvka, 2009). Nezbytnou součástí je tvorba a kalibrace predikčních modelů kombinací výsledků laboratorních rozborů půdy a již zmiňovaných nepřímých (senzorových) dat.

## 2.2. Nepřímé metody identifikace variability půdy

Nepřímé metody pracují na principu sensorového měření. Čidla identifikují změnu sledované půdní vlastnosti nebo vlastnosti, která je s ní úzce vázána a kterou je možné převést do elektronického záznamu. Sensorová technika má fixní náklady, může měřit ve velkém prostorovém i časovém měřítku a umožňuje opakované měření přímo v terénu. Nevýhodou nepřímých metod je vždy nižší přesnost stanovení sledovaného jevu v porovnání s přesnými laboratorními rozborů. Tato nižší přesnost je ale vyvážena intenzivním prostorovým pokrytím (Christy, 2008). Dle způsobu provádění měření lze sensorové mapování půdních podmínek rozdělit na metody **pozemního průzkumu** (*proximal sensing*), využívající postupy průběžného (*on-the-go*) záznamu měření, a **dálkového průzkumu** (*remote sensing*) distančním měřením v podobě družicového a leteckého snímkování.

### Senzorové *on-the-go* mapování půdních podmínek

Senzory pro měření půdních podmínek pracují na nejrůznějším principu, v současnosti lze ale za nejvíce rozšířené v praxi považovat elektrické, elektromagnetické a mechanické. Přístroje umožňující zjišťování informací o půdních vlastnostech během jízdy jsou označovány jako *on-the-go*.

Tab. 1 Úroveň detekce vybraných půdních vlastností pomocí on-the-go senzorů (Adamchuk et al., 2008, upraveno)

| Půdní vlastnost                             | Elektrické a elektromag. | Optické a radiometrické | Mechanické | Akustické | Elektro-chemické |
|---|--------------------------|-------------------------|------------|-----------|------------------|
| Půdní zrnitost (podíl jílu, prachu a písku) | dobrá                    | vyhovující              |            | slabá     |                  |
| Obsah půdní org. hmoty nebo C <sub>ox</sub> | slabá                    | dobrá                   |            |           |                  |
| Půdní voda (vlhkost)                        | dobrá                    | dobrá                   |            |           |                  |
| Zasolení půdy                               | vyhovující               |                         |            |           | Slabá            |
| Utužení půdy (obj. hmotn.)                  |                          |                         | dobrá      | slabá     |                  |
| Hloubková variabilita - rozlišení vrstev    | slabá                    |                         | vyhovující | slabá     |                  |
| pH půdy                                     |                          | slabá                   |            |           | Dobrá            |
| Obsah nitrátů v půdě                        | slabá                    | slabá                   |            |           | Vyhovující       |
| Obsah ostatních živin (P)                   |                          | slabá                   |            |           | Vyhovující       |
| KVK   | vyhovující               | vyhovující              |            |           |                  |

On-the-go systémy zjišťování plošné variability půdních podmínek lze podle principu měření rozčlenit do následujících skupin (Adamchuk et al., 2004):

- elektrické a elektromagnetické senzory měřící elektrickou rezistivitu, konduktivitu, kapacitu nebo indukanci ovlivněnou složením půdy
- optické a radiometrické senzory využívající elektromagnetického záření pro detekci energie absorbované/reflektované půdními částicemi
- mechanické senzory měřící odporovou sílu při pronikání půdou
- akustické senzory kvantifikující zvuk produkovaný nářadím v interakci s půdou
- pneumatické senzory zjišťující schopnost injektovat vzduch do půdy
- elektrochemické senzory využívající iontově selektivních membrán pro stanovení aktivity vybraných iontů (H<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, atd.)

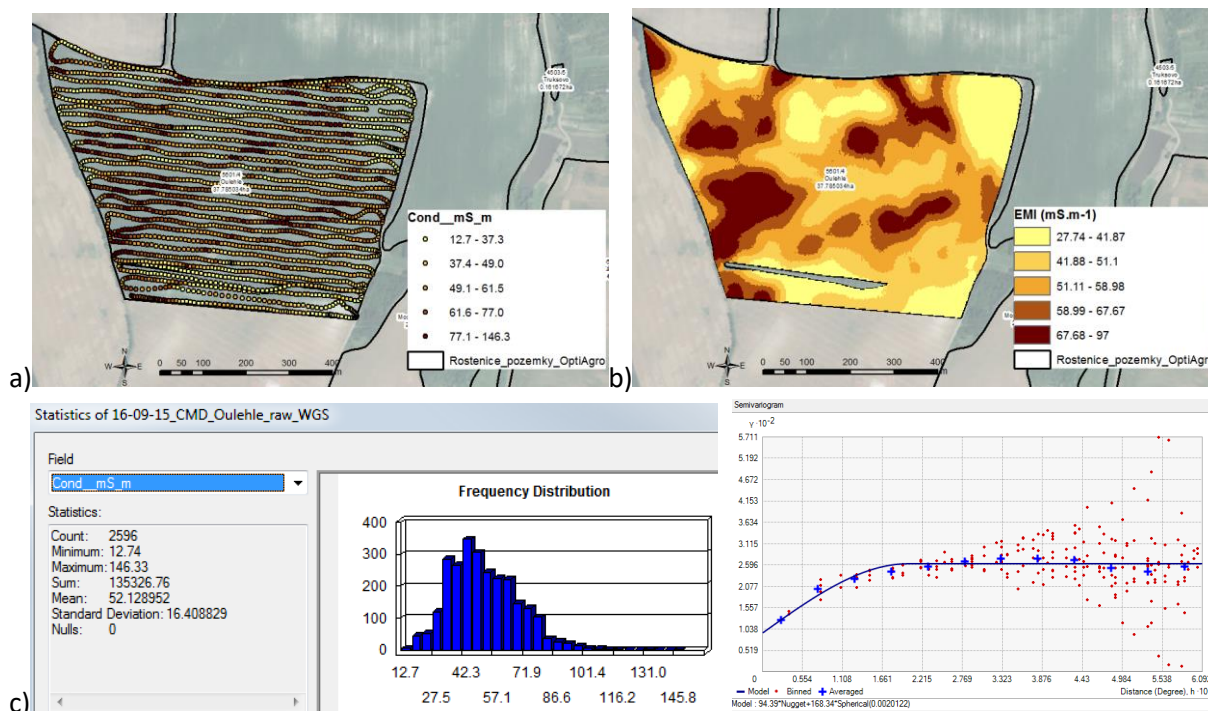
### Měření elektrické vodivosti půdy

Elektromagnetické metody umožňují rychlé a relativně přesné stanovení rozdílů v půdním substrátu dle jeho vodivosti. Využívají geofyzikálních vlastností půdy, kdy změna půdního prostředí ovlivňuje procházející elektromagnetické pole. Vlastní měření je bezkontaktní, půdou prochází pouze elektromagnetické pole (Obr. 4 a Obr. 5). Výhodou je tedy provádění měření na kamenitých půdách nebo během vegetace.



Obr. 4 Příklad měření elektromagnetické indukce půdy – měřicí souprava GF Instruments CMD–MiniExplorer 6L a pohled do kabiny

Elektrická vodivost půdy je ovlivňována působením mnoha půdních faktorů. Mezi nejvýznamnější patří vlhkost půdy, zrnitost půdy a zasolení půdy, dále to může být také objemová hmotnost, obsah organické hmoty, kationtová výměnná kapacita a další. Dle Schmidhaltera et al. (2002) jsou nižší hodnoty elektrické vodivosti ( $5 - 15 \text{ mS.m}^{-1}$ ) typické pro písčité půdy, zatímco vyšší hodnoty ( $30 - 60 \text{ mS.m}^{-1}$ ) reprezentují jílovité půdy. Mezi nimi leží hlinité půdy. Velmi vysoké hodnoty (nad  $60 \text{ mS.m}^{-1}$ ) poukazují převážně na vliv vyššího obsahu vody, často v kombinaci s vyšším obsahem jílu a organické hmoty, či dodatečný vliv zvýšeného zastoupení solí v půdním roztoku.



Obr. 5 Příklad bodových záznamů na 37,8 ha pozemku Oulehle (a), které byly následně prostorovými interpolacemi zpracovány do podoby celoplošné mapy (b). Grafy (c) ukazují histogram rozložení hodnot se základními statistickými údaji a semivariogram

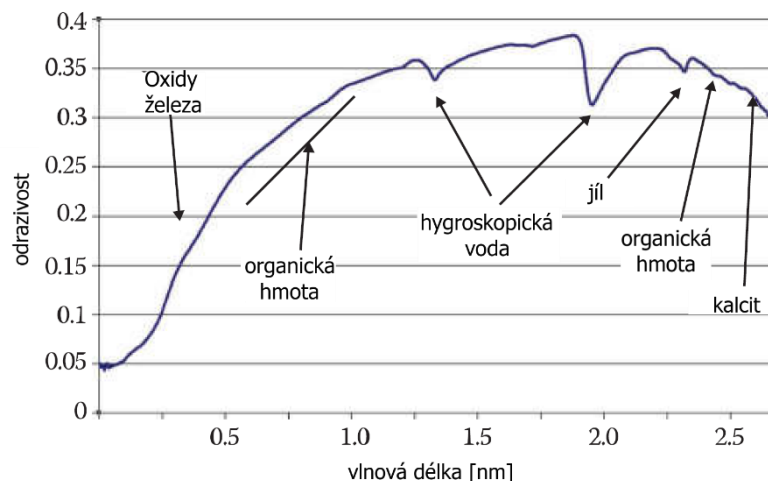
V řadě případů také naměřené hodnoty EC vykazují vztah s agrochemickými vlastnostmi půdy. Spíše ale než o přímý vliv obsahu živin v půdě na elektrickou vodivost půdy se jedná o sekundární vazbu agrochemických vlastností na základní půdní charakteristiky ovlivňující EC půdy (Lukas et al., 2009).

Naopak nenalezení vazby EC s obsahem živin nemusí nutně znamenat nepoužitelnost EC při mapování živinného stavu půdy. Měření EC může být využito pro mapování půdních vlastností, které představují klíčové faktory ovlivňující změny v koncentraci živin, a tímto způsobem na pozemku definovat oblasti s obdobnou půdní zásobeností (Heiniger et al., 2003; Lukas et al., 2018b).

Elektrická vodivost půdy je z krátkodobého hlediska relativně neměnná - vymezení identifikovaných oblastí je přibližně stejné, mění se pouze absolutní hodnoty naměřené vodivosti v závislosti na ročním období, resp. vlhkosti půdy. Ačkoli lze v některých případech vytvořit robustní regresní model stanovení půdních vlastností z výsledků měření elektrické vodivosti půdy, jak např. ukazují Heil a Schmidhalter (2012) pro predikci zrnitosti půdy v kombinaci s reliéfem terénu, většina studií předpokládá využití prostorového mapování EC půdy v precizním zemědělství pro vymezení tzv. management zón a cílené vzorkování půdy (Corwin a Plant, 2005). Cílené vzorkování založené na mapování EC půdy vede k redukci počtu odběrových míst v porovnání se vzorkováním v pravidelné síti (Lesch, 2005). Současně mohou být výsledky měření EC půdy využity jako pomocná data pro zvýšení přesnosti interpolovaných půdních map (Kerry a Oliver, 2003).

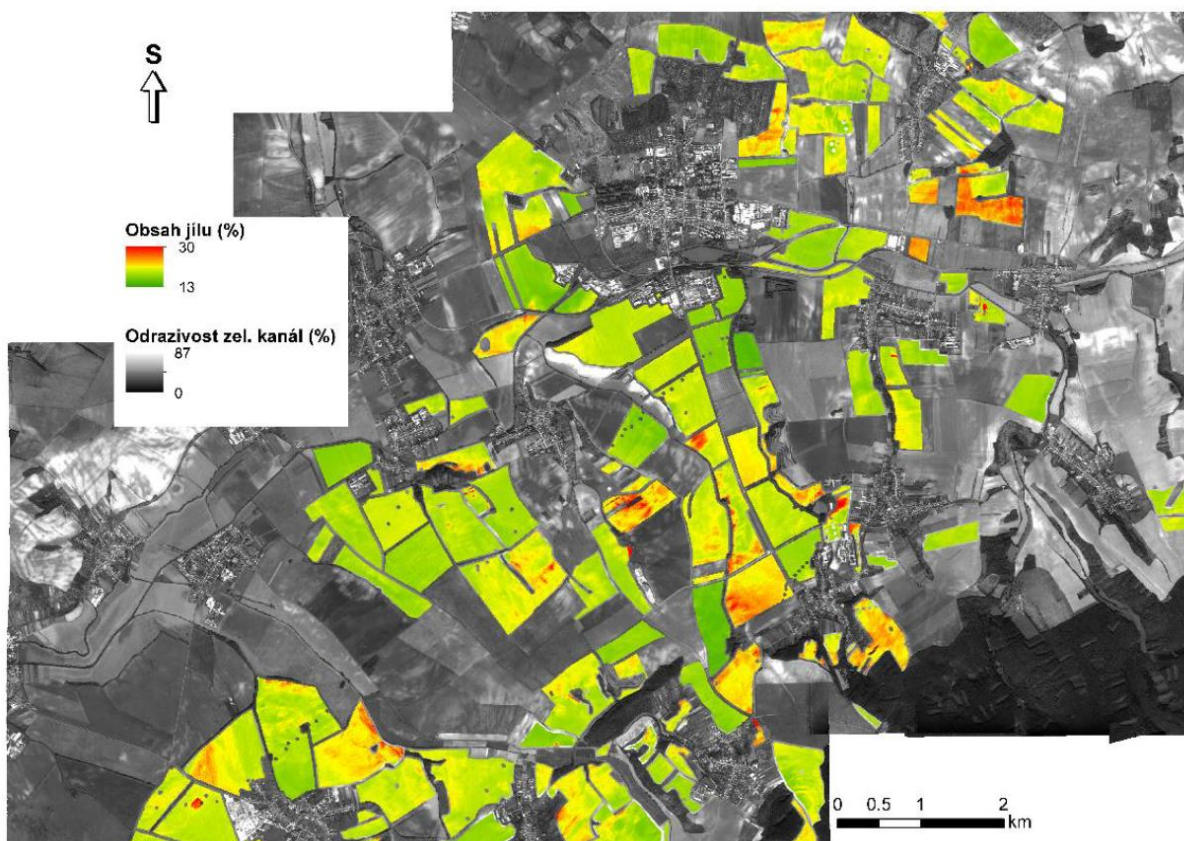
### Dálkový průzkum pro identifikaci plošné variability půdních podmínek

Dálkový průzkum představuje soubor metod získávání informací o objektech prostřednictvím zařízení, které se sledovaným objektem nejsou v kontaktu (Lillesand a Kiefer, 1994). V zemědělství jsou metody dálkového snímání využívány více jak 40 let, v porovnání s ostatními agronomickými oblastmi se ale jedná o relativně nové postupy (Hatfield et al., 2008). Dle Ben-Dor et al. (2009) je dálkový průzkum významnou součástí půdního průzkumu a např. letecké snímání je jedním ze základních nástrojů, které jsou používány při mapování půdy. Vysoký potenciál dálkového průzkumu v precizním zemědělství spočívá dle Pierce et al. (1999) v možnosti monitorování prostorové variability v průběhu času s vysokým rozlišením. Neposkytuje ale informace o příčině sledované variability. Pro zemědělské aplikace je kromě viditelného a blízkého infračerveného spektra (NIR) využíváno také krátkovlnného infračerveného (SWIR) a tepelného záření a oblasti mikrovln.



Obr. 6 Spektrální křivka odrazivosti půdy a specifické vlivy půdních vlastností (Ben-Dor a Demattê, 2015)

**Spektrální projevy půdy** ovlivňuje řada půdních vlastností (Obr. 6), přičemž mezi nejvýznamnější jsou zařazovány obsah organické hmoty, vlhkost půdy, zrnitost a struktura půdy, zastoupení oxidů železa (Lilienthal, 2003), případně hrubost povrchu (Lillesand et al., 2008) a druh jílových minerálů. Podrobný popis působení těchto faktorů podávají např. Baumgardner et al. (1985), Lilienthal (2003), Meer a Jong (2006) nebo Ben-Dor et al. (2009).



Obr. 7 Mapa rozložení obsahu jílu (%) v části území obhospodařovaném podnikem Rostěnice a. s. získaná z leteckých hyperspektrálních dat (Zemek et al., 2018).

Vztah mezi vybranými půdními vlastnostmi a spektrálními projevy půdy hodnocené pomocí DPZ sledovali (Žížala et al., 2016). Výsledky regresních modelů poukázaly na možnost predikce frakcí zrnitosti půdy, obsahu organické hmoty a zastoupení železitých iontů z hyperspektrálních leteckých snímků. Podobně (Zemek et al., 2018) poukazují na možnost vymezení kategorií obsahu jílu v půdách na základě spektrometrie půdních vzorků či dálkového průzkumu holé půdy (Obr. 7). V obou případech je hlavní předností metod DPZ pro hodnocení nevyrovnanosti půdních podmínek pokrytí rozsáhlého území a dostupnost obrazových dat, obzvláště v případě použití družicových snímků.

### 2.3. Stratifikace pozemků a optimalizace vzorkování půdy

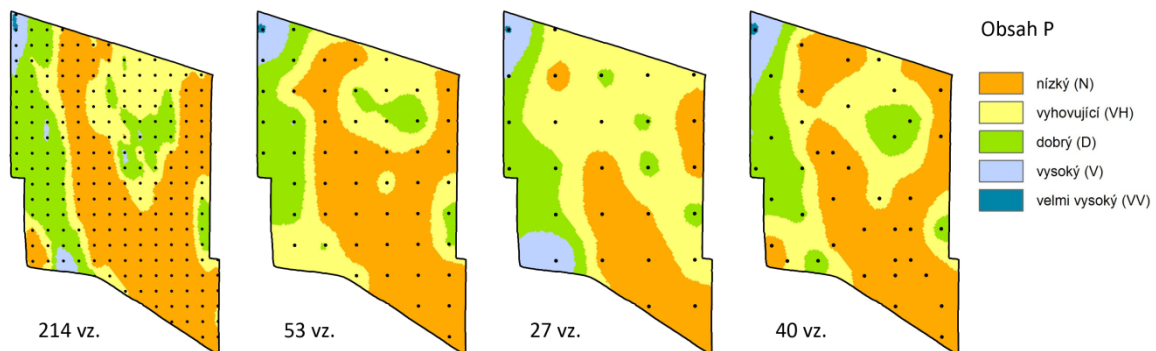
Tradičním způsobem získávání informací o půdních vlastnostech je vzorkování půdy a následné laboratorní analýzy půdních vzorků. Představuje výběr podmnožiny (vzorku) jedinců z celkové populace, které budou měřeny. Měření prováděné na tomto vzorku je následně podkladem pro stanovení vlastností nebo parametrů celkové populace. Vzorkování je základní podstatou jakéhokoliv terénního výzkumu v půdních vědách, neboť měření celé populace je v praxi nemožné. Pro zachycení prostorové variability je rozhodujícím parametrem hustota vzorkování a rozmístění odběrových bodů po pozemku. Dle van Groenigen et al. (1999) je z praktického hlediska vzorkovací schéma faktorem ovlivňujícím nejvíce efektivnost a nákladnost půdního vzorkování. Vzorkování s nižší hustotou je méně nákladné, ale může postrádat významné prostorové jevy. Vyšší počet odběrů umožňuje provést detailnější mapování, ale samozřejmě s vyššími náklady. Vzorkování o nižší počtu vzorků je méně nákladné, nemusí však zachytit některé lokální rozdíly (Obr. 8). Hustota vzorkování je odvislá od úrovně

variability pozemku, ale zpravidla se v precizním zemědělství pohybuje v rozmezí jeden vzorek na 1-5 ha. Dinkins a Jones (2008) poukazují na to, že vzhledem k rozdílům mezi pozemky v kombinaci s rozdíly ve způsobu hospodaření neexistuje optimální strategie půdního vzorkování pro všechny produkční systémy. Některé půdní vlastnosti vykazují vyšší prostorovou variabilitu než ostatní. Z praktických důvodů se ale používá pouze jedno schéma půdního vzorkování pro všechny zkoumané vlastnosti. Pokud ale jeden ze sledovaných faktorů je výnos limitujícím prvkem, půdní vzorkování by mělo být cíleno na zachycení prostorové variability právě tohoto faktoru.

Tab. 2 Kritéria pro hodnocení variability pozemku dle variačního koeficientu sledovaných půdních charakteristik (Beránek a Klement, 2007)

| Výměra<br>Pozemku<br>(ha) | variační koeficient (%) - pozemek |              |             |              |                   |              |
|---------------------------|-----------------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------------|--------------|
|                           | vyrovnaný                         |              | nevyrovnaný |              | silně nevyrovnaný |              |
|                           | pH                                | P, K, Mg, Ca | pH          | P, K, Mg, Ca | pH                | P, K, Mg, Ca |
| do 20,0                   | do 5                              | do 20        | 6-12        | 21-50        | nad 12            | nad 50       |
| 20,1-30,0                 | do 6                              | do 25        | 7-15        | 26-60        | nad 15            | nad 60       |
| nad 30,0                  | do 7                              | do 30        | 8-20        | 31-65        | nad 20            | nad 65       |

V rámci AZZP se průměrná plocha na jeden půdní vzorek pro ornou půdu odvíjí od výrobní oblasti – v bramborářské a horské výrobní oblasti činí 7 ha, v řepařské a kukuřičné 10 ha, při hloubce vpichu odpovídající mocnosti orničního profilu (max. 30 cm) (Smatanová, 2018). Pokud je na větších půdních blocích odebráno více vzorků, je provedeno hodnocení plošné nevyrovnanosti agrochemických vlastností výpočtem variačního koeficientu pro hodnoty pH a obsah přístupných živin (P, K, Mg). Výsledky slouží jako základní podklad pro případné diferencování dávek jednotlivých živin při hnojení na pozemcích resp. jejich částech. Kritéria hodnocení variačního koeficientu pro jednotlivé půdní parametry uvádí Tab. 2.



Obr. 8 Vliv hustoty vzorkování (počtu vzorků) na zásobenost půdy P na pozemku o výměře 52 ha (Lukas et al., 2011).

Podobně jako hustota má význam také rozmístění odběrových bodů v rámci pozemku, tzv. schéma vzorkování (*sampling design*). To představuje výběr nejefektivnější metody odběru vzorků a z praktického hlediska je faktorem ovlivňujícím nejvíce efektivnost a nákladnost půdního vzorkování. V řadě odborných prací jsou schémata vzorkování pro mapování plošné variability půdy z praktického hlediska rozdělena na **náhodné vzorkování** (*random sampling*), **vzorkování v pravidelné síti** - gridu (*grid sampling*) a **zónové vzorkování** (*zone sampling*), které je také často označováno jako cílené vzorkování (*directed* nebo *targeted sampling*). Podrobnější členění a výčet schémat vzorkování půdy popisují v certifikované metodice Minařík et al. (2018).

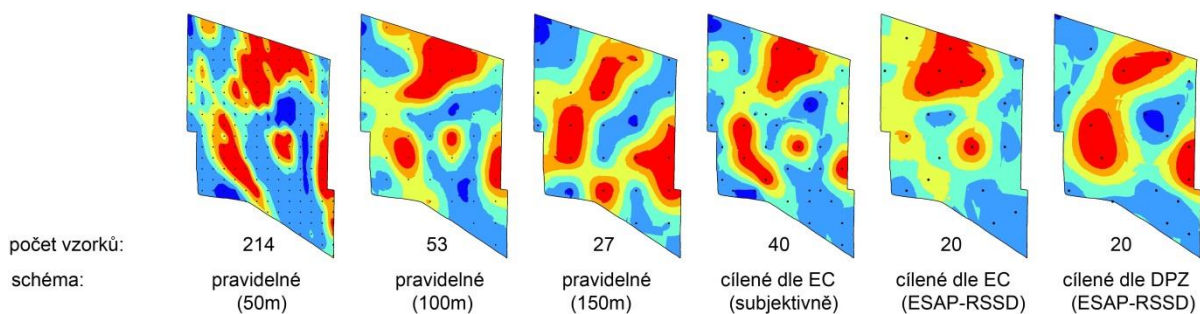


**Náhodné vzorkování** může být použito pro mapování vyrovnaných pozemků s cílem zjistit průměrnou hodnotu pro celou plochu (Dinkins a Jones, 2008).

Vzorkování v **pravidelné síti** je vhodné zvláště tam, kde není žádná, nebo jen malá předběžná znalost variability v rámci pozemku. Důležitým faktorem je hustota vzorkování daná vzdáleností jednotlivých bodů vzorkování. Nevýhodou tohoto způsobu vzorkování jsou náklady s ním spojené, které jsou vysoké i při nízkém počtu odběrů.

Naopak **zónové** nebo **cílené** vzorkování vychází ze znalosti prostorové variability pozemku. Principem je optimalizace návrhu odběrového schémata podle předběžně analyzované prostorové variability pozemku nepřímými metodami. Předpokládá se, že pozemek lze dle snadno měřitelných pomocných atributů, reflektujících rozdíly v půdních vlastnostech, rozdělit na homogenní oblasti, nazývané zónami. Půdním vzorkováním je pak stanovena průměrná hodnota půdních vlastností uvnitř zóny, což vede ke snížení celkového počtu odběrů – v homogenních oblastech je počet vzorků nižší než v oblastech s vyšší variabilitou (Shaner et al., 2008). Na rozdíl od vzorkování v síti, počet zón a jejich tvar a velikost závisí na stupni variability pozemku.

Zónové vzorkování redukuje počet vzorků v porovnání s pravidelným nebo náhodným vzorkováním a umožňuje variabilní aplikaci hnojiv. Postup zónového vzorkování obecně vede k nižšímu počtu vzorků oproti pravidelné síti, ale vyžaduje více času pro jeho naplánování. Nejlepší strategií je nejprve stanovit úroveň variability na pozemku a v případě že je nízká, použít vzorkování v pravidelné síti, při vysoké variabilitě použít zónové vzorkování (Dinkins a Jones, 2008).



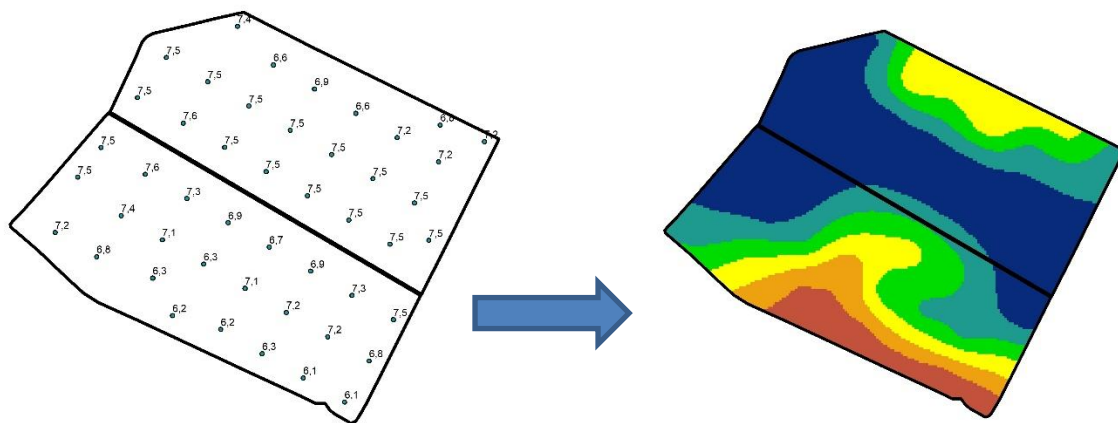
Obr. 9 Porovnání rozdílné hustoty a schéma vzorkování pH půdy na 52ha pozemku (EC – elektrická vodivost půdy; DPZ – dálkový průzkum Země) (Neudert et al., 2015)

Příkladem cíleného vzorkování může být umístění bodů odběru na základě leteckého nebo družicového snímku dané lokality, výsledků měření elektrické vodivosti půdy (EC), znalosti topografie pozemku nebo dle výnosových map (pokud očekáváme, že variabilita výnosu odpovídá variabilitě půdních podmínek). Lze tak vhodně kombinovat výhody obou způsobů mapování (půdního vzorkování, sensorové měření) a dosáhnout tak snížení počtu vzorků při zachování výsledné přesnosti půdních map. V rámci výzkumu prováděného na Ústavu agrosystémů a bioklimatologie Mendelovy univerzity v Brně (Lukas a Neudert, 2010) bylo porovnáváno pravidelné a cílené vzorkování (Obr. 9). Rozmístění odběrových bodů na základě leteckých snímků nebo výsledků měření elektrické vodivosti půdy bylo dosaženo až 48% redukce půdních vzorků v porovnání s pravidelnou sítí při použití speciálního algoritmu a 25% redukce u subjektivní optimalizace. Pro optimalizaci byla použita metoda ESAP-RSSD (Lesch, 2005), která umožňuje rozmístit 6, 12 nebo 20 vzorků na ploše pozemku dle sensoricky měřených dat. Principem optimalizace je výběr vzorků, které pokrývají celé rozpětí sensoricky měřených hodnot (EC, dálkový průzkum, výnosová data) a fyzicky jsou od sebe co nejvíce vzdáleny (Minasny et al., 2007).

Minařík et al. (2018) navrhli postup optimalizace odběrové sítě půdního vzorkování v open source prostředí R s využitím volně dostupných družicových snímků a digitálního modelu reliéfu DMR4G®. Optimalizační algoritmus byl schopen redukovat počet bodů o 50 % při zajištění dostatečně přesného popisu plošné variability zájmového území včetně extrémů, zatímco náhodný výběr stejného počtu bodů vedl ke značnému vychýlení průměru sledovaných půdních vlastností.

## 2.4. Tvorba celoplošných půdních map pomocí prostorových interpolací

Prostorové interpolace představují metody odhadu hodnot sledovaného znaku mezi místy pozorování, tzn. na místech, která nejsou vzorkováním pokryta. Jejich použití je nutné zejména při diskrétním mapování, např. bodovém půdním vzorkování. Výsledkem prostorových interpolací z dat půdního vzorkování jsou spojité půdní mapy, jejichž podoba může být značně ovlivněna volbou interpolačního postupu (Obr. 10). Kromě interpolační metody závisí přesnost prostorových map půdních vlastností na faktorech, jako je hustota vzorkování a konfigurace směsných vzorků (Gotway et al., 1996).



Obr. 10 Příklad tvorby celoplošných map z bodových výsledků pomocí prostorových interpolací

Nejběžněji používanými interpolačními metodami pro tvorbu spojitéch prostorových map je *kriging* a metoda *inverzního vážení vzdálenosti (inverse distance weighting - IDW)*. U obou metod jsou hodnoty nevzorkovaných míst počítány váženým průměrem z hodnot okolních měřených bodů, liší se ale ve způsobu výpočtu vah.

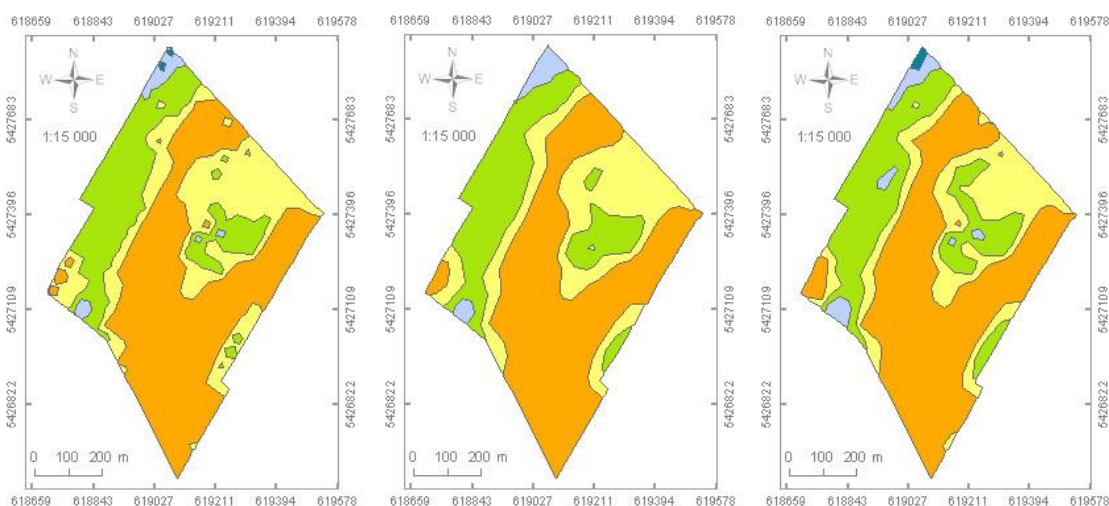
**Ordinary Kriging (OK)** - Metoda je založena na výpočtu lokálně vážených průměrů pohyblivého okna z měřených hodnot. Váhy pro predikci hodnot jsou určeny dle variogramu, který popisuje změnu prostorové závislosti se vzdáleností a směrem, tak aby se minimalizovala chyba odhadu. Prvním krokem je zkoumání dat pro identifikaci prostorové struktury, což je reprezentováno empirickým variogramem. Matematická funkce, kterou je experimentální variogram proložen, pak určuje váhu hodnot predikovaných na nevzorkovaných místech. Výpočet a modelování činí tuto metodu výpočetně náročnější. Výhodou krigingu je možnost určení odhadu rozptylu predikované hodnoty – tedy stanovení chyby odhadu. Možnost odhadnout výsledný rozptyl krigingových odhadů bez předchozí znalosti skutečných hodnot lze využít pro návrh optimální hustoty vzorkovací sítě na základě zvolené míry nepřesnosti. Charakteristickým rysem krigingu je vyhlazování lokálních extrémů nadhodnocením nízkých hodnot a podhodnocením vysokých.

**Cokriging (CoK)** - Vzájemný kriging (cokriging) využívá k odhadu hodnoty jedné proměnné v určitém bodě druhou proměnnou, která má podobné rozložení. Existuje tedy prostorová proměnná  $Z_1$ , která je autokorelována a další prostorové proměnné  $Z_n$ , které mají rovněž své prostorové vyjádření. Tento stav je nepochybně blíže k realitě, protože většina jevů neexistuje sama o sobě, ale ve vazbě na jiné jevy. Tato metoda je výhodná, když mapování půdní vlastnosti (primární proměnné) je prováděno s nižší hustotou měření, zatímco druhá proměnná je měřena s vyšší hustotou, neboť je její měření méně nákladné. Při cokrigingu je predikce primární proměnné stanovena na základě její prostorové variability a na společné prostorové variabilitě primární a sekundární proměnné. Sekundární proměnnou mohou být výsledky sensorového mapování, u kterých předpokládáme korelaci s půdními vlastnostmi. Tímto postupem lze dosáhnout vyšší přesnosti výsledných půdních map.

**Empirical Bayesian Kriging (EBK)** – metoda krigingu, která na základě iteračního výpočtu vybírá vhodné parametry variogramu pro optimální vyjádření modelového průběhu variogramu ((Krivoruchko, 2012)). Výhodou této metody je možnost automatizace zpracování dat, neboť pro každý dataset je doporučené vhodné nastavení variogramu.

**Inverse distance weighting (IDW)** – U této metody jsou data vážena dle vzdálenosti bodu od ostatních sousedících bodů. Způsob výpočtu vah každého bodu je inverzně proporcionální k vzdálenosti od bodu odhadu. Čím blíže jsou měřené body k interpolovaným bodům, tím vyšší je váha jejich hodnot. S rostoucí vzdáleností klesá síla váhy a interpolovaná hodnota se přibližuje hodnotám ostatních bodů. IDW patří mezi přesné interpolátory a je metodou výpočetně nenáročnou, kterou lze použít i na rozsáhlé datové soubory, protože na rozdíl od krigingu není nutné vypočítat a modelovat variogram. Také se jedná o metodu snadno parametrizovatelnou, neboť jediným parametrem nutným pro výpočet je hodnota  $p$  (power). Tento parametr určuje, jak rychle se hodnoty vah snižují k nule se zvyšující se vzdáleností od bodu odhadu.

V porovnání s krigingem vykazuje IDW lepší predikce v případech, kdy je lokální variabilita příliš vysoká a kde použití variogramu nedokáže dobře vystihnout prostorové struktury. Častým jevem při použití této metody je výskyt tzv. očí (*bull eyes*) ve výsledných mapách, což jsou okrouhlé a lokálně velmi ohraničené struktury (Gotway et al., 1996) (Obr. 11).



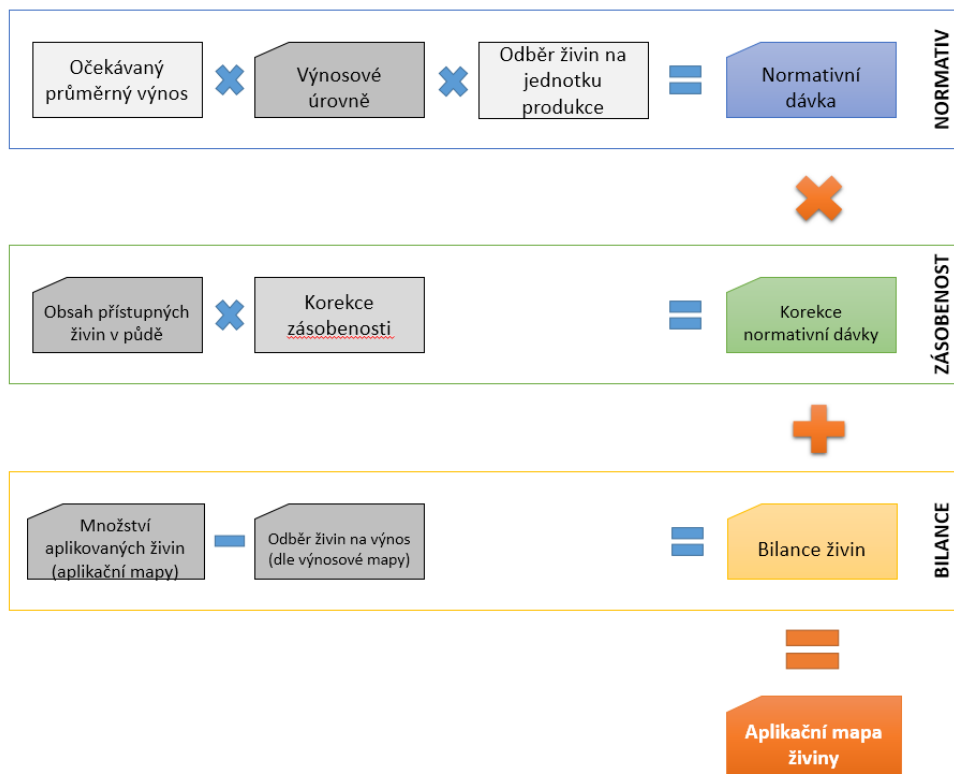
Obr. 11 Mapa zásobenosti půd fosforem vytvořená metodou IDW, Ordinary Kriging a Ordinary Kriging bez výpočtu nugget efektu (Lukas a Křen, 2005). U metody ordinary kriging je patrný vyhlazovací efekt, zatímco ostatní metody jsou více detailní.

Pro **hodnocení interpolačních metod**, resp. odchylky predikovaných hodnot od původní datové vrstvy doporučují Isaaks a Srivastava (1989) metodu *cross-validation*. Tato metoda umožňuje porovnávat dopad rozdílných variogramů a metod na výsledek interpolace. Hlavním principem je vyjmutí jednoho datového bodu ze souboru dat a výpočet predikce na jeho místě zvoleným modelem, příp. metodou. Tímto způsobem je hodnocení provedeno v celém datovém souboru. Vybrán je postup s nejnižší dosaženou odchylkou, tzn. nejvyšší přesností predikce.

### 3. Postupy tvorby aplikačních map zásobního hnojení

Základem stanovení dávky P, K, a Mg živin je bilanční metoda, kdy jsou do půdy navraceny živiny odebrané ve sklizených produktech. Standardním postupem je stanovení **normativní dávky** (normativ) dle očekávaného výnosu plodiny a odběru živin na jednotku produkce. Normativní dávka je dále upravována (tzv. **korekce normativu**) dle zásobenosti živin v půdě, která je vyhodnocena agrochemickými zkoušením zemědělských půd. Variabilní aplikace hnojiv předpokládá znalost prostorového rozložení jednotlivých kroků ve formě mapových vrstev v GIS. Navrhovaná metodika rozšiřuje postup stanovení dávky o další krok:

1. Výpočet **normativní dávky** se zohledněním výnosových úrovní z výnosových map či vymezení zón relativního výnosového potenciálu z družicových dat.
2. **Korekce** normativní dávky na základě hodnocení **obsahu přístupných živin** z půdního vzorkování optimalizovaného pomocí metod digitálního mapování půdy a zpřesněním korekce
3. Zohlednění **bilance živin** zjednodušeným výpočtem exportu živin z výnosových map z poslední sklizně a přísunu živin aplikací minerálních či organických hnojiv v uplynulém období.



Obr. 12 Schéma obecného postupu zpracování aplikačních map zásobního hnojení v GIS prostředí

Příprava aplikačních map předpokládá zohlednění prostorových rozdílů v rámci jednotlivých pozemků u každého kroku zpracování v GIS. Jako ideální se jeví práce s rastrovými vrstvami a to zejména kvůli mapové algebře, která umožňuje aritmetické operace s hodnotami pixelů mezi rastrovými vrstvami. Pokud nelze vyhodnotit prostorové rozdíly, například při aplikaci hnojiv jednotnou dávkou, je uvažována konstantní hodnota pro celou plochu pozemku. Obr. 12 znázorňuje schéma navrhovaného postupu, jehož jednotlivé kroky jsou detailně popsány v následných kapitolách metodiky.

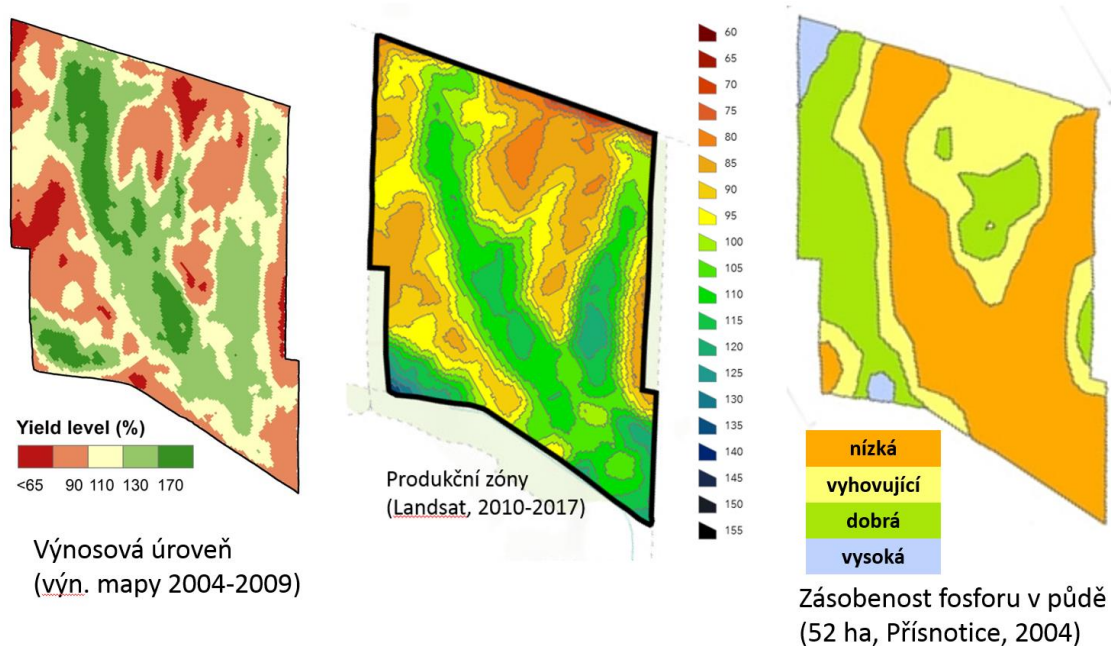
### 3.1. Stanovení normativní dávky se zohledněním výnosových úrovní

Prvním krokem při výpočtu dávky zásobního hnojení P, K, a Mg živinami je pokrytí odběru živin rostlinami na výnos hlavního a vedlejšího produktu. Výše této tzv. **normativní dávky** je určena plánovaným výnosem dané plodiny a odběrem příslušných živin na 1 t produktu (viz Tab. 3).

Tab. 3 Průměrný odběr živin ve sklizených produktech vybraných plodin (Klír et al., 2008)

| Plodina                       | Produkt      | Sušina (%) | poměr HP:VP* | Odběr živin v kg.t <sup>-1</sup> produktu |      |      |                               |       |
|-------------------------------|--------------|------------|--------------|---|------|------|-------------------------------|-------|
|                               |              |            |              | 1,0 :                                     | N    | P    | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K     |
| Pšenice ozimá (12 % bílkovin) | zrno         | 85         |              | 17,9                                      | 3,3  | 7,6  | 3,7                           | 4,5   |
|                               | sláma        | 85         |              | 5,2                                       | 0,9  | 2,1  | 10,0                          | 12,0  |
|                               | celkem       |            | 0,8          | 22,1                                      | 4,0  | 9,2  | 11,7                          | 14,1  |
| Pšenice ozimá (14 % bílkovin) | zrno         | 85         |              | 20,9                                      | 3,3  | 7,6  | 3,7                           | 4,5   |
|                               | sláma        | 85         |              | 4,3                                       | 0,9  | 2,1  | 10,0                          | 12,0  |
|                               | celkem       |            | 0,8          | 24,3                                      | 4,0  | 9,2  | 11,7                          | 14,1  |
| Ječmen jarní                  | zrno         | 85         |              | 16,5                                      | 3,5  | 8,0  | 4,5                           | 5,4   |
|                               | sláma        | 85         |              | 6,0                                       | 1,0  | 2,3  | 11,0                          | 13,2  |
|                               | celkem       |            | 0,6          | 20,1                                      | 4,1  | 9,4  | 11,1                          | 13,4  |
| Kukuřice na zrno              | zrno         | 85         |              | 16,0                                      | 3,5  | 8,0  | 4,5                           | 5,4   |
|                               | sláma        | 85         |              | 9,0                                       | 1,1  | 2,5  | 16,0                          | 19,3  |
|                               | celkem       |            | 1,1          | 25,9                                      | 4,7  | 10,8 | 22,1                          | 26,6  |
| Hrách setý                    | zrno         | 85         |              | 35,5                                      | 3,6  | 8,3  | 8,3                           | 10,0  |
|                               | sláma        | 85         |              | 15,0                                      | 1,5  | 3,4  | 15,0                          | 18,1  |
|                               | celkem       |            | 1,0          | 50,5                                      | 5,1  | 11,7 | 23,3                          | 28,1  |
| Řepka ozimá                   | semeno       | 90         |              | 33,5                                      | 7,0  | 16,0 | 8,3                           | 10,0  |
|                               | sláma        | 85         |              | 6,6                                       | 1,3  | 3,0  | 19,0                          | 22,9  |
|                               | celkem       |            | 2,2          | 48,0                                      | 9,9  | 22,6 | 50,1                          | 60,3  |
| Slunečnice                    | semeno       | 92         |              | 28,0                                      | 7,0  | 16,0 | 19,9                          | 24,0  |
|                               | sláma        | 90         |              | 15,0                                      | 2,2  | 5,0  | 41,5                          | 50,0  |
|                               | celkem       |            | 2,5          | 65,5                                      | 12,5 | 28,5 | 123,7                         | 149,0 |
| Mák                           | semeno       | 90         |              | 32,5                                      | 7,5  | 17,2 | 8,0                           | 9,6   |
|                               | sláma        | 90         |              | 9,0                                       | 1,0  | 2,3  | 20,0                          | 24,1  |
|                               | celkem       |            | 2,8          | 57,7                                      | 10,3 | 23,6 | 64,0                          | 77,1  |
| Brambory                      | hlízy        | 22         |              | 3,5                                       | 0,5  | 1,1  | 4,5                           | 5,4   |
|                               | nať          | 15         |              | 2,8                                       | 0,2  | 0,5  | 4,0                           | 4,8   |
|                               | celkem       |            | 0,2          | 4,1                                       | 0,5  | 1,2  | 5,3                           | 6,4   |
| Cukrovka                      | bulvy        | 23         |              | 2,0                                       | 0,3  | 0,7  | 2,0                           | 2,4   |
|                               | chrást       | 15         |              | 4,0                                       | 0,4  | 0,9  | 4,5                           | 5,4   |
|                               | celkem       |            | 0,5          | 4,0                                       | 0,5  | 1,1  | 4,3                           | 5,1   |
| Kukuřice na siláž             | zelená hmota | 30         |              | 3,7                                       | 0,6  | 1,4  | 3,8                           | 4,6   |

\*poměr HP/VP – poměr hlavního a vedlejšího produktu



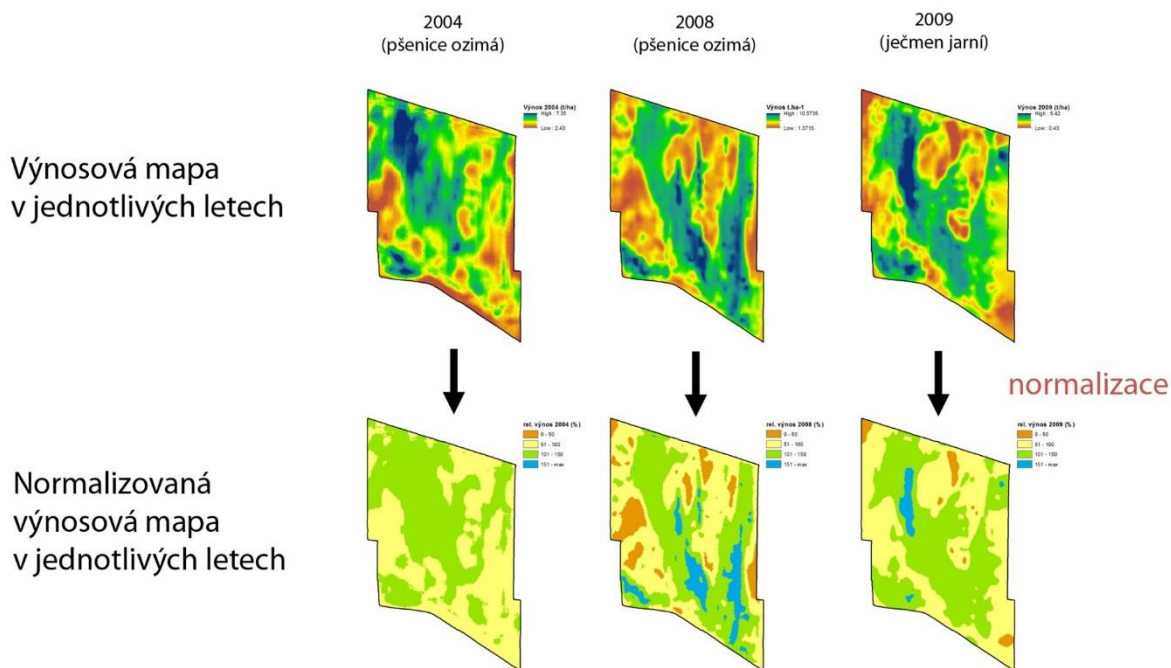
Obr. 13 Porovnání výnosových úrovní ze záznamu při sklizni (vlevo) a mapy produkčních zón sestavených z družicových snímků (uprostřed). Mapa vpravo pak ukazuje na vztah rozložení výnosu s obsahem P v půdě (Přísnotice, 52 ha).

Plánovaným výnosem je při tradičním výpočtu myšlena průměrná hodnota výnosu plodiny na daném pozemku. U více heterogenních pozemků však může použití jednotného průměrného výnosu za celý pozemek maskovat lokální oblasti s vyšší nebo naopak nižší produktivitou. Použití konstantní hodnoty normativního odběru na celý pozemek tedy zcela popírá tuto plošnou nevyrovnanost a vede k vyšší četnosti prováděného monitoringu agrochemických vlastností půdy.

Vztah mezi obsahem živiny (fosforu) a výnosovými úrovněmi znázorňují mapy na Obr. 13. Plochy s nadprůměrnými výnosy vykazují nižší zásobenost P vlivem zvýšeného odběru živiny a nepokrytí této potřeby aplikací P hnojiv dle průměrného odběru živiny na celém pozemku. Jednoznačným cílem je tedy reagovat na výnosovou nevyrovnanost pozemků přímou diferenciací normativní dávky, než následnou korekcí nízké zásobenosti živin po jejich vyčerpání odběrem na zvýšený výnos, identifikované formou nákladného půdního vzorkování.

#### A. Stanovení výnosových úrovní ze záznamů při sklizni plodin (výnosových map)

Vývoj sklízecí techniky v současnosti nabízí možnost celoplošného monitorování výnosu sklizené plodiny. Výsledkem jsou výnosové mapy, ze kterých lze po normalizaci výnosu (přepočtu absolutního výnosu na relativní) stanovit výnosovou úroveň na pozemku. Lukas et al. (2011) popisují postup zpracování výnosových map, kdy kombinací (zprůměrováním) historických map s relativním výnosem lze do určité míry eliminovat ročníkové rozdíly a získat přehled o rozložení výnosového potenciálu na daném území. Hodnota výnosové úrovně vyjadřuje procentuální porovnání výnosu na daném místě s průměrným výnosem ve sledovaném roce za celý pozemek (Obr. 14). Principem zohlednění výnosové úrovně při výpočtu normativu je plošná diferenciacie výnosového potenciálu daného území namísto použití jednotného průměrného plánovaného výnosu nutného pro výpočet normativu (odběru živin na plánovaný výnos).



Obr. 14 Postup kombinace vícero ročníků výnosových map (Lukas et al., 2011)

Stanovení relativní výnosové úrovně se skládá ze dvou kroků – normalizace výnosových map a zprůměrování za více let (pokud jsou data k dispozici). Výnosové záznamy je však nutné nejprve očistit od chybových a odlehlých hodnot. 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). Mezera et al. (2018) ukazují na úskalí tvorby výnosových map jak z hlediska kombinace datových vstupů ze dvou sklízecích mlátiček, tak použití vhodné interpolační metody pro získání spolehlivé rastrové mapy. Postup normalizace výnosových map a zprůměrování popisují v certifikované metodice Lukas et al. (2011).

Kromě výpočtu výnosové úrovně lze z časové řady výnosových dat také stanovit stabilitu výnosu na daném místě. Pro výpočet je použit variační koeficient (CV). Vyšší hodnoty variačního koeficientu představují kolísání výnosové úrovně mezi jednotlivými ročníky na daném místě a vypovídá tak o možném riziku dosažení výnosu při změně povětrnostních podmínek v průběhu roku. Dle Blackmore et al. (2003) lze kombinací výnosové úrovně a stability definovat následující kategorie hodnocení výnosu:

- Oblasti s **vysokým a stabilním výnosem** (nadprůměrný výnos,  $CV < 30\%$ ). Představují místa na pozemku s trvale nadprůměrným výnosem, který je možné podpořit vyšší intenzitou pěstování (hnojení, ochrana rostlin, apod.). Zpravidla se jedná o oblasti s vyšší dostupností půdní vláhy.
- Oblasti s **nízkým a stabilním výnosem** (podprůměrný výnos,  $CV < 30\%$ ). Jedná se o plochy, kde je vhodné snížit intenzitu pěstebních zásahů, dokud nezjistíme a nenapravíme příčinu výnos limitujícího faktoru. Může se jednat o plochy s trvale sníženou úrodností, degradovanou půdu nebo výsušné části pozemků.
- Oblasti s **nestabilním výnosem** ( $CV > 30\%$ ). Tato místa se z hlediska pěstebních doporučení jeví jako riziková, výnos je zde výrazně ovlivněn ročníkovými vlivy. Jako příklad lze uvést zamokřené části pozemků, které v suchých ročnících poskytují nadprůměrný výnos.

Použití relativní výnosové úrovně nic nevyovídá o očekávaném dosažení výnosu, který je zapotřebí pro výpočet normativní dávky živin z odběru živin na jednotku produkce. Proto je nutné výnosovou úroveň vynásobit plánovaným výnosem dané plodiny (konstanta na celý pozemek), který odpovídá výnosovému potenciálu plodiny (odrůdy) v daných agroekologických podmínkách a dané intenzitě hospodaření. Tímto se vytvoří mapa očekávaného výnosu v absolutních jednotkách. Normativní dávka je pak vypočtena vynásobením očekávaného výnosu množstvím živin odebraných na jednotku produkce.

### B. Mapy produkčních zón z multispektrálních družicových dat

Výpočet rozložení produkčních zón, či map relativního výnosového potenciálu, z dat dálkového průzkumu Země (DPZ) vychází z analýzy nevyrovnanosti porostů jednotlivých pozemků z vegetačních indexů za vybrané časové období (zpravidla 5 – 10 let). 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). 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 vláhly. Výsledky mohou být následně uplatněny zemědělskými podniky při návrhu lokálně cíleného hospodaření.

Vegetační indexy jsou využívány pro zvýraznění vegetační složky v obraze, zároveň redukují množství vstupních spektrálních pásem do jediné veličiny. Nejčastěji používaným vegetačním indexem při hodnocení vegetace je NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), který je spočítán z odrazivosti v červeném (R) a blízce infračerveném (NIR) pásmu elektromagnetického záření dle níže uvedené rovnice (Rouse et al., 1973):

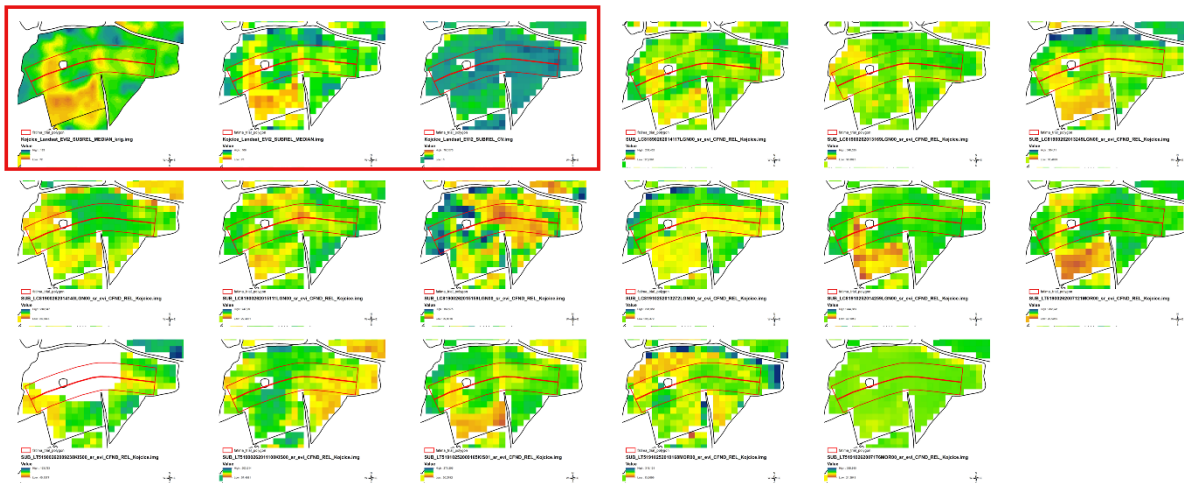
$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$$

Huete et al. (1994) představili ve své studii *Enhanced Vegetation Index* (EVI), který redukuje atmosférické vlivy implementací odrazivosti modrého pásma do normalizované kalkulace:

$$\text{EVI} = \frac{2.5 \times (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{red}})}{1 + \rho_{\text{NIR}} + 6 \times \rho_{\text{red}} - 7.5 \times \rho_{\text{blue}}}$$

Podle Gao et al. (2000), NDVI je více ovlivněno obsahem chlorofylu a saturuje při vysokém množství nadzemní biomasy porostu, zatímco EVI odpovídá ve větší míře strukturním změnám porostu a vykazuje vyšší citlivost při plném zapojení porostu. Ve výsledku vykazuje EVI vyšší citlivost na změny v podílu zelené vegetace při vyšší úrovni nadzemní biomasy (Huete et al., 2002).





Obr. 15 Výpočet relativního výnosového potenciálu – červený rámeček zobrazuje mapu s prostorovým rozlišením 5m (vlevo), 30 m (uprostřed) a odchytku hodnot v čase v podobě variačního koeficientu (vpravo). Další mapy představují relativní rozložení hodnot EVI pro jednotlivé scény za 8-leté období (Lukas et al., 2018a).

Pro výpočet jsou vybírány scény z druhé poloviny vegetačního období zemědělských plodin s minimální oblačností a aplikaci radiometrických a atmosférických korekcí (Lukas et al., 2018a). 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 např. 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 (Obr. 15). 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.

### 3.2. Korekce normativu dle zásobenosti půdy živinami

Normativní dávka stanovená dle množství odebraných živin na očekávanou produkci je upravena na základě hodnocení obsahu živin v půdě. To je provedeno z výsledků laboratorních analýz odebraných půdních vzorků stanovených na obsah přístupných živin. Postupy mapování prostorové nevyrovnanosti agrochemických vlastností půdy jsou popsány v kapitole 2. Kritéria hodnocení obsahu živin v půdě (Tab. 4) jsou součástí metodiky Mehlich 3 (Smatanová, 2018).

Obsah živin v půdě (P, K, Mg, Ca) je podle vyhlášky č. 275/1998 Sb. klasifikován do pěti tříd: nízký, vyhovující, dobrý, vysoký a velmi vysoký, přičemž pro obsah K, Mg a Ca je hodnocení závislé na druhu půdy vyskytující se na pozemku (lehká, středně těžká, těžká). Druh půdy je hodnocen klasifikační stupnicí podle Nováka dle zastoupení jílnatých částic (< 0,01 mm) – viz Tab. 5.

Tab. 4 Kritéria hodnocení výsledků půdních rozborů

| Obsah        | FOSFOR<br>(mg.kg <sup>-1</sup> ) | DRASLÍK (mg.kg <sup>-1</sup> ) |         |         | HOŘČÍK (mg.kg <sup>-1</sup> ) |         |         | VÁPÍK (mg.kg <sup>-1</sup> ) |           |           |
|--------------|----------------------------------|--------------------------------|---------|---------|-------------------------------|---------|---------|------------------------------|-----------|-----------|
|              |                                  | půda                           |         |         | půda                          |         |         | půda                         |           |           |
|              |                                  | lehká                          | střední | těžká   | lehká                         | střední | těžká   | lehká                        | střední   | těžká     |
| Nízký        | do 50                            | do 100                         | do 105  | do 170  | do 80                         | do 105  | do 120  | do 1000                      | do 1100   | do 1700   |
| vyhovující   | 51-80                            | 101-160                        | 106-170 | 171-260 | 81-135                        | 106-160 | 121-220 | 1001-1800                    | 1101-2000 | 1701-3000 |
| Dobrý        | 81-115                           | 161-275                        | 171-310 | 261-350 | 136-200                       | 161-265 | 221-330 | 1801-2800                    | 2001-3300 | 3001-4200 |
| Vysoký       | 116-185                          | 276-380                        | 311-420 | 351-510 | 201-285                       | 266-330 | 331-460 | 2801-3700                    | 3301-5400 | 4201-6600 |
| velmi vysoký | nad 185                          | nad 380                        | nad 420 | nad 510 | nad 285                       | nad 330 | nad 460 | nad 3700                     | nad 5400  | nad 6600  |

Tab. 5 Základní klasifikační stupnice podle Nováka (Jandák et al., 2004)

| Obsah částic (zrn)<br><0,01 mm (%) | Označení druhu půdy  | Klasifikace půdy |
|------------------------------------|----------------------|------------------|
| 0 – 10                             | písčítá (P)          | lehká            |
| 10 – 20                            | hlinitopísčítá (HP)  |                  |
| 20 – 30                            | písčitohlinitá (PH)  | středně těžká    |
| 30 – 45                            | hlinitá (PH)         |                  |
| 45 – 60                            | jílovitohlinitá (JH) | těžká            |
| 60 – 75                            | jílovitá (JV)        |                  |
| nad 75                             | jíl (J)              |                  |

Z důvodu možného podhodnocení obsahu fosforu extrakční metodou Mehlich 3 na karbonátových půdách navrhuji ve své metodice (Čermák et al., 2018) upravená kritéria obsahu přístupného fosforu (Tab. 6).

Tab. 6 Hodnocení obsahu fosforu na karbonátových půdách (Čermák et al., 2018)

| Obsah        | FOSFOR (mg.kg <sup>-1</sup> ) |                  |
|--------------|-------------------------------|------------------|
|              | ostatní (nekarbonátové půdy)  | karbonátové půdy |
| nízký        | do 50                         | do 40            |
| vyhovující   | 51 - 80                       | 41 - 70          |
| dobrý        | 81 - 115                      | 71 - 105         |
| vysoký       | 116 - 185                     | 106 - 150        |
| velmi vysoký | nad 185                       | nad 150          |

Uvedené slovně označené kategorie obsahu lze využít v úpravě základních dávek živin podle Tab. 7. Optimální zásoba přístupných živin v půdě se pohybuje okolo rozmezí jejich dobré a vyhovující zásoby. Obecně platí, že při vysoké a velmi vysoké zásobě se vypočtená dávka hnojení úměrně snižuje a při nízké zásobě naopak zvyšuje.

Tab. 7 Doporučené hnojení na základě obsahu přístupných živin v půdě

| 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)     |
| dobrý (D)             | potřeba pouze nahrazovacího hnojením příslušnou živinou (normativ) |

|                   |   |
|-------------------|---|
| vysoký (V)        | potřeba vypustit hnojení do dosažení kategorie dobré  |
| velmi vysoký (VV) | hnojení příslušnou živinou je zbytečné až nepřípustné |

Vstupní datovou vrstvou je celoplošná mapa obsahu sledovaných živin (P, K, Mg, Ca) vytvořená z výsledků vzorkování půdy. V případě obsahu P je zásobenost hodnocena bez zohlednění druhu půdy. Hodnocení je provedeno v GIS nástroji pro reklasifikaci rastrových map obsahu živin, jejímž výsledkem je procentuální úprava normativní dávky (Tab. 8 a Tab. 9).

Tab. 8 Tabulka klasifikace obsahu P do procentuálních hodnot úpravy normativu

| Původní hodnoty | Výsledné hodnoty (korekce %) |
|-----------------|------------------------------|
| 0 – 50          | 150                          |
| 50 – 80         | 125                          |
| 80 – 115        | 100                          |
| 115 – 999       | 0                            |

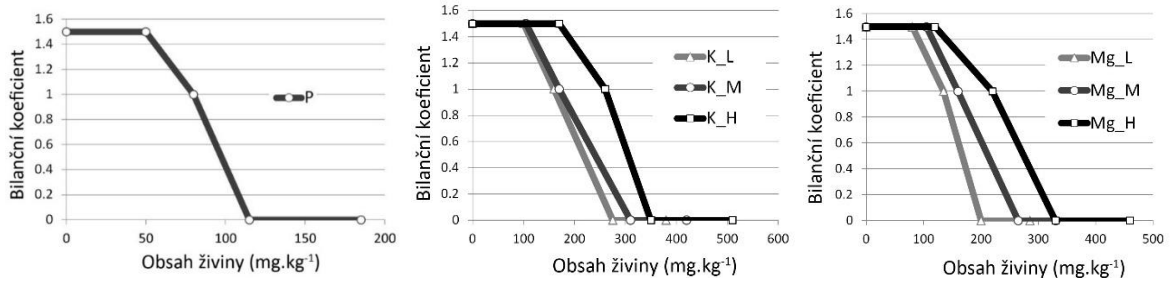
Při hodnocení obsahu K, Mg a Ca je nutné zohlednit druh půdy. Informace o druhu půdy může být k dispozici jako konstantní hodnota pro celý pozemek (půdní zrnitost je na celé ploše pozemku ve stejné kategorii, případně se bere v potaz převažující půdní druh), nebo jsou k dispozici výsledky hodnocení zrnitosti půdy v podobě mapy druhu půdy vytvořené z výsledků půdního vzorkování, či odvozená z dostupných půdních map (KPZP, BPEJ, ...). Ačkoli lze při zpracování dat v GIS provést klasifikaci dvou datových vrstev (půdní druh, obsah živiny) vícero způsoby, nejjednodušší metodou je formou mapové algebry - přiřazením jednotlivým kategoriím druhu půdy kód 10000 (lehká), 20000 (střední) a 30000 (těžká půda) a po součtu druhu půdy a obsahu živiny provést re-klasifikaci dle následující tabulky:

Tab. 9 Klasifikace obsahu K, Mg a Ca do procentuálních hodnot úpravy normativu s kódovým zohledněním druhu půdy (10000 = lehká půda, 20000 = středně těžká půda, 30000 = těžká půda)

| Obsah K (po překódování) | Korekce (%) | Obsah Mg (po překódování) | Korekce % | Obsah Ca (po překódování) | Korekce % |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| 10000 - 10100            | 150         | 10000 - 10080             | 150       | 10000 - 11000             | 150       |
| 10100 - 10160            | 125         | 10080 - 10135             | 125       | 10080 - 11800             | 125       |
| 10160 - 10275            | 100         | 10135 - 10200             | 100       | 10135 - 12800             | 100       |
| 10275 - 19999            | 0           | 10200 - 19999             | 0         | 10200 - 19999             | 0         |
| 20000 - 20105            | 150         | 20000 - 20105             | 150       | 20000 - 21100             | 150       |
| 20105 - 20170            | 125         | 20105 - 20160             | 125       | 20105 - 22000             | 125       |
| 20170 - 20310            | 100         | 20160 - 20265             | 100       | 20160 - 23300             | 100       |
| 20310 - 29999            | 0           | 20265 - 29999             | 0         | 20265 - 29999             | 0         |
| 30000 - 30170            | 150         | 30000 - 30120             | 150       | 30000 - 31700             | 150       |
| 30170 - 30260            | 125         | 30120 - 30220             | 125       | 30120 - 33000             | 125       |
| 30260 - 30350            | 100         | 30220 - 30330             | 100       | 30220 - 34200             | 100       |
| 30350 - 39999            | 0           | 30330 - 39999             | 0         | 30330 - 39999             | 0         |

### Úprava normativní dávky dle bilančního koeficientu (BK)

Klír et al. (2008) navrhuje pro hnojení P, K, Mg hnojiv tzv. **bilanční koeficient** (BK), který vyjadřuje úpravu normativní dávky. BK odpovídá původním hodnotám úpravy normativů, které jsou ale vyneseny do spojnicového grafu. BK nabývá hodnot v rozpětí 0 – 1,5 (tedy 0 – 150 % normativní dávky).

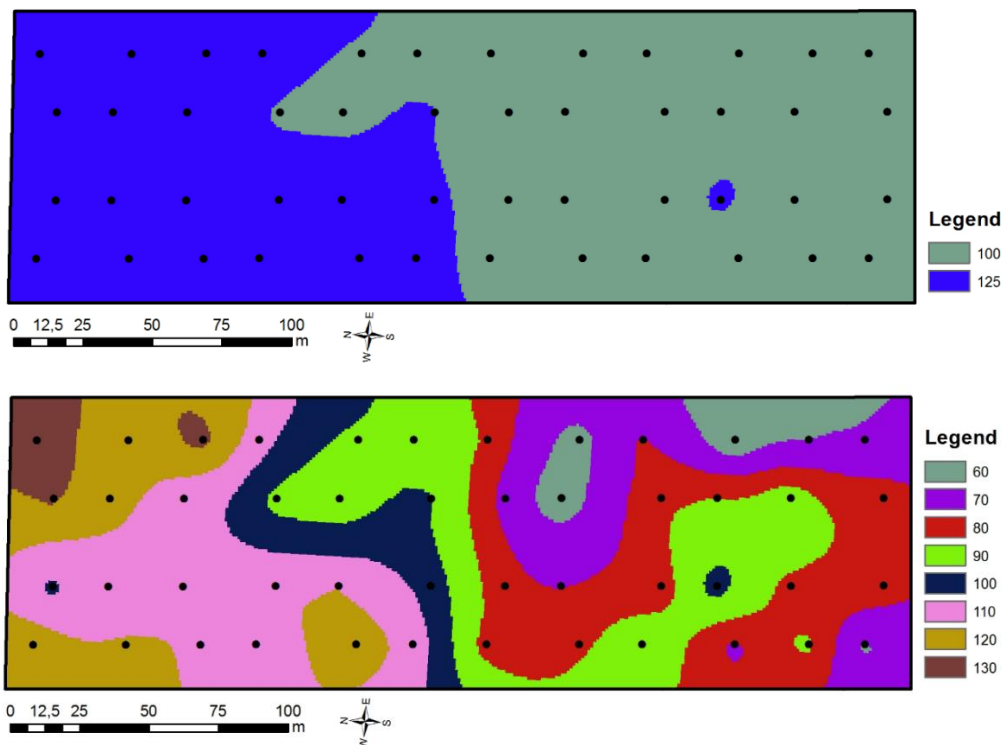


Obr. 16 Bilanční koeficient pro P, K, Mg hnojení včetně rozlišení dle druhu půdy (Klír et al., 2008, upraveno)

Postup stanovení korekce normativu dle BK je shodný s předchozím popisem, liší se pouze mezními hodnotami. Namísto pěti tříd (N, VH, D, V, VV), klasifikovaných dle příslušného rozsahu obsahu živiny, je použito přesné hodnocení vycházející ze spojitých grafů na Obr. 16. Pro tyto účely byla sestavena klasifikační tabulka s hodnotou BK pro každou jednotku obsahu živiny v půdě (Lukas et al., 2011). Opět platí, že hodnocení obsahu P je prováděno bez zohlednění druhu půdy, zatímco u ostatních živin je hodnocen součet obsahu živiny a kódu druhu půdy. Výsledkem obou postupů je mapa procentuální korekce, kterou je následně normativní dávka živiny upravena dle následující rovnice:

$$\text{Dávka živiny} = \text{normativ} * (\text{korekce normativu} / 100) \text{ [kg.ha}^{-1}\text{]}$$

Výhodou použití BK je možnost kontinuální úpravy normativu pro daný obsah živiny namísto jejího zařazení do příslušné třídy. Ačkoli lineární proložení prahových hodnot obsahu živin umožňuje stanovení korekce hodnoty BK pro každou jednotku obsahu, pro zjednodušení bylo členění BK klasifikováno do tříd po 10 % (označeno jako BK10). Mezní hodnoty jsou uvedeny v Tab. 10. Příklad rozdílu mezi tradiční klasifikací dle Mehlich 3 a BK10 je znázorněn na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**



Obr. 17 Porovnání korekce normativu dle obsahu přístupného hořčíku na 3 ha pozemku – nahoře dle kategorií obsahu živiny s původní klasifikací do pěti tříd (zastoupeny jsou pouze dvě), dole dle bilančního koeficientu členěného po 10 % (BK10)

Tab. 10 Mezní hodnoty obsahu živin s přičteným kódem druhu půdy pro korekci zásobenosti dle bilančního koeficientu členěného po 10 % (BK10)

| BK (%)  | Lehká půda    | Střední půda  | Těžká půda     |           |
|---|---------------|---------------|----------------|-----------|
| <b>Obsah K (po překódování na druh půdy)</b>  |               |               | <b>Obsah P</b> |           |
| 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      |
| <b>Obsah Mg (po překódování na druh půdy)</b> |               |               |                |           |
| 150   | 10000 - 10080 | 20000 - 20105 | 30000 - 30120  |           |
| 140   | 10080 - 10092 | 20105 - 20116 | 30120 - 30142  |           |
| 130   | 10092 - 10103 | 20116 - 20127 | 30142 - 30162  |           |
| 120   | 10103 - 10114 | 20127 - 20138 | 30162 - 30182  |           |
| 110   | 10114 - 10125 | 20138 - 20149 | 30182 - 30202  |           |
| 100   | 10125 - 10136 | 20149 - 20160 | 30202 - 30221  |           |
| 90  | 10136 - 10142 | 20160 - 20171 | 30221 - 30232  |           |
| 80  | 10142 - 10149 | 20171 - 20181 | 30232 - 30243  |           |
| 70  | 10149 - 10155 | 20181 - 20192 | 30243 - 30254  |           |
| 60  | 10155 - 10162 | 20192 - 20202 | 30254 - 30265  |           |
| 50  | 10162 - 10168 | 20202 - 20213 | 30265 - 30276  |           |
| 40  | 10168 - 10175 | 20213 - 20223 | 30276 - 30287  |           |
| 30  | 10175 - 10181 | 20223 - 20233 | 30287 - 30298  |           |
| 20  | 10181 - 10188 | 20233 - 20244 | 30298 - 30309  |           |
| 10  | 10188 - 10194 | 20244 - 20255 | 30309 - 30320  |           |
| 0   | >10194        | >20255        | >30320         |           |

### 3.3. Úprava dávky hnojení dle bilance živin

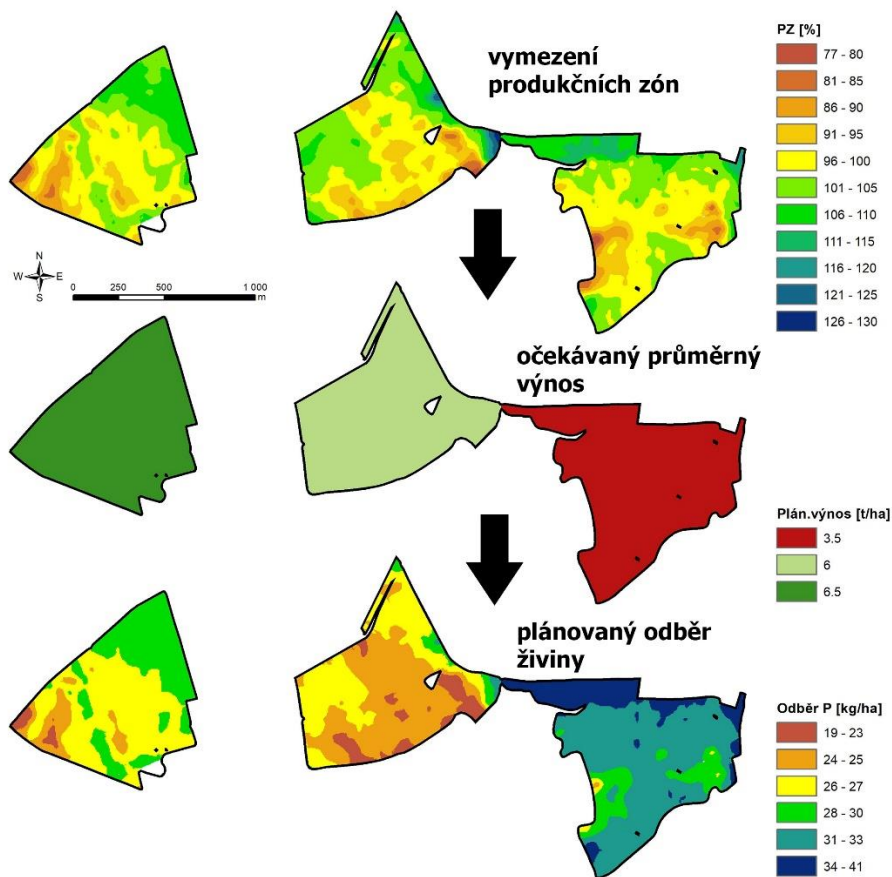
Výpočet bilance živin na základě rozdílu vstupu živin aplikovaných k plodině v podobě minerálních a organických hnojiv a exportu živin hlavním či vedlejším produktem při sklizni představuje poslední krok úpravy dávek hnojení. Hlavním cílem je lépe reagovat na difference mezi provedenou agrotechnikou (hnojením) a dosaženým výnosy v daném roce. Pokud byla aplikace hnojiv provedena diferencovanými dávkami, lze pro zohlednění prostorových diferencí vyjít z aplikačních map. Výši exportu živin odvozem zrna lze stanovit z výnosových map z poslední sklizně. Výnosové mapy mohou být také využity pro kvantifikaci množství zaorané slámy při aplikaci poměru hlavního a vedlejšího produktu (viz Tab. 3).

### **Export aplikační mapy do zemědělské techniky**

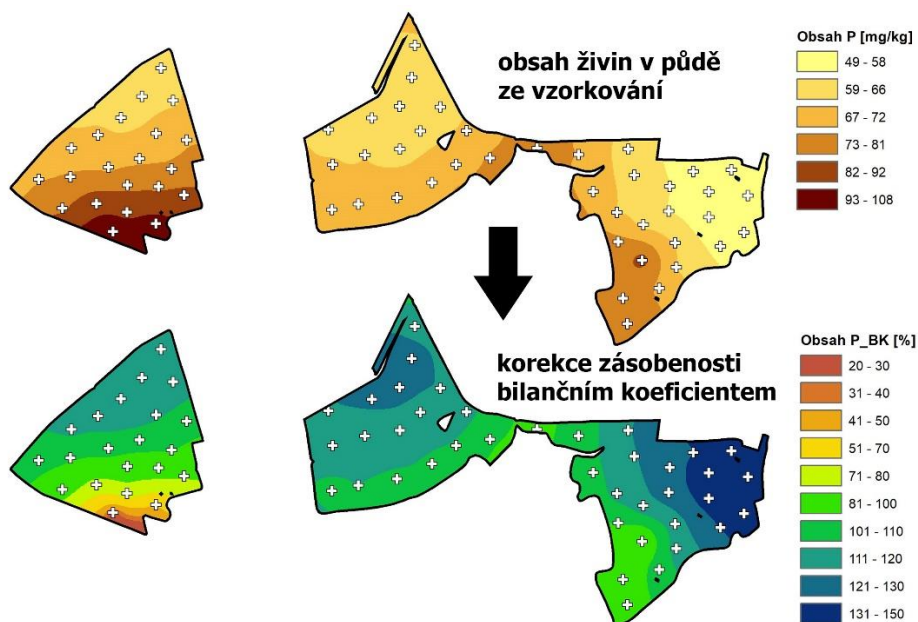
Finálním krokem pro vytvoření aplikační mapy je volba hnojiva, přepočítání mapové vrstvy dávky živiny dle obsahu živin v hnojivu a export do vektorového formátu (nejčastěji shapefile – shp). Při exportu aplikační mapy z GIS je třeba pro úspěšné nahrání do palubního terminálu aplikátoru (rozmetadlo, postřikovač) dodržet výrobcem doporučený formát, datovou strukturu a souřadnicovou projekci mapového souboru. U dat, která byla vytvořena či zpracována v národním souřadnicovém systému S-JTSK (např. hranice farmářských bloků exportovaných z LPIS), lze předpokládat podmínku transformace do globálního souřadnicového systému WGS-84 (platný např. pro GPS systém). Nástroje pro tuto operaci jsou součástí většiny GIS aplikací a jejich podrobný popis přesahuje rámec tohoto textu.

Většina moderních palubních terminálů aplikační techniky akceptuje nahrávání aplikačních map ve formátu shp (nejčastěji jako tzv. *single polygon feature*) s jednoznačně definovaným atributem obsahujícím hodnoty dávek. V některých případech je nutné mapy převést do formátu ISOXML, např. pomocí volně dostupných konvertorů (např. SHAPE-ISO-XML Converter: <https://www.mueller-elektronik.de/en/products/shape-iso-xml-converter/>).

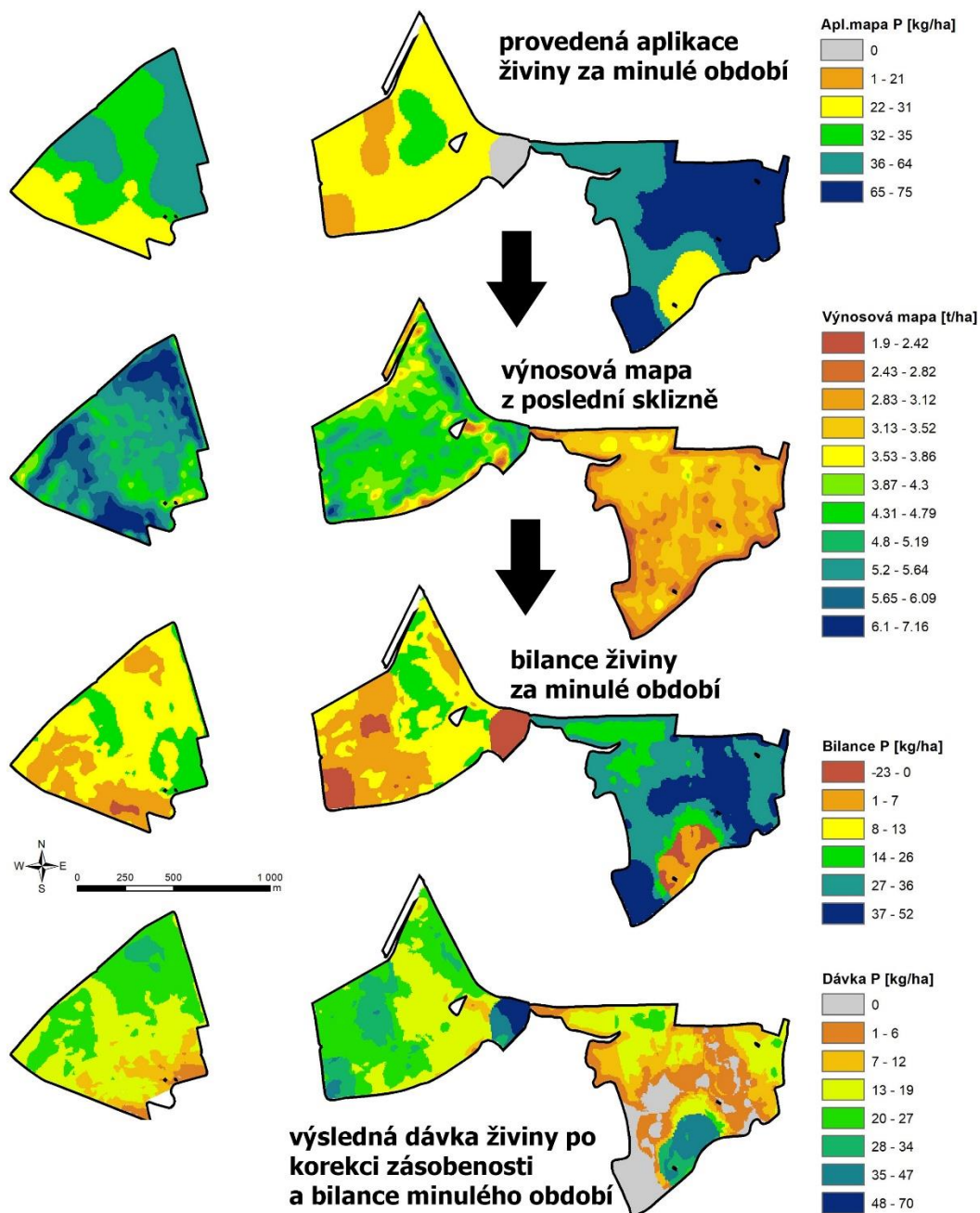
### 3.4. Příklad postupu zpracování aplikačních map zásobního hnojení v GIS prostředí



Obr. 17 Postup zpracování aplikačních map zásobního hnojení fosforem v GIS. **Krok 1 - výpočet normativní dávky** dle průměrného očekávaného výnosu a rozložení výnosových hladin z časové řady výnosových map nebo družicových dat



Obr. 18 Postup zpracování aplikačních map zásobního hnojení fosforem v GIS. **Krok 2 - hodnocení zásobenosti půdy přístupnými živinami** půdním vzorkováním a korekce normativní dávky bilančním koeficientem



Obr. 19 Postup zpracování aplikačních map zásobního hnojení fosforem v GIS. **Krok 3 – hodnocení bilance živin předplodiny** a korekce normativní dávky plánovaného hnojení. Vychází se z mapových podkladů poslední vegetační sezóny o množství dodaných živin provedeným hnojením předplodiny (aplikační mapy) a odběru živin ze sklizené produkce (výnosové mapy). Konečným výsledkem je mapa dávky hnojení po korekci zásobenosti přístupných živin v půdě a bilance živin předplodiny.



#### 4. Případová studie - vyhodnocení navrhovaného postupu

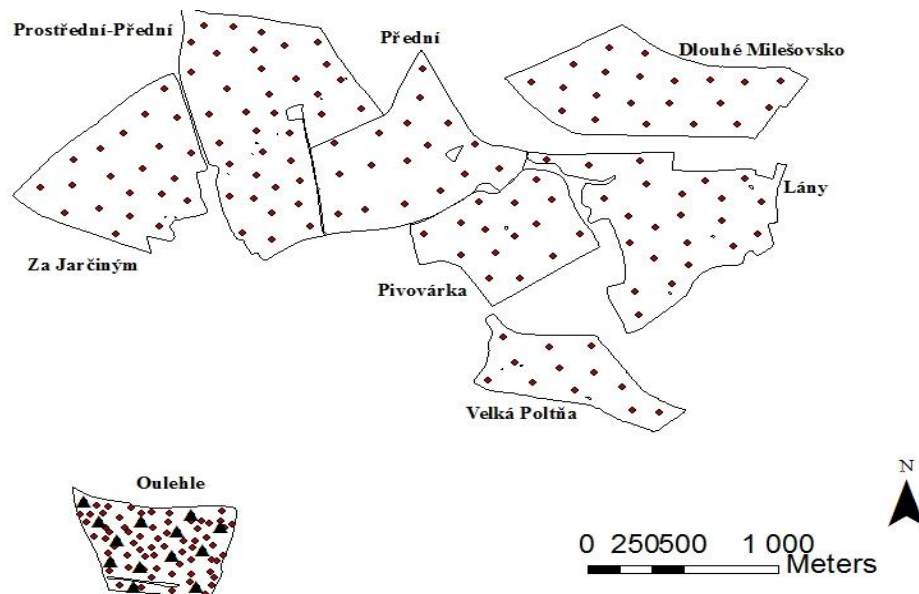
Variabilní aplikace hnojiv představuje klíčovou technologii při lokálně cíleném hospodaření na zemědělské půdě. Na rozdíl od tradičně prováděné uniformní aplikace hnojiv jsou zohledňovány lokální rozdíly v zásobě přístupných živin v půdě nebo výživného stavu porostů v rámci jednotlivých pozemků. Záměrem precizního zemědělství je rozdílným obhospodařováním v rámci jednotlivých pozemků dosáhnout zvýšené efektivity využívání materiálových vstupů (hnojiva, pesticidy, PHM, apod.) dle stavu půdy, rostlin, dosahovaného výnosu a únosnosti daného prostředí.

Cílem vyhodnocení bylo porovnat různé varianty stanovení dávek živin základního hnojení zohledňující prostorovou heterogenitu zásobenosti včetně zohlednění výnosových rozdílů v rámci pozemku a posoudit vliv variabilní aplikace na celkové množství aplikovaných živin. Bližší popis a výsledky uvádí (Lukas et al., 2018c)

Pro experimentální část práce bylo vybráno osm pozemků v lokalitě Otnice (Slavkov u Brna) o celkové výměře 476 ha, které jsou obhospodařovány zemědělskou společností Rostěnice a.s (Obr. 20). Území se nachází v kukuřičné výrobní oblasti, v klimatickém regionu teplý, mírně suchý (T2) s průměrnou roční teplotou 8 - 9°C a ročním úhrnem srážek 500-600 mm. Průměrná nadmořská výška sledovaného území je 243 m. n. m. a svažítost 3,4°. Půdy převažují bezskeletovité, středně hluboké až hluboké, půdním typem černozemě, rendziny a méně i hnědozemě a fluvizemě; převažující kategorie půdního druhu jsou středně těžké až těžké.

##### Vzorkování půdy a stanovení agrochemických půdních vlastností

Odběry porušených půdních vzorků pro stanovení agrochemických vlastností byly provedeny v květnu a říjnu 2016, dle osevu plodin na pozemcích. Vzorky byly odebírány z hloubky 0 - 30 cm v nepravidelném rastru o hustotě rozmístění odběrových bodů 1 vzorek na 3 ha. Na pozemku Oulehle byl experimentálně zvýšen počet vzorků na hustotu 2 vzorky na 1 ha (varianta Oulehle78). Rozmístění vzorků bylo provedeno subjektivně na základě dostupných mapových podkladů – výsledky měření elektrické vodivosti půdy, dostupných výnosových map z předchozích ročníků a digitálního modelu reliéfu (DMR4G). Každý směsný vzorek se sestával z cca 5 – 7 dílčích vzorků odebraných s využitím submetrové DPGS do 10 m od odběrového bodu. Celkem bylo z plochy 476 ha odebráno 224 směsných vzorků, které byly odeslány do zemědělské laboratoře pro stanovení agrochemických půdních vlastností dle platné metodiky ÚKZÚZ (Zbíral, 2016). Pro účely této studie byly použity výsledky analýzy zrnitosti pipetovací metodou a obsahu přístupného P, K, Mg dle Mehlich 3 metodou ICP-OES.



Obr. 20 Mapa rozmístění odběrových míst půdního vzorkování na jednotlivých pozemcích

### Zpracování a vyhodnocení výsledků

Z bodových dat byly pomocí prostorových interpolačních metod v prostředí ESRI ArcGIS 10.3 vytvořeny celoplošné půdní mapy. Pro každou datovou sadu půdních vlastností byly použity metody Inverse Distance Weighting (IDW) a Empirical Bayesian Kriging (EBK) (Krivoruchko, 2012), konečný výběr se odvíjel od dosažení co nejnižší odchylky predikčního modelu - RMSE (root mean square error). Výsledné mapy byly exportovány v rastrové podobě ve formátu GeoTIFF s prostorovým rozlišením 5 m na pixel a následně vstupovaly do procesu výpočtu dávky hnojení.

### Výsledky a diskuze

Aplikační dávky základního hnojení byly pro porovnání stanoveny v šesti variantách výpočtu se zohledněním následujících hledisek:

- uniformní (UNI) versus variabilní aplikace (VRA)
- klasifikace obsahu živin do pěti tříd zásobenosti dle Mehlich 3 (M3) versus použití bilančního koeficientu pro zpřesněné stanovení korekce zásobenosti půdy (BK10) (Klír et al., 2008).
- použití jednotné hodnoty odběru živin pro pozemek (VRA) versus zohlednění výnosových úrovní na pozemcích (VRY).

Přehled variant stanovení aplikačních dávek živin:

UNI-M3 - tradiční metoda výpočtu dávky hnojení, průměrná hodnota normativní dávky dle odběru živin na očekávaný výnos je korigována dle hodnocení průměrné zásobenosti půd přístupnými živinami do pěti tříd dle metodiky Mehlich 3.

UNI-BK10 – podobně jako UNI-M3 s rozdílem, že korekce normativní dávky je pomocí bilančního koeficientu (členěném po 10 %)

VRA-M3 – stanovení dávky se zohledněním prostorových rozdílů v zásobenosti půdy, normativní dávka je definována průměrnou hodnotou za celý pozemek.

VRA-BK10 – podobně jako VRA-M3, pro klasifikaci zásobenosti bylo použito členění dle bilančního koeficientu.

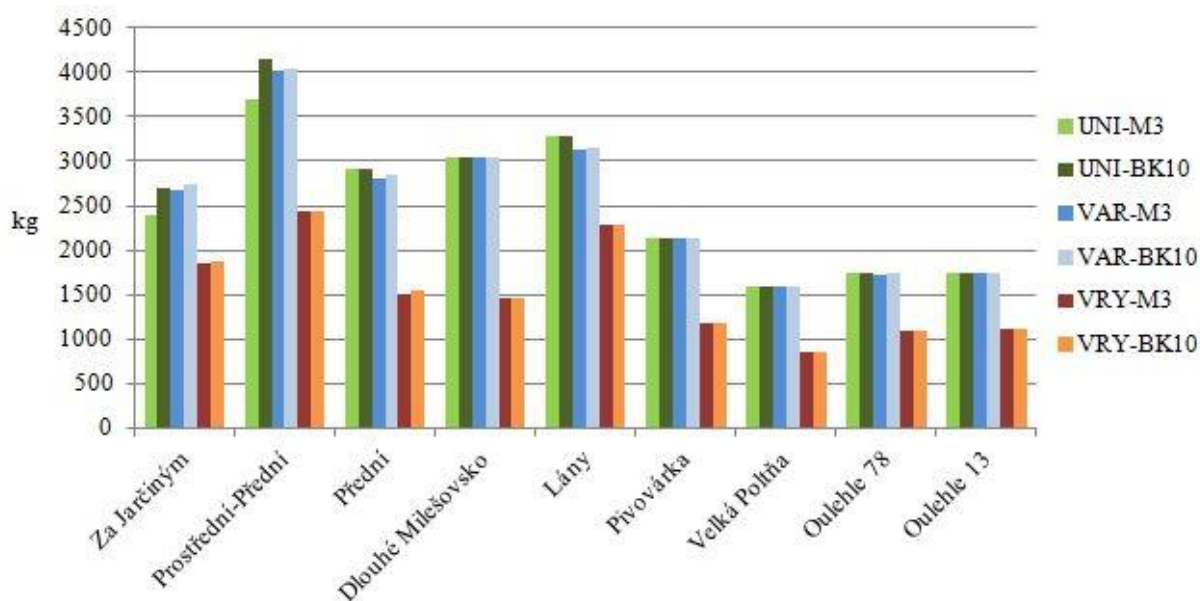
**VRY-M3** – varianta se zohledněním prostorových rozdílů ve výnosech plodin a klasifikací do pěti tříd dle Mehlich 3.

**VRY-BK10** – varianta se zohledněním prostorových rozdílů ve výnosech plodin a korekcí normativní dávky dle bilančního koeficientu. Výnosová úroveň je uvedena v % a poskytuje informaci o tom, na jakých místech pozemku je předpoklad vyššího či nižšího výnosu než je průměrný výnos dosahovaný z tohoto pozemku. Při tvorbě mapy výnosové úrovně byla využita volně dostupná data získaná družicových snímků LANDSAT (Řezník et al., 2016).

Tab. 11 Souhrn ověřovaných variant stanovení dávky zásobního hnojení

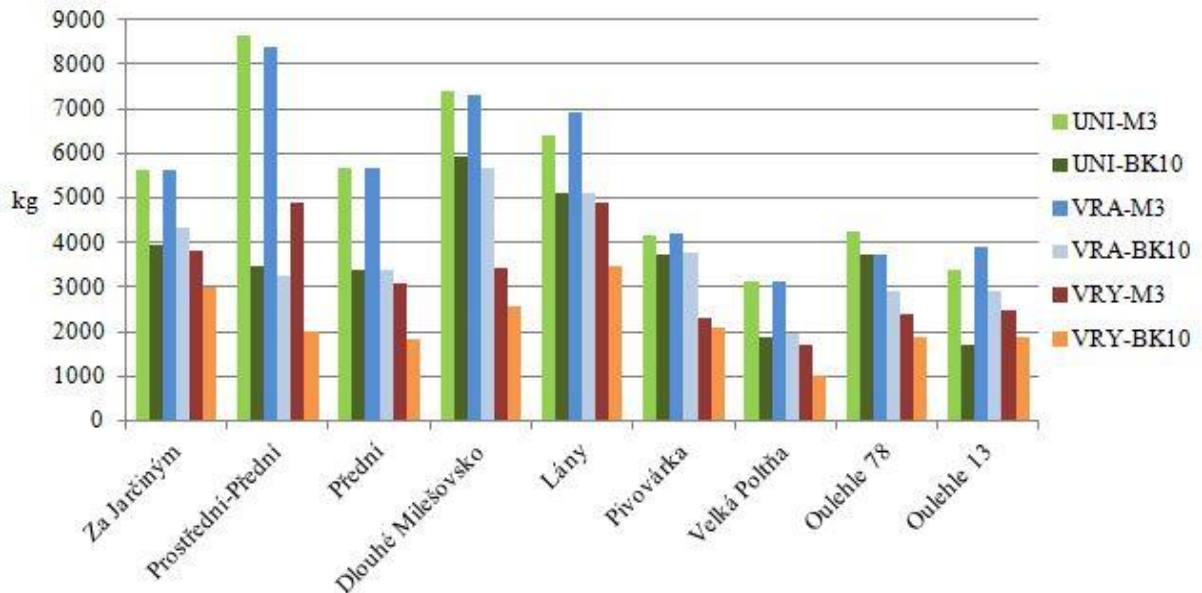
| varianta        | aplikace   | korekce normativu          | plánovaný výnos |
|-----------------|------------|----------------------------|-----------------|
| <b>UNI-M3</b>   | uniformní  | Mehlich 3                  | konstantní      |
| <b>UNI-BK10</b> | uniformní  | bilanční koeficient        | konstantní      |
| <b>VRA-M3</b>   | variabilní | Mehlich 3                  | konstantní      |
| <b>VRA-BK10</b> | variabilní | bilanční koeficient po 10% | konstantní      |
| <b>VRY-M3</b>   | variabilní | Mehlich 3                  | výnosová úroveň |
| <b>VRY-BK10</b> | variabilní | bilanční koeficient po 10% | výnosová úroveň |

Výsledky hodnocení průměrné zásoby přístupných živin v půdě na jednotlivých pozemcích vykázaly převážně nízkou zásobu přístupného fosforu (Obr. 21). Z hlediska porovnání variant výpočtu dávky se po stránce ekonomické i agronomické jako optimální ukázala varianta variabilní hnojení VRY-BK10. Při srovnání celkové dávky fosforu vycházela o něco lépe varianta VRY-M3, ale pouze na některých pozemcích a o zanedbatelné množství živin. Důležitějším aspektem pro vyhodnocení varianty VRY s korekcí pomocí bilančního koeficientu jako vhodnější variantu oproti VRY-M3 byl fakt, že rozděloval pozemky na více zón takovým způsobem, že aplikované dávky by v jednotlivých zónách měly co neoptimálněji odpovídat potřebám porostu. U obou variant VRY došlo na některých pozemcích ke snížení průměrné dávky P až o více než 50 % nejen oproti uniformním, ale i variabilním variantám hnojení bez zohlednění výnosové úrovně.

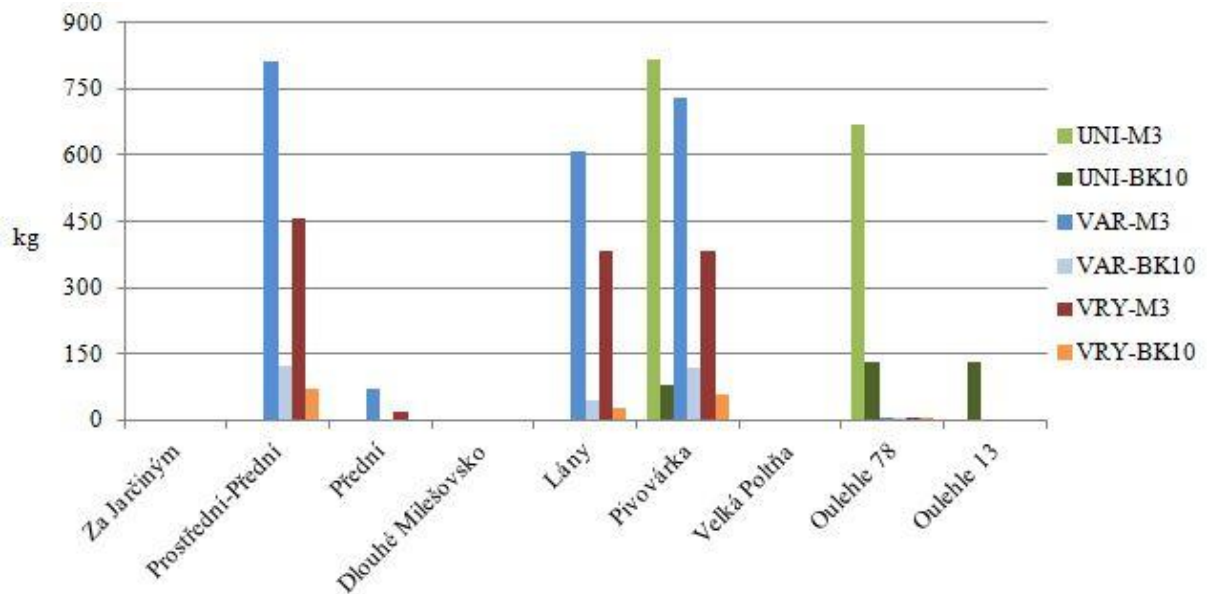


Obr. 21 Celkové množství fosforu potřebného pro hnojení pozemků při jednotlivých variantách hnojení; uvedeno v kg čistých živin

Kategorie obsahu K na sledovaném území převažovala dobrá, pouze pozemek Dlouhé Milešovsko byl hodnocen jako vyhovující a vyžaduje dosycení formou navýšení dávek o 25 % (Obr. 22). U vyhodnocených dávek K z jednotlivých variant byly zaznamenány poměrně velké rozdíly. Jako nejvhodnější metoda by pro aplikaci draselných hnojiv byla doporučena opět varianta VRY-BK10 pro všechny pozemky. Nejenže zohledňuje prostorové rozdíly v obsahu živin a ve výnosové úrovni, vychází nejlépe i po ekonomické stránce, protože množství aplikovaných hnojiv bylo na celé území nejnižší. Pro srovnání s uniformní variantou UNI-M3 rozdíl činí dokonce 60 % čistých živin.



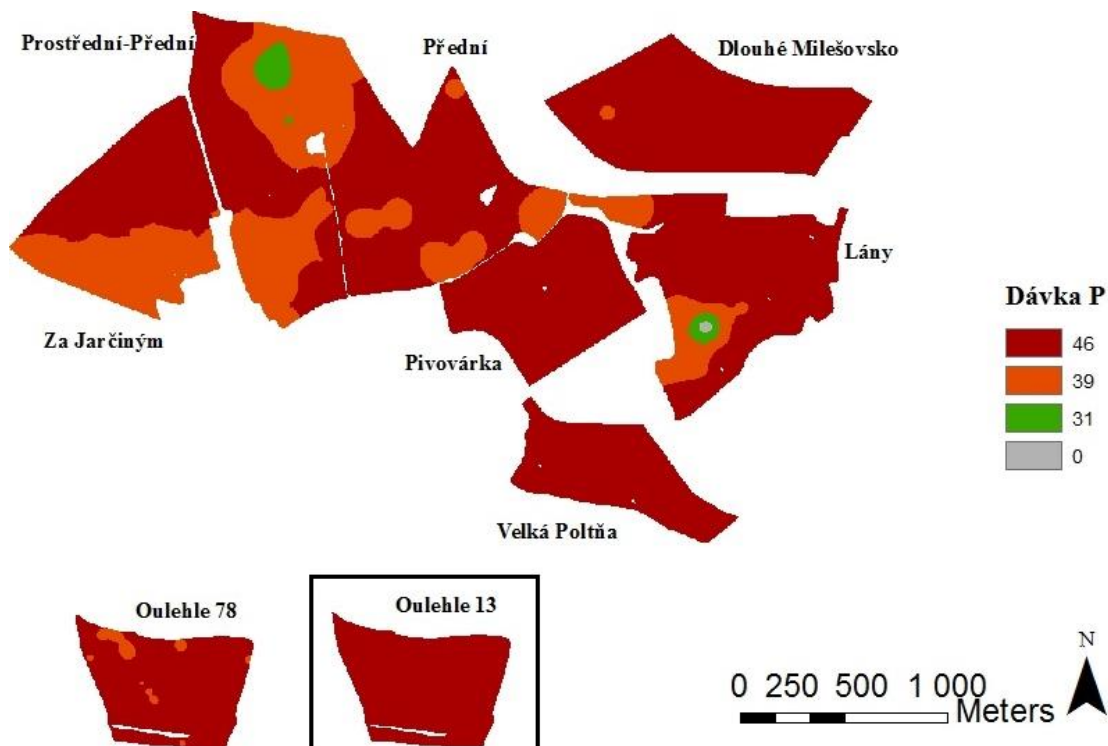
Obr. 22 Celkové množství draslíku potřebného pro hnojení pozemků při jednotlivých variantách hnojení; uvedeno v kg čistých živin



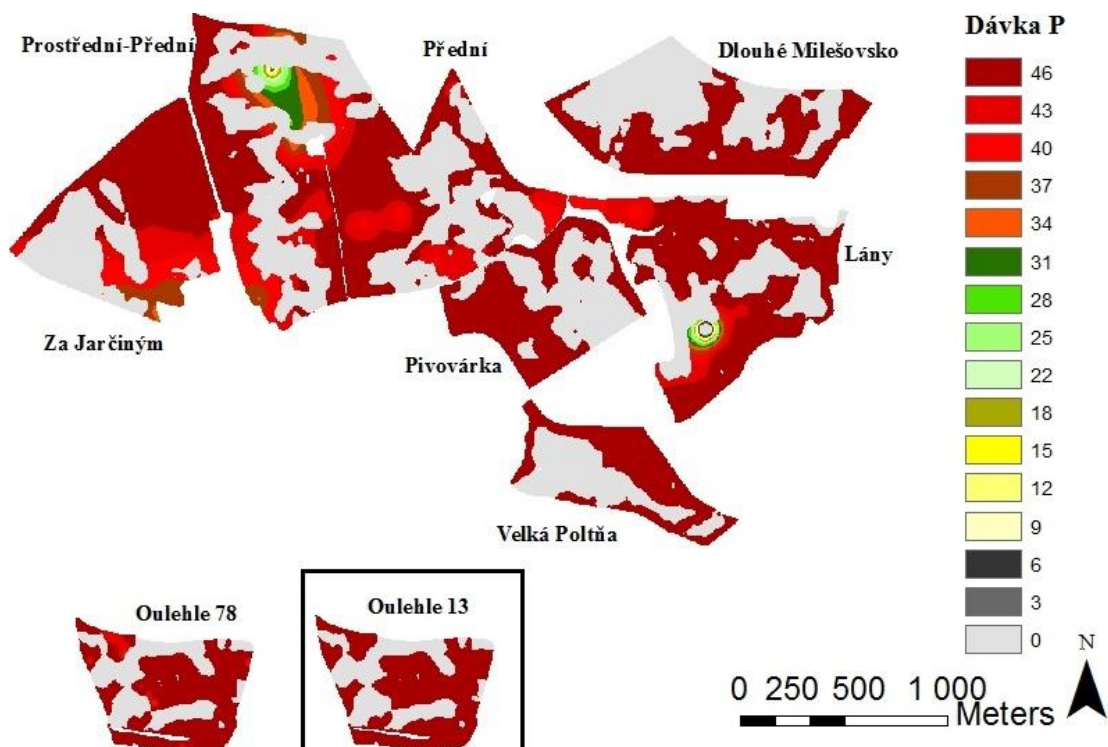
Obr. 23 Celkové množství hořčíku potřebného pro hnojení pozemků při jednotlivých variantách hnojení; uvedeno v kg čistých živin

Hodnocení obsahu přístupného Mg (Obr. 23) vykazovalo mezi jednotlivými variantami hnojení velmi velké rozdíly ve výsledných dávkách živiny. Pro pozemky Za Jarčíným, Dlouhé Milešovsko a Velká Poltňa

ani jedna z variant nestanovila potřebu hnojení z důvodu vysokého obsahu Mg. Z šesti variant výpočtu dávky dosáhla variabilní varianta se zohledněním výnosové úrovně (VRY) nejlepší výsledek z pohledu celkového množství aplikovaných živin.



Obr. 24 Příklad mapy výsledných dávek fosforu ( $P \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) pro variantu variabilní aplikace dle klasifikace zásobenosti do 5ti tříd zásobenosti (VRA-M3)



Obr. 25 Příklad mapy výsledných dávek fosforu ( $P \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) pro variantu variabilní aplikace se zohledněním výnosových hladin a klasifikací dle bilančního koeficientu (VRY-BK10)

## **Závěr**

Výsledky porovnání stanovení dávek živin poukázaly na význam variabilní aplikace, která se projevila optimálním členěním dávek hnojiv po pozemcích. Konkrétně se jedná o metodu VRY-BK10, tedy variantu, při které byly zohledňovány nejen prostorové rozdíly v obsahu živin (i rozdíly v zrnitosti na pozemku), ale také výnosová úroveň. Právě zohlednění výnosové úrovně se jeví jako podstatné, neboť umožňuje podpořit výnosné části na pozemku a naopak snížit dávku na místech s nízkou úrovní výnosu. Současně proběhla korekce s využitím bilančního koeficientu, který mohl rozdělit sledované pozemky do více než pěti tříd a lépe tak vystihoval úroveň zásobenosti půd živinami, aniž by došlo ke zvýšení nákladů na vlastní průzkum. Podobně ekonomické hodnocení prokázalo vhodnost varianty VRY-BK10, v případě P vykazala snížení množství aplikovaných látek přibližně o 38 %, u K o 60 % a Mg dokonce o 90 % oproti variantě UNI-M3. Při srovnání s uniformní variantou s korekcí dle bilančního koeficientu došlo k celkovému snížení dávky o 51 % u P, 42 % u K a 26 % u Mg.

### III. SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ

Cílem metodiky je návrh postupů tvorby aplikačních map pro variabilní aplikaci hnojiv v precizním zemědělství, které bude zohledňovat plošnou nevyrovnanost obhospodařovaných pozemků. Vychází z metod digitálního mapování půdy a optimalizace půdního vzorkování pro efektivní zachycení prostorových změn agrochemických vlastností půdy a následně tvorby celoplošných půdních map. Pozornost je také věnována způsobu stanovení dávky variabilní aplikace hnojiv pomocí geografických informačních systémů (GIS) s ohledem na stav zásobenosti půd přístupnými živinami a identifikaci rozdílných výnosových úrovní v rámci jednotlivých pozemků. Součástí metodiky je také seznámení s výsledky porovnání navrhovaných postupů na vybraném zemědělském podniku a jejich vyhodnocení s ohledem na celkové množství aplikovaných hnojiv a přesnost rozložení dávek v rámci půdních bloků.

Základním inovačním prvkem předložené metodiky je návrh výpočtu dávky hnojení pro variabilní aplikaci minerálních hnojiv se zohledněním produkčních zón na jednotlivých pozemcích z dostupných dat DPZ a výnosových záznamů a současně korekcí normativní dávky dle úrovně zásobenosti půd živinami z půdního vzorkování.

### IV. POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY

Rozsah využití metodiky se předpokládá u zemědělských subjektů využívající technologie precizního zemědělství. Jedná se především o zemědělské podniky uplatňující postupy variabilní aplikace hnojiv, poradenské subjekty v oblasti výživy a hnojení polních plodin, podniky poskytující služby v oblasti zemědělství a výzkumné organizace, jako metodický postup pro další výzkum a v odborném vzdělávání.

### V. EKONOMICKÉ ASPEKTY

Předpokládané přínosy vyplývají z podstaty variabilní aplikace hnojiv, která představuje postup racionálního využívání minerálních hnojiv při hospodaření na zemědělské půdě. Výsledky porovnání navrhovaných postupů poukázaly na význam variabilní aplikace, která se projevila optimálním členěním dávek hnojiv po pozemcích. Konkrétně se jedná o variantu, při které byly zohledňovány nejen prostorové rozdíly v obsahu živin, ale také dosahovaná výnosová úroveň a její plošná nevyrovnanost v rámci pozemků. Právě zohlednění výnosové úrovně se jeví jako podstatné, neboť umožňuje podpořit výnosné části na pozemku a naopak snížit dávku na místech s nízkou úrovní výnosu. Ekonomické hodnocení na vybraných pozemcích zemědělské společnosti Rostěnice a.s. prokázalo v případě aplikace fosforečných hnojiv snížení množství aplikovaných látek přibližně o 38 %, v případě u draselných hnojiv o 60 % oproti variantě uniformní aplikace.

## VI. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- Adamchuk, V. I., Hummel, J. W., Morgan, M. T., Upadhyaya, S. K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2004, vol. 44, no. 1, pp. 71-91. ISSN 0168-1699
- Adamchuk, V. I., Viscarra, R. A., Marx, D. B., Samal, A. K. Enhancement of On-the-Go Soil Sensor Data Using Guided Sampling, 23.6., 2009; [http://bse.unl.edu/adamchuk/presentations/ICPA\\_2008.pdf](http://bse.unl.edu/adamchuk/presentations/ICPA_2008.pdf).
- Baumgardner, M. F., Silva, L. F., Biehl, L. L., Stoner, E. R., Brady, N. C. Reflectance Properties of Soils, *Advances in Agronomy*, pp. 1-44: Academic Press, 1985. ISBN 0065-2113
- Ben-Dor, E., Demattê, J. Remote sensing of soil in the optical domains. *Land Resources Monitoring, Modeling, and Mapping with Remote Sensing; Thenkabail, PS, Ed.* 2015, pp. 733-787.
- Ben-Dor, E., Chabrillat, S., Dematt, J. A. M., Taylor, G. R., Hill, J., Whiting, M. L., Sommer, S. Using Imaging Spectroscopy to study soil properties. *Remote Sensing of Environment*. 2009, vol. 113. ISSN 00344257
- Beránek, K., Klement, V. Variabilita agrochemických vlastností zemědělské půdy dle výsledků agrochemického zkoušení zemědělských půd v období 1999-2004. *Bulletin: Sekce úřední kontroly*. 2007, XV, 4/2007, [20.7.2009], 4-7 str. <http://www.ukzuz.cz/Uploads/7792-7-42007pdf.aspx>
- Blackmore, S., Godwin, R. J., Fountas, S. The Analysis of Spatial and Temporal Trends in Yield Map Data over Six Years. *Biosystems Engineering*. 2003, vol. 84, no. 4, pp. 455-466. 4//. ISSN 1537-5110
- Borůvka, L. *Variabilita půdních vlastností a jejich hodnocení*. Habilitační práce, Katedra pedologie a geologie, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha, 2001. 151.
- Borůvka, L. Digitální mapování půd, *In: Kozák, J. et al. (eds.) Atlas půd České republiky*, pp. 31-40, Praha: ČZU Praha, 2009. ISBN 9788021320086
- Brodský, L., Vaněk, V., Száková, J., Štípek, K. Spatial heterogeneity of soil properties. *Rostlinná Výroba*. 2001, vol. 47, no. 12, pp. 521-528. ISSN 0370663X
- Čermák, P., Mühlbachová, G., Káš, M., Pechová, M., Lošák, T., Hlušek, J., Kulhánek, M., Sedlář, O., Balík, J. Metodický postup pro optimalizaci hnojení fosforem na zemědělských půdách, včetně půd karbonátových, Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., 2018, p. 33.
- 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)
- Dinkins, C. P., Jones, C. Soil Sampling Strategies. *Agriculture and Natural Resources (Fertilizers)*. 2008, 4 str. <http://msuextension.org/publications/AgandNaturalResources/MT200803AG.pdf>
- 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
- Gao, X., Huete, A. R., Ni, W. G., Miura, T. Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sensing of Environment*. 2000, vol. 74, no. 3, pp. 609-620. Dec. ISSN 0034-4257
- Gotway, C. A., Ferguson, R. B., Hergert, G. W., Peterson, T. A. Comparison of kriging and inverse-distance methods for mapping soil parameters. *Soil Science Society of America Journal*. 1996, vol. 60, no. 4, pp. 1237-1247. ISSN 03615995
- 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
- Heiniger, R. W., McBride, R. G., Clay, D. E. Using soil electrical conductivity to improve nutrient management. *Agronomy Journal*. 2003, vol. 95, no. 3, pp. 508-519. ISSN 00021962
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., Ferreira, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 2002, vol. 83, no. 1-2, pp. 195-213. Nov. ISSN 0034-4257
- Huete, A., Justice, C., Liu, H. Development of Vegetation and Soil Indexes for Modis-Eos. *Remote Sensing of Environment*. 1994, vol. 49, no. 3, pp. 224-234. Sep. ISSN 0034-4257



- Christy, C. D. Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2008, vol. 61, no. 1, pp. 10-19. ISSN 0168-1699
- Isaaks, E. H., Srivastava, R. M. *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1989, 561 s. ISBN 0195050126
- Jandák, J., Prax, A., Pokorný, E. *Půdoznalství*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2004, 142 s. ISBN 80-7157-559-3
- Klement, V., Smatanová, M., Trávník, K. *Fifty years of Agrochemical Testing of Agricultural soils in the Czech Republic (In Czech: Padesát let agrochemického zkoušení zemědělských půd v České republice)*. Brno: Central Institute for Supervising and Testing in Agriculture (UKZUZ), 2012, 96 s. ISBN 978-80-7401-062-0; [http://eagri.cz/public/web/file/216024/Publikace\\_50\\_a\\_40\\_let\\_AZZP\\_2012.pdf](http://eagri.cz/public/web/file/216024/Publikace_50_a_40_let_AZZP_2012.pdf).
- Klír, J., Kunzová, E., Čermák, P. *Frame methodics of plant nutrition and fertilization (In Czech: Rámcová metodika výživy rostlin a hnojení)*, 2. Prague: Crop Research Institute., 2008. ISBN 978-80-87011-61-4
- Krivoruchko, K. Empirical Bayesian Kriging implemented in ArcGIS Geostatistical Analyst. 2012, vol. 15, no. 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)
- Lagacherie, P., McBratney, A. B., Voltz, M., Global Workshop on Digital Soil, M. *Digital soil mapping : an introductory perspective*. Amsterdam; Boston: Elsevier, 2007, 600 s. ISBN 9780444529589
- 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
- Lesch, S. M. Sensor-directed response surface sampling designs for characterizing spatial variation in soil properties. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2005, vol. 46, no. 1-3, pp. 153-179. ISSN 0168-1699
- Lilienthal, H. *Entwicklung eines bodengestützten Fernerkundungssystems für die Landwirtschaft*. Braunschweig: Bundesforschungsanst. für Landwirtschaft (FAL), 2003, 170 s. ISBN 3933140765
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. *Remote sensing and image interpretation*, 3rd. New York: Wiley & Sons, 1994, 751 s. ISBN 9780471577836
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., Chipman, J. W. *Remote sensing and image interpretation*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008. ISBN 9780470052457
- Lukas, V., Křen, J. Generation of application maps for the base fertilization from results of agrochemical analyses of soil samples. In Ryant, P. et al. *Proceeding of Ph.D. students conference MendelNet'05 Agro*, Brno: AF MZLU v Brně, 2005, p. 80-7157-905-X
- Lukas, V., Neudert, L. Optimization of soil sampling in sustainable agricultural systems. *Növénytermelés (Crop Production)*. 2010, vol. 59, no. Supplement 1, pp. 89-92. ISSN 0546-8191 (online 2060-8543)
- 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., Křen, J. Mapping of soil conditions in precision agriculture. *Acta Agrophysica* 2009, vol. 13, no. 2, pp. 393-405. 2009. ISSN 1234-4125
- Lukas, V., Neudert, L., Novák, J. Variabilní aplikace hnojiv v precizním zemědělství. *Agromanuál*. 2017, vol. 12, no. 8, pp. 64-67. ISSN 1801-7673
- Lukas, V., Neudert, L., Novák, J., Křen, J. Estimation of Soil Physico-chemical Properties by On-the-go Measurement of Soil Electrical Conductivity. *Agriculturae conspectus scientificus*. 2018b, vol. 83, no. 1, pp. 93-98. ISSN 1331-7768
- Lukas, V., Novák, J., Neudert, L., Paulová, N., Širůček, P. Metody analýzy a interpretace půdních vlastností pro tvorbu aplikačních map v precizním zemědělství. *Úroda*. 2018c, vol. LXVI, no. vědecká příloha, pp. 319-324. ISSN 0139-6013

- Lukas, V., Ryant, P., Neudert, L., Dryšlová, T., Gnip, P., Smutný, V. *Tvorba aplikačních map pro základní hnojení plodin v precizním zemědělství*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2011, 36 s. ISBN 978-80-7375-561-4
- 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
- Meer, F. v. d., Jong, S. M. d. *Imaging spectrometry: Basic principles and prospective applications*. Dordrecht: Springer, 2006, 403 s. ISBN 9781402001949
- 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
- Minařík, R., Žížala, D., Lukas, V., Kraus, M. *Optimalizace vzorkování půd s využitím spektrálních dat pro účely lokálně cílené agrotechniky*. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., 2018, 82 s. ISBN 978-80-87361-95-5
- Minasny, B., McBratney, A. B., Walvoort, D. J. J. The variance quadtree algorithm: Use for spatial sampling design. *Computers and Geosciences*. 2007, vol. 33, no. 3, pp. 383-392. ISSN 00983004
- Neudert, L., Lukas, V., Altmann, J., Dryšlová, T., Gnip, P., Holý, S., Charvát, K., Kocurek, V., Kroulík, M., Křen, J., Křivánek, Z., Loch, T., Pospíšil, J., Ryant, P., Smutný, V., Šmoldas, R., Vondra, M. *Precizní zemědělství. Technologie a metody v rostlinné produkci*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015, 240 s. ISBN 978-80-7509-311-0
- Pierce, F. J., Nowak, P. Aspects of Precision Agriculture. *Advances in Agronomy*. 1999, vol. 67, pp. 1-85. ISSN 0065-2113
- 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)
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Proc. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Goddard Space Flight Center, NASA SP-351*, United States: Science and Technical Information Office, NASA, Washington, DC,, 1973, p. 309-317. ISBN
- Řezník, T., Lukas, V., Charvát, K., Charvát Jr, K., Horáková, Š., Křivánek, Z., Herman, L. MONITORING OF IN-FIELD VARIABILITY FOR SITE SPECIFIC CROP MANAGEMENT THROUGH OPEN GEOSPATIAL INFORMATION. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2016, vol. XLI-B8, pp. 1023-1028. ISSN 2194-9034
- Shaner, D. L., Khosla, R., Brodahl, M. K., Buchleiter, G. W., Farahani, H. J. How well does zone sampling based on soil electrical conductivity maps represent soil variability? *Agronomy Journal*. 2008, vol. 100, no. 5, pp. 1472-1480. ISSN 00021962
- Schmidhalter, U., Raupenstrauch, J., Selige, T., Bobert, J. Geophysikalische Erfassung von Standorteigenschaften. *Precision Agriculture: Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis*. 2002, 53-64 str. [http://www.preagro.de/Ergebnisse/Zwischenbericht2002/CD%20Tagungsband/2\\_4\\_Geophysik.pdf](http://www.preagro.de/Ergebnisse/Zwischenbericht2002/CD%20Tagungsband/2_4_Geophysik.pdf)
- Smatanová, M. Pracovní postupy pro agrochemické zkoušení zemědělských půd v České republice v období 2017 až 2022. Metodický pokyn č. 9/SZV, UKZUZ Brno, 2018, p. 25.
- Smatanová, M., Němec, P., Sušil, A. *Porovnání vývoje agrochemických vlastností půd - za období 2005 - 2010 a 2011 - 2016*, 978-80-7401-148-1, Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brno, 2017.
- Smatanová, M., Sušil, A. *Výsledky agrochemického zkoušení zemědělských půd za období 2012–2017*, 978-80-7401-162-7, Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brno, 2018.
- 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

- 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)
- Van Groenigen, J. W., Siderius, W., Stein, A. Constrained optimisation of soil sampling for minimisation of the kriging variance. *Geoderma*. 1999, vol. 87, no. 3-4, pp. 239-259. ISSN 00167061
- 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)
- Zbiral, J. *Jednotné pracovní postupy ÚKZÚZ. Analýza půd I, 4. vydání*. Brno: ÚKZÚZ, 2016. ISBN
- Zemek, F., Píkl, M., Lukas, V., Ždímal, V., Širůček, P., Kraus, M. Hodnocení plošné heterogenity vybraných půdních vlastností pozemků na základě obrazové spektroskopie a satelitních dat, Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i., 2018.
- 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
- Žížala, D., Krása, J., Báčová, M., Zelenková, K., Laburda, T., Novotný, I. *Monitoring erozního poškození půd v ČR nástroji dálkového průzkumu Země*. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., 2016, 156 s. ISBN 978-80-87361-63-4

## VII. SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE

- Lukas, V., Neudert, L. Sensorové měření porostů zemědělských plodin pro variabilní aplikaci hnojiv a pesticidů, Mendelova univerzita v Brně, 2016, p. 52.
- Lukas, V., Neudert, L., Křen, J. Využití dálkového průzkumu pro lokálně cílenou agrotechniku. *Mechanizace*. 2017, vol. 2017, no. 5, pp. 62-63. ISSN 0373-6776
- Lukas, V., Neudert, L., Novák, J. Mapping of soil spatial variability by on-the-go measurement of soil electrical conductivity In. *3rd International Scientific Conference Sustainability challenges in agroecosystems*, Osijek, Croatia: Croatian Soil Tillage Research Organization, 2017, p. 90. ISBN 978-953-7871-62-8
- Lukas, V., Neudert, L., Novák, J. Variabilní aplikace hnojiv v precizním zemědělství. *Agromanuál*. 2017, vol. 12, no. 8, pp. 64-67. ISSN 1801-7673
- Lukas, V., Neudert, L., Novák, J., Křen, J. Estimation of Soil Physico-chemical Properties by On-the-go Measurement of Soil Electrical Conductivity. *Agriculturae conspectus scientificus*. 2018, vol. 83, no. 1, pp. 93-98. ISSN 1331-7768
- Lukas, V., Neudert, L., Novák, J., Paulová, N. Identification of spatial variability of soil physico-chemical properties for precision farming. *International Scientific Journal Mechanization in agriculture & Conserving of the resources*. 2018, vol. 64, no. 5, pp. 117-119. ISSN 2603-3704
- Lukas, V., Neudert, L., Novák, J., Širůček, P., Kramář, M., Rodriguez Moreno, F., Zemek, F. Využití dálkového průzkumu pro hodnocení stavu porostů zemědělských plodin. *Úroda*. 2016, vol. 64, no. 12, pp. 67-73. ISSN 0139-6013
- Lukas, V., Neudert, L., Novák, J., Žížala, D., Píkl, M., Kraus, M. Mapování plošné variability fyzikálně-chemických vlastností půdy pomocí měření elektrické konduktivity. *Úroda*. 2017, vol. LXV, no. vědecká příloha, pp. 437-440. ISSN 0139-6013
- Lukas, V., Neudert, L., Širůček, P., Kraus, M., Novák, J., Mezera, J., Zemek, F., Píkl, M., 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., Zemek, F., Kraus, M., Novák, J., Žížala, D. Využití dálkového průzkumu pro lokálně cílenou agrotechniku polních plodin In. *Praktické využití GIS v lesnictví a zemědělství 2017*, Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2017, p. 978-80-7509-495-7
- Lukas, V., Novák, J., Neudert, L., Paulová, N., Širůček, P. Metody analýzy a interpretace půdních vlastností pro tvorbu aplikačních map v precizním zemědělství. *Úroda*. 2018, vol. LXVI, no. vědecká příloha, pp. 319-324. ISSN 0139-6013
- Mezera, J., Lukas, V., Elbl, J. Evaluation of crop yield spatial variability in relation to variable rate application of fertilizers In. *MendelNet 2017: Proceedings of International PhD Students Conference*, Brno: Mendel University in Brno, 2017, p. 86-91. ISBN 978-80-7509-529-9
- 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
- Minařík, R., Žížala, D., Lukas, V., Kraus, M. *Optimalizace vzorkování půd s využitím spektrálních dat pro účely lokálně cílené agrotechniky*. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., 2018, 82 s. ISBN 978-80-87361-95-5
- Zemek, F., Píkl, M., Lukas, V., Ždímal, V., Širůček, P., Kraus, M. *Hodnocení plošné heterogenity vybraných půdních vlastností pozemků na základě obrazové spektroskopie a satelitních dat*. Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i., 2018. ISBN

## VIII. POZNÁMKY

Autoři: Ing. Vojtěch Lukas, Ph.D. - Mendelova univerzita v Brně  
Ing. Lubomír Neudert, Ph.D. - Mendelova univerzita v Brně  
Ing. Petr Širůček - ROSTĚNICE a.s.  
Ing. Michal Kraus - ROSTĚNICE a.s.  
Ing. Jaroslav Novák, Ph.D. - Mendelova univerzita v Brně  
Ing. Jiří Mezera - Mendelova univerzita v Brně  
Doc. Ing. Mgr. František Zemek, Ph.D. - Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i. (Czechglobe)  
Ing. Miroslav Píkl, Ph.D. - Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i. (Czechglobe)  
Ing. Daniel Žížala, Ph.D. - Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., Oddělení půdní služby

Název: **Postupy tvorby aplikačních map se zohledněním variability agrochemických vlastností půdy a výnosové úrovně pozemků**

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

Tisk: Mendelova univerzita v Brně

Počet stran: 44

Náklad: 50 ks.

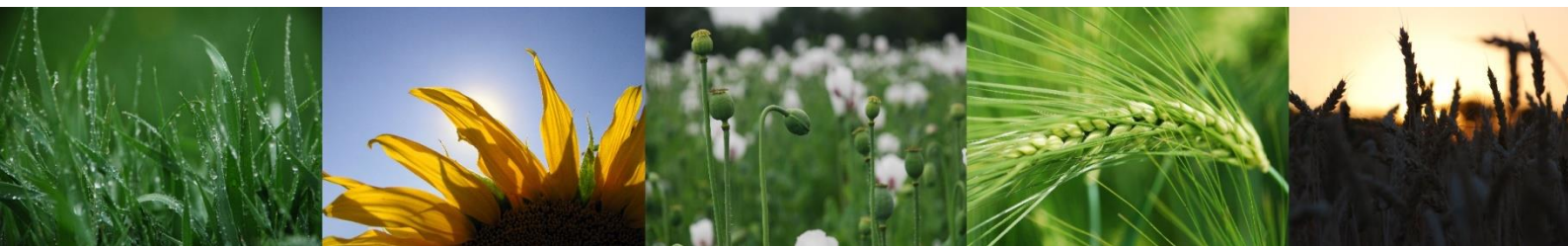
Vyšlo v roce 2018

Vydáno bez jazykové úpravy

Metodika je poskytována bezplatně

Kontakt na autora: vojtech.lukas@mendelu.cz





Mendelova univerzita v Brně, 2018

ISBN 978-80-7509-630-2