

Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů
Katedra agroekologie a biometeorologie



**Studium variability výskytu svízele přítuly
na zemědělské půdě**
Diplomová práce

Autorka práce: Bc. Dagmar Hrušková

Obor studia: Rostlinná produkce

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hamouz, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Studium variability výskytu svízele přítuly na zemědělské půdě " jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne: _____

Podpis autorky práce: _____

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Pavlovi Hamouzovi, Ph.D., za odborné vedení mé diplomové práce, cenné rady, vstřícnost a čas věnovaný odborným konzultacím.

Studium variability výskytu svízele přítuly na zemědělské půdě

Souhrn

Prostorové uspořádání plevelů na orné půdě je variabilní, obvykle vytváří různě veliká ohniska s různou hustotou. Spolehlivé mapování populací plevelů, jejich identifikace a kvantifikace ve spojení s cílenými regulačními zásahy může zajistit významné snížení aplikace herbicidů. Snížení používání herbicidů vede k udržitelné a ekonomické regulaci zaplevelení. Cílená regulace zaplevelení zahrnuje celou řadu kroků, základem je však podrobné zmapování pozemků.

V literárním přehledu se zabývám variabilitou prostorového uspořádání plevelů na orné půdě, vyjádřením prostorové variability plevelů a metodami vhodnými pro mapování populací plevelů. Zvolená metoda mapování by měla být dostatečně přesná, aby mohly být vytvořeny spolehlivé mapy, které budou odrážet skutečný výskyt plevelů na pozemku a umožní cílený regulační zásah. Mirkovariabilita prostorového uspořádání plevelů s nízkou hustotou populace jako je svízel přítuly, může významně snižovat přesnost map vytvořených na základě vzorků. Experimentální část práce proto byla zaměřena na posouzení přesnosti stanovení hustoty populace tohoto druhu při různých způsobech a intenzitě vzorkování.

Na ploše 50 x 60 m v porostu ozimého ječmene bylo v jarním období provedeno kontinuální mapování populace svízele přítuly. Pomocí RTK navigačního systému byla zjištěna poloha jednotlivých rostlin svízele přítuly. Pro účely simulace byla plocha 50 x 60 m rozdělena do 320 aplikačních buněk o rozměrech 3 x 3 m. V těchto buňkách byly simulovány různé způsoby vzorkování. Bylo navrženo 13 vzorkovacích schémat s narůstajícím počtem dílčích vzorků o velikosti 0,0625 m² uvnitř vzorkovaných buněk. Pro tyto způsoby vzorkování byly stanoveny chyby odhadu (rozdíl mezi odhadovanou a skutečnou hustotou populace v jednotlivých buňkách). Byla vypočtena střední absolutní chyba odhadu MAE (*Mean Absolute Error*) a relativní chyba odhadu RPE (*Relative Prediction Error*).

Hodnoty vypočtených chybových kvantifikátorů (MAE, RPE) vykazovaly stálý klesající trend se vzrůstající intenzitou vzorkování. Na základě zjištěných dat bylo vypočteno, že k udržení hodnoty MAE pod 0,5, by bylo potřeba vzorkovat 13,85 % z celkové plochy, pro MAE 1 vzorkovat pouze 3,13 % plochy. K udržení hodnoty RPE pod 1, by bylo zapotřebí

vzorkovat 8,8 % z celkové plochy. Z výsledků tedy vyplývá, že vzorkování populací s nízkou hustotou vyžadují velmi vysokou intenzitu vzorkování.

Klíčová slova: svízel přítula, prostorová variabilita, vzorkování, mapování

Spatial variability of *Galium aparine* L. distribution on arable land

Summary

The spatial arrangement of weeds on arable land is variable, usually producing differently sized patches of varying density. Reliable mapping of weed populations, their identification and quantification in conjunction with site-specific weed management can provide significant reductions in the application of herbicides. Reducing the use of herbicides leads to both sustainable and economical weed control. The site-specific weed management involves a number of steps, but the basis is a detailed mapping of the fields.

In the literature I deal with the variability of the spatial arrangement of weeds on arable land and the expression of the spatial variability of weeds. I also describe manual and automated methods for weed detection as part of precision farming. The chosen mapping method should be sufficient to provide reliable maps that will reflect the actual occurrence of weeds on the field. The work was focused on assessing the accuracy of weed density estimation in different sampling intensities and schemes.

Continuous sampling of cleavers population in winter barley was carried out on an area of 50 x 60 m. The position of individual cleavers plants was determined by RTK navigation system. For simulation purposes, the 50 x 60 m area was divided into 3 x 3 m cells. Discrete sampling with various intensities and subsample positions was simulated in these cells. The Mean Absolute Error (MAE) and the Relative Prediction Error (RPE) were calculated to compare sampling errors for all simulated sampling strategies. The values of both error measures showed a steady decreasing trend with increasing sampling intensity., it was calculated on the basis of the data, that in order to keep the MAE below 0.5, it would be necessary to sample 13.85% of the total area and for the MAE below 1 needs to sample at least 3.13% of the area. To keep the RPE below 100%, it would be necessary to sample 8.8% of the total area. These results show that sampling of low-density populations requires very high sampling intensities.

Keywords: *Galium aparine*, spatial variability, sampling, mapping

Obsah

| | |
|--|----|
| 1. ÚVOD | 1 |
| 2. CÍL PRÁCE..... | 3 |
| 3. LITERÁRNÍ PŘEHLED | 4 |
| 3.1. Precizní zemědělství | 4 |
| 3.1.1. Cílená regulace zaplevelení | 5 |
| 3.2. Mapování výskytu plevelů..... | 6 |
| 3.2.1. Manuální metody mapování..... | 6 |
| 3.2.2. Automatizované metody mapování | 7 |
| 3.2.2.1. Pozemní senzorové systémy..... | 7 |
| 3.2.2.2. Dálkový průzkum | 8 |
| 3.3.3. Vzorkování výskytu plevelů | 9 |
| 3.3.3.1. Kontinuální vzorkování..... | 9 |
| 3.3.3.2. Diskrétní vzorkování..... | 10 |
| 3.3. Variabilita prostorového uspořádání populací plevelů na orné půdě | 12 |
| 3.3.1. Popis prostorové variability | 13 |
| 3.3.1.1. Interpolace..... | 15 |
| 3.4. Svízel přitula..... | 16 |
| 4. MATERIÁL A METODY | 18 |
| 4.1. Charakteristika stanoviště..... | 18 |
| 4.2. Mapování vzešlého plevele svízele přituly..... | 18 |
| 4.3. Zpracování dat | 19 |
| 4.3.1. Základní statistika | 19 |
| 4.3.2. Simulace různých způsobů vzorkování..... | 19 |
| 4.3.3. Analýza chyb vzorkování..... | 21 |
| 5. VÝSLEDKY | 23 |
| 6. DISKUSE | 28 |
| 7. ZÁVĚR..... | 30 |
| 8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 31 |

1. ÚVOD

Cílem hospodářů v zemědělské prvovýrobě je dosahovat maximálních zisků, vysokých výnosů a úrovně jakosti, stejně tak jako udržovat půdní úrodnost, nebo šetřit životní prostředí. Plevel, škůdci a choroby polních plodin mohou ohrozit tyto cíle a proto je nutná ochrana rostlin. Do 50. let 20. století u nás charakterizovala venkovskou krajinu drobnozrná mozaik plošek polí, luk, pastvin. Průměrná velikost pozemků se tak zvýšila z 0,23 ha v roce 1948 na cca 20 ha v současnosti (Podzhradská et al., 2014). Přitom dnes hospodaříme na půdních blokách, které mají 50 a více hektarů. Na takto rozsáhlých lánech je velmi obtížné naplánovat chemickou ochranu, tak aby ochrana zasáhla jen ty plevele, který přesahují práh škodlivosti a zároveň aby byla ekonomicky efektivní. Přitom zaplevelení vede k významným výnosovým a ekonomickým ztrátám, kvůli konkurenci o vodu, světlo a živiny. V současné době vnímáme půdní blok jako homogenní celek, přitom jednotlivé složky půdního bloku např. zaplevelení, jsou heterogenní.

Výskyt plevelů na orné půdě je tedy velmi nerovnoměrný. Prostorová variabilita výskytu plevelů vychází z jejich biologické charakteristiky, z používaného systému hospodaření, nebo agrotechniky. Například ohniska plevelů jsou často protáhlá ve směru zpracování půdy. Porozumění prostorové variabilitě zaplevelení je důležitou součástí optimalizace rostlinné produkce. Před vlastním rozhodováním o využití lokální aplikace je důležité, jak velkou plošnou nerovnoměrnost zaplevelení pozemek vykazuje. Čím je heterogenita pozemku z hlediska zaplevelení vyšší, tím výhodnější je využití lokálně specifického ošetření (Werner et Garbe, 1998). Pokud bude regulace zaplevelení zaměřena pouze na ohniska plevelů, nebo dojde k úpravě dávky podle hustoty zaplevelení, v konečném důsledku nejde jen o finanční přínos, cílená regulace zaplevelení má i environmentální přínos. Odplevelení porostu vyžaduje značné náklady, každoročně způsobí více jak 10 % ztráty na rostlinné produkci. Celosvětově náklady na herbicidy představují přes 60 % celkových nákladů na pesticidy (Kohout, 1993). Mikulka et Chodová (2000) uvádějí, že na regulaci plevelů je vynaloženo více než 72 % celkových nákladů v ochraně rostlin.

Přestože cílená regulace zaplevelení je již dnes proveditelná díky aplikační technice (Hamouz, 2014), tato metoda je pro většinu zemědělců nedostupná. Příčinou je vysoká pořizovací cena aplikační techniky a také problémy při získávání dat o zaplevelení. Odebráním dostatečného množství vzorků, lze usuzovat na distribuci plevelových populací na celé ploše pozemku. Právě strategie odběru vzorků, které odpovídají prostorové distribuci,

mohou zvýšit efektivitu výsledných map (Cardina et al., 1997). Mirkovariabilita prostorového uspořádání plevelů s nízkou hustotou populace jako je svízel přítula, může významně snižovat přesnost map vytvořených na základě vzorků. A protože práh škodlivosti tohoto plevelu je velmi nízký, Jursík et al. (2011) uvádí škodlivost u obilovin 0,1 až 0,5 rostlin/m², simulací různých způsobů vzorkování byly kvantifikovány a porovnány chyby odhadu proti skutečnému stavu.

2. CÍL PRÁCE

Cílem práce bude podrobné zmapování prostorového uspořádání populace svízele přítuly na vybrané lokalitě. Vědecká hypotéza předpokládá, že prostorová mirkovariabilita hustoty populací svízele přítuly značně snižuje přesnost map vytvořených na základě vzorků. Dalším cílem je proto navržení takových způsobů vzorkování, které zajistí nízkou chybu odhadu hustoty populace.

3. LITERÁRNÍ PŘEHLED

3.1. Precizní zemědělství

Precizní zemědělství (precision agriculture) je mezinárodně ujednocený název pro směry využívající nové technologie. Hlavním cílem je přizpůsobení pěstebních operací aktuálním podmínkám stanoviště, přičemž zásadou je provádět pěstební zásahy na správném místě, se správnou intenzitou a ve správný čas. Předpokladem je, že zmiňovanou variabilitu umíme identifikovat a stanovit (Lukas et al., 2011). Znalost určitého agronomicky významného znaku, např. zaplevelení pak představuje základní vstupní informaci pro cílené provádění pěstebních operací, např. cílenou aplikaci pesticidů (Lukas et al., 2011).

Tradičním přístupem v konvenčním zemědělství je uniformní obhospodařování pozemků. Nejmenší jednotkou agronomického rozhodování je hon, který je považován za homogenní prostředí, a na základě průměrné hodnoty z této plochy je volena intenzita pěstitelských zásahů. Naproti tomu lokálně specifický přístup zohledňuje rozdílné podmínky v rámci jednotlivých pozemků a přizpůsobuje pěstitelské vstupy konkrétním podmínkám daného stanoviště. Tento přístup přináší zvýšení produktivity práce, ale především ekonomické přínosy optimalizované rostlinné produkce, které vyplývají z optimalizace materiálních vstupů plynoucích do rostlinné produkce. Mezi nejvýznamnější materiálové vstupy patří hnojiva, pesticidy a PHM. Dalším přínosem je omezení rizika environmentálního znečištění nadměrnou aplikací agrochemických prostředků (Lukas et al., 2008). Türker (2005) potvrzuje, že cílená regulace zaplevelení může snížit množství herbicidů, ve srovnání s tradičními metodami chemické regulace. Také množství herbicidů v zrna obilovin může být sníženo o 25 - 55 %. Identifikaci a lokalizaci rozdílů v rámci pozemků umožnil rozvoj výpočetní techniky a vývoj globálních navigačních satelitních systémů (GNSS). Zpracování prostorových dat (dat s přiřazenou polohou) probíhá v geografických informačních systémech (GIS). Desktopové nebo mobilní programy, umožňují provádět sběr, zpracování, analýzy dat. Aplikační ovládací prvky slouží pro vlastní provedení diferencovaných zásahů. Na základě vstupní informace o intenzitě zásahu, tzn. aplikační mapy, umožňují změnu dávky hnojiva nebo postřiku, hloubky pracovního nářadí při zpracování půdy či automatickou navigaci mechanizace po pozemku (Lukas et al., 2008).

3.1.1. Cílená regulace zaplevelení

V běžné zemědělské praxi platí, že se na celý pozemek aplikuje jednotná dávka herbicidu, přestože některé jeho části vykazují jen slabý nebo nulový výskyt plevelů (Hamouz a kol. 2004). Cílená regulace zaplevelení jako součást precizního zemědělství naopak tuto variabilitu zohledňuje. Regulační zásah je uskutečněn pouze v těch částech pozemku, kde výskyt plevelů překračuje práh škodlivosti (Gerhards et al., 2000). Předpokládá se, že v místech s nulovým nebo podprahovým výskytem plevelů bude aplikace přípravku vynechána a na ošetřovaných částech bude dávka přizpůsobena stupni zaplevelení (Gerhards et al., 2000). Tím je možné dosáhnout významné úspory herbicidů, snížit náklady na produkci a omezit riziko znečištění životního prostředí agrochemikáliemi (Hamouz et al., 2004). Cílená regulace zaplevelení využívá metod, které činí systém cílené regulace zaplevelení poměrně komplexním a jeho uplatnění je možné pouze s využitím moderní zemědělské techniky, informačních a navigačních technologií. Realizace systému cílené regulace zaplevelení zahrnuje tedy celou řadu kroků (Hamouz, 2014).

Podle zásad integrované ochrany rostlin by regulace zaplevelení na jednotlivých pozemcích měla odpovídat skutečnému výskytu jednotlivých druhů plevelů. Pokud se plevele vyskytují v nízkých hustotách a nezpůsobují výnosové ztráty je zásah proti nim v daném roce neefektivní a v případě použití herbicidů navíc zbytečně dochází k zatěžování životního prostředí chemikáliemi. Pro posouzení nutnosti zásahu byly stanoveny tzv. prahy škodlivosti. Hodnota prahu škodlivosti udává, při jakém výskytu určitého plevelného druhu začíná docházet k negativnímu ovlivnění výnosu plodiny (Jursík et al., 2011). Ekonomickým prahem škodlivosti je taková hodnota zaplevelení, při jejímž překročení je již ošetření ekonomicky výhodné (Jursík et al., 2011; Hamouz et al., 2006). Většina autorů obecně uvádí jako práh škodlivosti v obilovinách:

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| - Svízel přítula | 0,1 - 0,5 rostlin /m ² |
| - jednoleté dvouděložné druhy | 40 - 50 rostlin /m ² |
| - trávovité plevele | 20 - 30 rostlin /m ² |

Celková pokryvnost plevelů by neměla překročit 5 % (Niemann, 1981; Wahmhoff et Heitefuss, 1985; Beer et Heitefuss, 1981).

Jak uvádí Hamouz (2014), pro skutečné praktické využití prahu škodlivosti však v mnoha případech chybí spolehlivé a současně časově nenáročné metody detekce škodlivých

organismů zohledňující možnou variabilitu uvnitř jednotlivých pozemků. Přitom právě tato variabilita poskytuje značný potenciál úspory pesticidů a to zejména v oblasti regulace zaplevelení.

Při vytváření informace o výskytu jednotlivých druhů a jejich agregaci je důležité dosáhnout co největšího přiblížení realitě a zároveň udržet spotřebu času na nízké úrovni (Hamouz, 2014).

3.2. Mapování výskytu plevelů

Precizní zemědělství nepovažuje pole jako jeden celek, ale jako agregace specifických dílčích jednotek (Backes et al., 1998) a mapování je jedním z postupů zjišťování prostorové variability zemědělských pozemků (Lukas et al., 2011). Mapy by měli poskytnout informace o zaplevelení, které by ale měli být vytvořeny z objektivního popisu prostorové variability (Wiles, 2005).

Prostorovou distribuci populací plevelů v rámci pozemku je možné mapovat manuálně nebo pomocí senzorové techniky (Hamouz, 2014). Rychlejší způsob mapování je pomocí automatizovaných metod využívajících senzorovou a výpočetní techniku. Pro oba způsoby mapování však platí, že intenzita vzorkování musí být dostatečná, aby bylo dosaženo dostatečně spolehlivé mapy, která bude odrážet skutečný výskyt plevelů na pozemku (Hamouz, 2014). Získání přesných dat o počtu plevelů je obtížné, vzhledem k velikosti mapovaného pole, druhové rozmanitosti a nedostatku standardizovaných metod pro odhad plevelných populací (Clay et al., 1999).

Ačkoliv precizní zemědělství již využívá mapy v rozhodovacích procesech, přesnost těchto map je stále sporná (Backes et al. 1998). Riziko opominutí plevelů při regulaci zaplevelení na základě těchto map se zdá být zanedbatelné. Avšak podcenění těchto plevelů může mít škodlivý důsledek nejen pro výnos. Příkladem může být svízel přítula, jehož práh škodlivosti je velmi nízký 0,1 rostliny na m² (Backes et al. 1998).

3.2.1. Manuální metody mapování

Při manuálním mapování je zaplevelení v porostu zjišťováno pomocí rámců o známé velikosti, v nichž je hodnocen počet jedinců jednotlivých druhů plevelů nebo jejich pokryvnost. Zvláště v případě hodnocení početnosti je manuální způsob mapování poměrně časově náročný a může být efektivní jen v situacích, kdy se na pozemku nachází velmi malé

množství plevelů. V takovém případě je hodnocení vzorkovaných ploch rychlé a dosažená úspora herbicidu vysoká (Hamouz, 2014). Přítomnost plevelů může být zaznamenána i z terénních vozidel, traktoru, nebo sklízecí mlátičky (Lutman et al., 2002). Lutman et al. (2002) ve svém projektu mapovali plevele pomocí pozemní techniky. V traktoru byla namontována záznamová obrazovka, kde byly dotykem zaznamenány plevele. S tímto způsobem byli praktické potíže, protože uživatel musel přerušit sledování pole a podívat se na obrazovku pro zadání informací. Na základě toho byl vyvinut alternativní systém pro rozpoznávání hlasu, kdy uživatel hovoří o názvu plevele do mikrofonu a počítač z těchto informací tvořil základní mapy. Na některých polích byly mapy plevele porovnávány s počty plevelů zaznamenaných v síti o hustotě 5 x 5 m. Mapy vytvořené z traktoru odpovídaly poměrně dobře s počtem plevelů zjištěných v mřížce. Tento způsob mapování má své omezení. Například při jízdě v pšenici ozimé na začátku jara nebylo možné mapovat nízké hustoty travovitých plevelů, zvláště když jsou malé. Navíc při mapování z terénního vozidla nebo traktoru pozorovatel nemůže vidět celou šířku záběru mezi jednotlivými jízdami, proto k odhadu nevizovaných míst je zapotřebí interpolačních metod jako je např. Kriging.

3.2.2. Automatizované metody mapování

Automatizované metody mapování využívají technologie nebo zařízení, které umožňují detekci plevelů v porostu (Türker, 2005). Pro automatizované metody mapování plevelů v kulturních plodinách existují dva obecné přístupy (Thompson et al., 1991) a to detekce pomocí pozemní sensorové techniky a dálkový průzkum (Hamouz, 2014). První spočívá v porovnání geometrických rozdílů mezi plodinou a plevelem (tvar listů, struktura rostlin). Druhý obecný přístup vychází z rozdílů spektrální odrazivosti vegetace a půdy (Benlloch et al., 1996).

3.2.2.1. Pozemní sensorové systémy

Pozemní systémy pro detekci plevelů lze rozdělit do dvou základních skupin. Na jedné straně stojí metody, které pomocí sensorů jsou schopny pouze rozlišit, zda se na určité ploše nalézají odpovídající množství biomasy a podle toho otevřít či uzavřít trysky postřikovače (Biller et Ihle, 2000). Protože takovýto systém rozlišuje pouze půdu a zelené rostliny, použití této metody je omezeno pouze na meziorostní období a to na strniště, nebo v meziřádcích širokořádkových plodin (Biller et Ihle, 2000). Kromě toho není možné rozlišit jednotlivé druhy plevelů, což komplikuje výběr herbicidů vhodných pro ošetření (Hamouz, 2014).

Druhá metoda spočívá v podrobné digitální analýze obrazu (Li et al., 2008). Za pomoci odpovídajících algoritmů lze odlišit plevele od kulturní rostliny, případně stanovit druhovou příslušnost plevelných rostlin (Gerhards et al., 2000). V počítači probíhá analýza snímků, přičemž se každá rostlina hodnotí jednotlivě. Rozpoznání plevelného druhu je na základě parametrů jeho tvaru. Software na zpracování obrazu pak umožňuje automatické vyhodnocení snímku a přiřazení prahu škodlivosti, tato data jsou základem pro cílenou regulaci (Li et al., 2008). Tyto postupy jsou náročné a pracují pomaleji (Hamouz, 2014) a ekonomické náklady těchto senzorů jsou vysoké (Andújar et al., 2012). Problémem této metody zůstávají vysoké náklady senzorů, relativně složité výpočty a nedostatek komerčně dostupných systémů (Andújar et al., 2012).

Sökefeld (1997) snímkoval plevele ve fázi klíčících rostlin pomocí CCD-kamery citlivé k NIR (*near-infrared*) záření. Rostliny pak byly po rozdělení obrysu přiřazovány k jednotlivým druhům podle tvarových parametrů (rozpětí listů, plocha, poměr šířky a délky, úhlová funkce obvodu rostliny). Dosáhl 62 % schopnosti rozpoznání plevelného druhu a po sloučení druhů do skupin podle citlivosti k herbicidním látkám dosáhl 80 % pravděpodobnosti správné volby účinné látky. Andújar et al. (2012) předpokládali, že zaplevelené oblasti mají vyšší obsah biomasy a že to lze určit pomocí výšky rostlin. Pro detekci plevelů využili ultrazvukový senzor. Ultrazvukové přístroje jsou založeny na měření odražených zvukových vln. Kdy do jednoho směru je vyslán krátký zvukový signál a po nárazu do na objekt se odražené vlny vrátí zpět do přijímače. Přístroj měří dobu zpoždění akustického signálu a přeměňuje ho na elektrické napětí. Výstupní napětí tak může být převedeno do vzdálenosti. Využití výše uvedených technologií je však třeba zlepšit s rychlejšími klasifikačními algoritmy a výkonnějším výpočetním hardwarem.

3.2.2.2. Dálkový průzkum

Většina metod dálkového průzkumu využívá pro detekci vegetace oblast elektromagnetického spektra v rozmezí od 400 do 2500 nm (Biller et Ihle, 2000). Významné rozdíly ve spektrální odrazivosti vegetace a půdy lze nalézt zejména v červeném a NIR pásmu (Hamouz, 2014). Při jejich použití odráží vegetace více dopadajícího slunečního záření než povrch půdy (Soille, 2000). I jednotlivé druhy rostlin mohou některých případů vykazovat rozdíly ve spektrální odrazivosti v určitých vlnových délkách. Tento poznatek je využit k identifikaci rozdílů mezi kulturními rostlinami a pleveli (Hantield et Pinter, 1993). Jak uvedl Brown et al. (1994), pro detekci plevelů můžeme využít jejich relativních charakteristik

spektrální odrazivosti, zejména s použitím informací přenášených v úzkých spektrálních pásmech v červených, zelených a blízkých infračervených vlnových délkách. Může se však jednat o identifikaci skupin druhů plevelů spíše než o jednotlivé druhy. Nedostatečnou identifikaci druhů potvrzuje i Benlloch et al. (1996), problém s rozlišením jednotlivých druhů zůstává kvůli vysoké variabilitě přírodních scén a nízkému rozlišení obrazů. Pro identifikaci ohnisek plevelů na základě spektrálních vlastností jsou využívány tzv. vegetační indexy, tedy matematické kombinace hodnot odrazivosti v jednotlivých spektrálních pásmech. Jedním z nejběžnějších vegetačních indexů je NDVI (Normalized Difference Vegetation index).

Jak uvádí Hamouz (2014), dálkový průzkum má v současné době pro cílenou regulaci zaplevelení jen malý význam. Rozlišení satelitních snímků není dostačující k tomu, aby bylo schopné zachytit plevele v časných růstových fázích. Na základě rozlišení satelitních snímků, by tak mohlo dojít k opomenutí rostlin (Martín et al., 2018), monitoring pomocí letadla či vrtulníku je pro vyšší rozlišení výhodnější (Hamouz, 2014).

3.3.3. Vzorkování výskytu plevelů

Exaktním způsobem vytváření map je přiřazování souřadnic jednotlivým nalezeným rostlinám. Většina technik používaných k odhadu hustoty plevelů je založena na terénních průzkumech (Colbach et al., 2000) a právě vhodné strategie odběru vzorků, které odpovídají prostorovému rozložení, mohou zvýšit efektivitu vzorkování (Cardina et al., 1997).

Shlukovitý výskyt plevelů zvyšuje nároky na počty odebíraných vzorků a tím značně zvyšuje časovou náročnost mapování (Hamouz et al., 2006; Rew et al., 1999). Je několik přístupů ke sběru dat o prostorovém rozložení plevelů. Pro mapování větších ploch je nutno použít metod diskrétního mapování, na malých plochách můžeme použít kontinuální zaznamenávání plevelů.

3.3.3.1. Kontinuální vzorkování

Při kontinuálním vzorkování jsou data sbírána po celé ploše, kde je zaznamenána přítomnost plevelů. Kontinuální mapování celé hodnocené plochy, je časově velmi náročné, proto je vhodné pouze v základním výzkumu pro mapování menších ploch o velikosti několika desítek až několika set čtverečních metrů (Hamouz, 2005).

3.3.3.2. Diskrétní vzorkování

Typický způsob diskrétního vzorkování populací plevelů spočívá v tom, že je vybrán určitý počet vzorkovacích ploch určité velikosti a v každé ploše se počítají plevele každého druhu (Rew et al., 1999). Mapovací metody a rozlišení zvolené pro tvorbu mapy bývá často ovlivněno účelem jejího použití, mapovaným plevelným druhem, velikostí plochy a také tím, zda je mapa používána k výzkumnému, nebo praktickému účelu (Rew et Cousens, 2001). Při diskrétním vzorkování populací plevelů v pravidelné síti se velikost hodnocené plochy obvykle pohybuje od 0,0025 do 2 m² a velikost použitého rastru pak od 1,8 x 1,8 m do 50 x 50 m (Colbach et al., 2000).

Diskrétní vzorkování je méně časově náročné oproti kontinuálnímu, přesto je hustší vzorkovací síť obtížně použitelná pro rozsáhlé plochy. Při diskrétním vzorkování rozsáhlé plochy tak může zůstat velká část plochy mezi vzorkovanými body nezhodnocená. Obecně platí, že je kvalita map ovlivněna metodou vzorkování, hustotou vzorkovací sítě a velikostí vzorků. Intenzita vzorkování je dána velikostí a počtem vzorkovaných ploch a souhrnně ji lze vyjádřit procentem vzorkované plochy oproti celkové ploše pozemku. Například, jestliže je hodnocen rámeček o ploše 1 m² na každém bodu sítě 20 x 20 m, je skutečně zmapováno pouze 0,25 % celkové plochy.

Ohniska plevelů vyskytující se v měřítku menším než je vzdálenost mezi body rastru, často nebudou zaznamenána a dokonce i nejpokročilejší matematické metody interpolace nebudou schopny to kompenzovat (Rew et al., 2001; Gerhards et al., 1996). Proto při volbě vzorkování, je potřeba zvolit takovou metodu mapování, která bude odpovídat skutečné distribuci plevelů (Rew et Cousens, 2001).

V řadě vědeckých studií byla sledována chyba odhadu hustoty populace na velikosti vzorkované plochy. Klíčovým faktorem pro spolehlivou detekci zaplevelení je tedy dostatečná intenzita vzorkování, která je dána velikostí jednotlivých vzorků a jejich hustotou. Jak uvádí Backes et al. (1998), jsou různé metody mapování, ale jejich přesnost je dost nejistá. To potvrzují v jejich práci, kdy zjistily, že při různých strategiích odběru vzorků existují významné rozdíly ve výsledných mapách plevelů. Jak uvádějí Rew et al. (1997) u každé studie prostorové analýzy je třeba zvolit vhodné měřítko.

Při hledání optimální strategie vzorkování výskytu plevelů a vhodných postupů pro zpracování získaných dat byla učiněna řada dílčích experimentů. Lze použít metody založené

na náhodném výběru, ale také metody založené na základě systematického výběru (Colbach et al., 2000).

Jak uvádí Colbach et al. (2000), pro náhodný výběr můžeme volit některý z postupů a) vzorek je vybrán zcela náhodně, b) vzorek je vybrán náhodně, ale je dodržena minimální vzdálenost mezi vzorky. Z důvodu omezení závislosti mezi vzorky a za c) stratifikovaná metoda, kdy náhodné vzorkování je uplatněno samostatně v rámci každého stratifikovaného pole. Tato metoda se běžně používá k rozdělení pole na homogenní části s malou vnitřní variací měřené veličiny (Scherrer, 1983). Pokud před vzorkováním neexistují žádné předchozí znalosti o proměnné distribuci, pole jsou často libovolně rozdělena, aby se zajistilo, že vzorky jsou rovnoměrněji rozděleny v rámci vzorkovaného pozemku (Colbach et al., 2000).

Systematické umístění vzorků se často používá k tomu, aby se zajistilo, že vzorky jsou umístěny nezávisle, nedojde tak k nevědomky k opomenutí části pole, nebo naopak k preferování některé části pole (Scherrer, 1983). Systematické vzorkování může vypadat tak, že se vzorky vyberou na dvou uhlopříčkách pole (diagonální metoda), nebo jsou vzorky odebrány ze tří linií ve tvaru „S“ (zig-zag) (Colbach et al., 2000). Vzorky mohou také tvořit pravidelnou síť, která je často využívána v precizním zemědělství. Gerhards et al. (1996) porovnávali přesnost vytvořených map zaplevelení při hustotách sítě 15 x 15 m a 7,5 x 7,5 m. Zjistili, že zhuštěnější síť, nepřinesla výrazné zpřesnění a doporučují proto vzdálenost rastrových bodů 12 až 18 m.

3.3. Variabilita prostorového uspořádání populací plevelů na orné půdě

Jak již bylo zmíněno, cílená regulace zaplevelení využívá poznatků o prostorovém uspořádání plevelů (Bourgeois et al., 2012). Výskyt a hustota plevelů na orné půdě se liší nejen v rámci podniku, populace plevelů jsou prostorově a časově heterogenní i v rámci jednoho pole (Lutman et al., 2007; Cardina et al., 1997). Tato heterogenita je podmíněna mnoha faktory. Výskyt se může lišit a to v závislosti na plodině a termínu setí, zpracováním půdy a agrotechnice, např. osevním postupem, používanými metodami regulace zaplevelení, biologickou charakteristikou plevele (dlouhověkost semen) a půdními podmínkami (Mortensen et al., 1998; Nordmeyer et al., 1992; Timmerman et al., 2002; Lukas et al., 2011; Oerke et al., 2010; Hamouz et al., 2004; Marshall, 1998). Gerhards et al., (2003) zjistili, že ohniska plevelů jsou obvykle prodloužená ve směru pohybu strojů při kultivaci půdy. Jak uvádějí Rew et Cousens (2001) většina pozemků je obhospodařována převážně v určitém neměnném směru, což vede k intenzivnějšímu rozšiřování ohnisek plevelů právě ve směru pohybu mechanizačních prostředků při kultivaci a sklizni.

V běžné praxi chemické regulace plevelů se heterogenita uvnitř jednotlivých pozemků nebere v úvahu a herbicidy jsou většinou aplikovány plošně (Hamouz et al., 2004) i přestože je rozložení plevelů zřídka uniformní, nebo náhodné, a z pravidla se plevele vyskytují v ohniscích (Rew et al., 1996). Ohniska plevelů zůstávají zhruba na stejném místě rok co rok, liší se pouze jejich hustota (Türker, 2005). Stupeň prostorové variability ovlivňuje efektivitu lokální aplikace herbicidů. Čím je heterogenita pozemku z hlediska zaplevelení vyšší, tím výhodnější je využití lokálně specifického ošetření (Werner et Garbe, 1998).

Martín et al. (2018) zjistili, že druhy s malými semeny vytváří větší ohniska než druhy s velkými semeny. Také zjistili, že vzájemné působení různých druhů má na prostorové rozložení plevelů malý vliv. Další faktory ovlivňující distribuci populací plevelů v malých měřítkách závisí do určité míry na mechanismech rozšiřování a konkurence. Vytrvalé druhy, které se rozšiřují vegetativně, se vyskytují zpravidla v ohniscích (Andújar et al., 2011). Větší stupeň agregace se projevuje zejména u vytrvalých plevelů, jako je pcháček oset nebo pýr plazivý (Rew et al., 1996) a dále například u heřmánkovitých plevelů, hluchavek a u kokošky pastuší tobolky (Werner et Garbe, 1998, Hamouz et al., 2004). Zatímco jednoleté druhy svá semena různými způsoby rozptylují a jejich prostorová heterogenita je méně výrazná (Ruiz, 2006). Druhy plevelů, jejichž semena po dozrání spadají na zem pod matečnou rostlinu (Barochorie), budou vytvářet výraznější ohniska, než druhy jejichž semena jsou šířena větrem

(Paice et al, 1998). Dieleman et al. (2000) poukázal na možný vliv zpracování půdy na zásobu semen v půdě. Zemědělská technika lokálně upravuje prostředí semen, ovlivňuje dormanci a klíčení (Benech et al, 2000).

3.3.1. Popis prostorové variability

Používání integrovaných systémů regulace zaplevelení vyžaduje přesné vyhodnocení populací plevelů. Hodnocení plevelů může být provedeno pozorováním relativní listové plochy (Kropff et al., 1991) nebo hodnocením hustoty zaplevelení (Cousens, 1985). Tyto metody jsou dostačující pro odhad populací zaplevelení a výnosových ztrát, které mohou být způsobené zaplevelením. Nicméně, jak pozorování listové plochy, tak zjišťování hustoty plevelů jsou metody složité a časové náročné (Andújar et al., 2010). Pro popis prostorové variability existuje široká škála metod (Ripley, 1981).

Nejběžnějším a nejobecnějším způsobem vyjádření prostorové variability je použití rozptylu, směrodatné odchylky či variačního koeficientu (Dieleman et Mortensen, 1999). Variance s^2 kvantitativního znaku x vyjadřuje míru disperze a je definována jako průměrná suma čtverců odchylek od průměru \bar{x} .

Jednou z možností kvantifikace prostorové heterogenity je *Patchiness – index* podle Lloyda (1967):

$$PI = (m + (s^2 / m) - 1) / m$$

kde m = průměrná hustota zaplevelení

s^2 = rozptyl hodnot výběrového souboru

Patchiness index jako indikátor stupně agregace populace plevelů je vhodný především pro druhy s vyšším výskytem, protože nízká početnost druhu silně zvyšuje hodnoty indexu. Pokud $PI > 1$, je možné výskyt plevelů označit za nerovnoměrný a se vzrůstající hodnotou indexu stupeň nerovnoměrnosti roste. Vysoká hodnota PI signalizuje úspory nákladů na herbicidy (Hamouz et al., 2004). Obecně lze říci, že druhy s celkově nižší početností dosahují vyšších hodnot PI , což může být částečně způsobeno neadekvátní velikostí plochy vzorku (Hamouz, 2005).

Výše uvedené metody popisují více či méně podrobně míru variability sledovaných znaků, nevypovídají však nic o vlastním prostorovém uspořádání. K prostorově explicitnímu vyjádření dat je třeba použít mapu (Hamouz et al., 2006; Lloyd, 1968).

Dalším ze způsobů výpočtu relativní míry prostorové variability, je výpočet variačního koeficientu:

$$CV = S / m * 100 \%$$

Kde:

CV = Variační koeficient

S = Směrodatná odchylka vzorku populace;

m = Průměr

Vysoká hodnota CV vykazuje vysokou variabilitu (Wilding, 1985).

Výše uvedené metody popisují více či méně podrobně míru variability sledovaných znaků, nevypovídají však nic o vlastním prostorovém uspořádání. K prostorově explicitnímu vyjádření dat je třeba použít mapu. Exaktním způsobem vytváření map je přiřazování souřadnic jednotlivým nalezeným rostlinám. Na podobném principu, jenž rovněž uplatňuje kontinuální mapování celé hodnocené plochy, je založena např. fraktálová analýza (Wallinga, 1995). Tuto metodu uplatnili Wallinga et al. (1998) ve svém výzkumu a popis je založen na:

- a) vzdálenosti mezi náhodně vybraným bodem a nejbližším plevelem
- b) vzdálenost mezi náhodně vybraným plevelem a nejbližším plevelem
- c) vzdálenosti mezi náhodně vybraným plevelem a jiným náhodně vybraným plevelem.

Při měření vzdáleností se již nepoužívá diskretní způsob mapování, prostor je popisován v širokém, nepřetržitém rozsahu (Upton et Fingleton, 1985). Výskyt jedinců je zjišťován v malých, k sobě přiléhajících plochách. Je tak možno získat nejen velmi podrobnou mapu, ale postupným slučováním těchto ploch lze stanovit míru variability na mnoha úrovních (Wallinga, 1995).

Prostorová data mají mnoho specifických vlastností, které znesnadňují jejich analýzu a vyžadují použití odlišného souboru statistických metod, modelovacích přístupů i velmi citlivou interpretaci výsledků kvantitativních analýz. Standardní statistické metody vyvinuté

pro analýzu neprostorových dat jsou tak v mnoha případech pro hodnocení prostorových dat nevhodné. Za nejvýznamnější problémy či specifika analýzy prostorových dat lze považovat závislost výsledků na agregaci dat neboli na způsobu vymezení prostorových jednotek ve spojení s ekologickou chybou, prostorovou autokorelací a prostorovou nestacionaritou (Spurná, 2006). Zvláště u malých a členitých oblastí je potřeba dále zmínit problémy vznikající blízkostí hranice, která významným způsobem ovlivňuje výsledky statistických analýz (Spurná, 2008).

Výzva k vypracování vzorkovacích plánů pro mapování je, že informace o prostorové kontinuitě závisí jak na povaze prostorové kontinuity, tak na tom, jak se provádí vzorkování (Isaaks et Srivastava, 1989).

Pro popis prostorové variability mohou být využívány geostatistické metody (Lukas et al., 2011). Geostatistické metody berou v úvahu prostorovou závislost hodnot a snaží se najít zákonitosti v prostorovém rozložení (Lukas et al., 2011). Chceme-li popsat variabilitu, základním předpokladem je odhad míry variability a s tím související hustoty vzorkovací sítě (Penížek et al., 2014). U řady pozemků se setkáváme s předpokladem nevyrovnanosti variability, tedy je předpoklad výskytu různých hodnot a trendů v různých částech pozemku z důvodu velké heterogenity (Penížek et al., 2014).

Základním a nejpoužívanějším nástrojem geostatistiky k popisu vnitřní prostorové závislé struktury (autokorelace) je variogram, který je definován jako variance inkrementu dvou náhodných proměnných náhodné funkce (Hamouz, 2005):

$$2\gamma(x_1, x_2) = \text{Var}[Z(x_1) - Z(x_2)]$$

Variogram lze použít k popisu prostorové závislosti, pro návrh efektivních vzorkovacích plánů a pro tvorbu map (Burgess et al., 2012).

Předpokladem úspěšného vzorkování, populací plevelů, na základě kterého je uskutečněna jejich cílená regulace, je získání přesných informací o prostorové závislosti plevelných populací při minimálních nákladech (Wiles, 2005).

3.3.1.1. Interpolace

Interpolační metody jsou využívány v různých disciplínách. Jedná se o techniky, které jsou využívány k odhadu hodnot sledovaného znaku (pokryvnost či početnost plevelů) na nevzorkovaných místech uvnitř vzorkovací sítě (Rew et Cousens, 2001; Rew et al. 2000; Li et al., 2008).

Prostorová interpolace je tedy metoda odhadu proměnných, jako je hustota plevelů a to i v nezmapovaných místech (Dille et al., 2002). Vychází se z předpokladu, že pozorování získaná v bližší vzdálenosti od sebe jsou si více podobná než pozorování ve větší vzdálenosti od sebe. Zároveň se předpokládá, že případná závislost prostorové proměnné sledované ve dvou místech vyplývá ze vzdálenosti těchto míst a nikoliv místa, kde k měření došlo (Kraus, 2007). Kvalita map je pak založena na metodě prostorové interpolace (Heisel et al., 1996; Dille et al., 2002; Guillot et al., 2009) a kvalitě odběru vzorků (Cousens et al., 2002).

Jednou z nejjednodušších interpolačních technik je metoda lineární triangulace. Hodnota sledovaného znaku v neznámém bodě je vypočtena na základě hodnot třech nejbližších vzorkovaných bodů a jejich polohy (Hamouz, 2005). K interpolaci se často používá rovněž metoda inverzní vzdálenosti. Tato metoda je rychlá a patří mezi přesné interpolátory (Hamouz, 2005).

Nejčastěji používanou metodou interpolace je Kriging (Lutman, 2002, Isaaks et Srivastava, 1989; Hamouz et al., 2006) a to zejména, pokud je k odhadu hustoty nebo pokryvnosti druhu v místech mezi vzorky mapována pouze malá část plochy (Lutman, 2002). Kriging je geostatický způsob, často popisován jako nejlepší lineární nezkreslený prediktor hodnot. Jedná se o objektivní hodnocení, protože se snaží, aby se střední reziduální chyby rovnaly nule. A to je nejlepší způsob predikce, protože si klade za cíl minimalizovat rozptyl chyb (Isaaks et Srivastava, 1989). Většina map, které můžeme v publikacích najít, jsou vytvořeny pomocí Krigingu (Cardina et al., 1995; Heisel et al., 1996).

Je velmi obtížné stanovit, která interpolační metoda poskytne v dané situaci optimální výsledek, tj. která metoda bude vytvářet hodnoty odhadu, jejichž distribuce se bude blížit distribuci skutečných hodnot.

3.4. Svízel přítula

Stále vzrůstající plochy ozimých plodin mají zásadní vliv na složení plevelových společenstev v agrosystémech. V těchto neustále se měnících nestabilních ekosystémech v současné době převažují ozimé plevele. Svízel přítula je typickým zástupcem těchto plevelných druhů (Jursík et al., 2011). Na orné půdě je tento druh považován za jeden z nejvýznamnějších plevelů světa (Kazda et al., 2010) a z hlediska rozšíření a škodlivosti jde o

nevýznamnější plevelný druh v ČR (Jursík et al., 2011). Vyznačuje se vysokou konkurenční schopností. Dobře snáší zastínění, proto se uplatňuje i v hustých porostech. Může se vyskytovat téměř ve všech plodinách (Kazda et al., 2010).

Dle Hrona et Kohouta (1996), patří svízel přítula do skupiny velmi nebezpečných plevelů, jež pro kulturní plodinu znamenají vážné nebezpečí již při malém počtu. Jedná se o druh, jenž vytváří na jedné rostlině průměrně 400 – 800 semen (Kostelanský, 1997). V porostech plodin bývá produkce semen obvykle vlivem konkurence nižší, přesto při vysoké intenzitě zaplevelení, absenci ochrany a snížení konkurenční schopnosti plodiny může svízel přítula vytvořit až 10 tisíc semen na m² (Jursík et al., 2011). Jak uvádí Dvořák et Smutný (2003), stupeň škodlivosti plevelů se zvyšuje sladěností životního rytmu plodin a plevelů, které rostou na společném stanovišti. Největší škody způsobuje svízel přítula v ozimých obilovinách a řepce, velmi dobře vzchází také v jarním období, významně zapleveluje i jařiny. Jeho vysokou škodlivost dokumentuje velmi nízký ekonomický práh škodlivosti v obilovinách. Jeho hodnota se pohybuje v rozmezí 0,1 až 1 rostlina na m², což je oproti jiným plevelům velmi nízký počet (Jursík et al., 2011). U tohoto druhu je nutné při mapování zachytit i menší ohniska a nelze riskovat jejich opomenutí způsobené nedostatečnou hustotou vzorkovací sítě. Kromě přímé škodlivosti, která spočívá ve snižování výnosu, často způsobuje také poléhání porostu, zhoršuje kvalitu sklizně a zvyšuje vlhkost sklizeného produktu (Jursík et al., 2011).

Svízel přítula je relativně odolný vůči celé řadě herbicidů (Jursík et al. 2011). Škodlivost tohoto plevele demonstruje i fakt, že je svízel přítula častý předmětem výzkumu. Prostorová distribuce populací na jednotlivých pozemcích bývá často nerovnoměrná, což umožňuje lokální regulační zásahy. Jak uvádí Gerhards et al. (2004), cílená regulace použitá v jarním ječmeni vedla u svízele přítuly ke snížení spotřeby herbicidu o 54 %.

4. MATERIÁL A METODY

4.1. Charakteristika stanoviště

Mapované stanoviště se nacházelo v katastrálním území Úhrov, okres Havlíčkův Brod. Pro popis agrotechniky na daném stanovišti byly použity data uživatele půdního bloku ZS Vilémov, a.s.

Mapování rostlin svízele přítuly proběhlo na půdním bloku č. 5301/1, celková rozloha půdního bloku 26,88 ha, půdy jílovitohlinité až jílovité. Struktura pěstovaných plodin byla následující. V hospodářském roce 2012/2013 kukuřice, 2013/2014 pšenice ozimá, 2014/2015 řepka ozimá a v roce 2015/2016 ječmen ozimý. ZS Vilémov a.s. používá bezorebný způsob zpracování půdy. Na podmítku používají diskový podmítač Horsch Joker, hlubší podmítku zajišťuje radličkový podmítač Terrano a k odstranění zhutnělé vrstvy půdy používají podrývák Simba. Sklizeň je zajištěna dvěma sklízecími mlátičkami Case 9120 se záběrem 9 m a Case 9240 se záběrem 12 m.

Agrotechnika mapovaného půdního bloku:

Plodina: ječmen ozimý

Předplodina: řepka ozimá

Termín setí: 16. 9. 2015

Hnojení před setím: 11. 9. 2015, Amofos, 110 Kg/ha + draselná sůl 100 Kg/ha

Chemická ochrana na podzim: 22. 9. 2015, Trinity – 2 l/ha

4.2. Mapování vzešlého plevele svízele přítuly

Mapování svízele přítuly se uskutečnilo na jaře 2016. V době, kdy plevele byly již vzešlé, ale zároveň porost ječmene nezakrýval řádky. Kontinuální vzorkování proběhlo na ploše 50 x 60 m a to ve směru kolmém na kolejové řádky. Plocha byla rozdělena do úzkých pásů 1 x 50 m. V každém z těchto pásů byla souřadnicovým způsobem stanovena poloha jednotlivých rostlin svízele přítuly. Poloha rostlin byla zachycena pomocí navigačního systému - Trimble 5800 RTK (Real Time Kinematics), základní přesnost přijímače 0,01 m + 1 ppm vektoru základnové stanice (Trimble, 2003). Celkem bylo zaznamenáno 2997 bodů (Obr. 1).

4.3. Zpracování dat

Pomocí programu ArcGIS 10.1 byla sestavena bodová mapa polohy jednotlivých rostlin svízele přituly uvnitř sledované plochy. Pro účely simulace byla plocha rozdělena do aplikačních buněk o rozměrech 3 x 3 m. Celkový počet buněk na sledované ploše byl 320. Na těchto simulovaných schématech bylo provedeno diskrétní vzorkování.

4.3.1. Základní statistika

Na celkové ploše byla stanovena průměrná hustota rostlin svízele přituly na m². Míra variability byla vyjádřena indexem disperze (ID):

Index disperze

$$ID = \frac{s_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}}$$

\bar{x} průměr

s_x^2 rozptyl

n rozsah výběrového souboru (celkový počet čtverců)

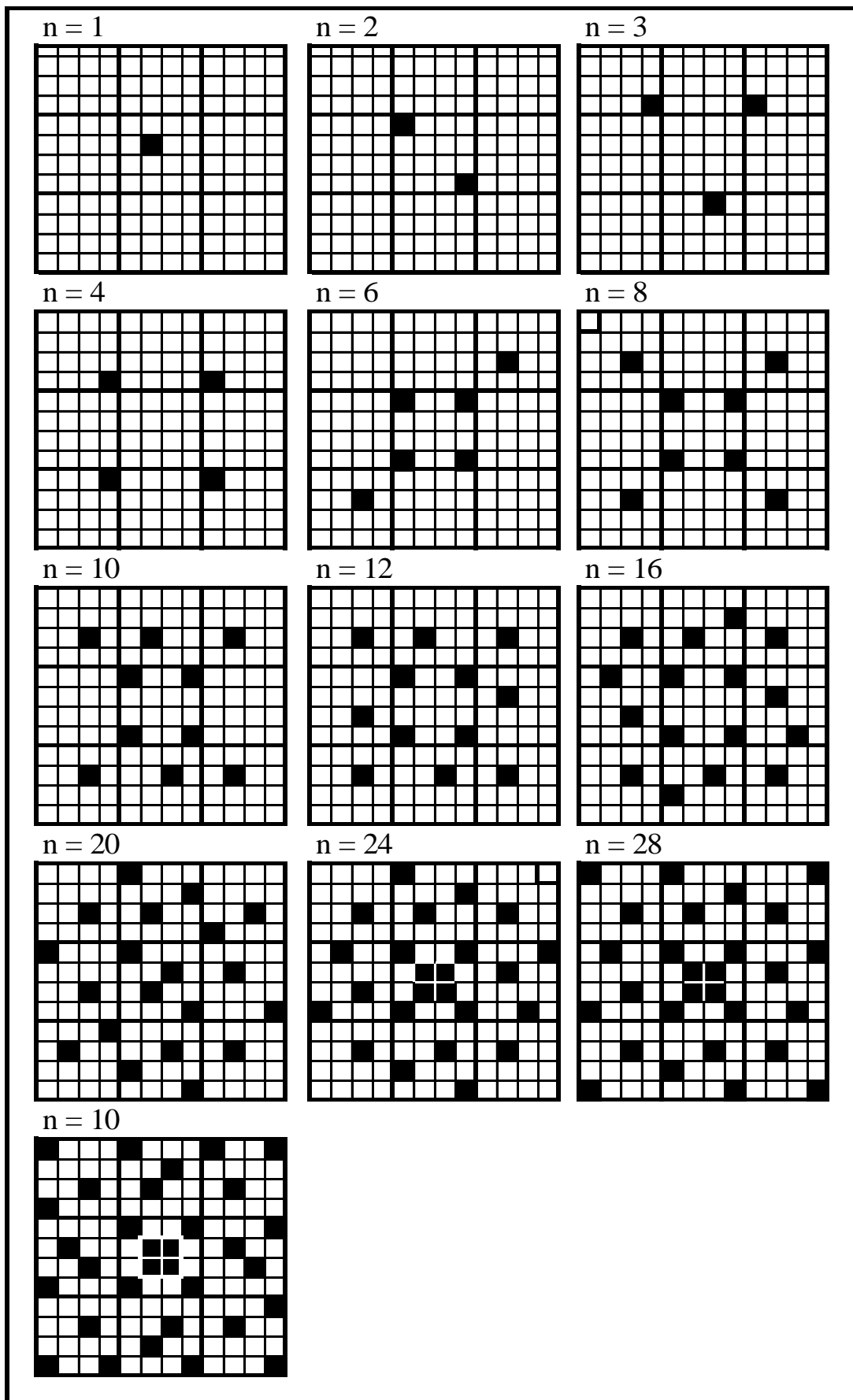
$x_1, x_2 \dots x_n$ sledovaná hodnota

x_i i -tá hodnota znaku x

Obecně platí, pokud je míra variability nízká, i hodnoty indexu disperze jsou nízké.

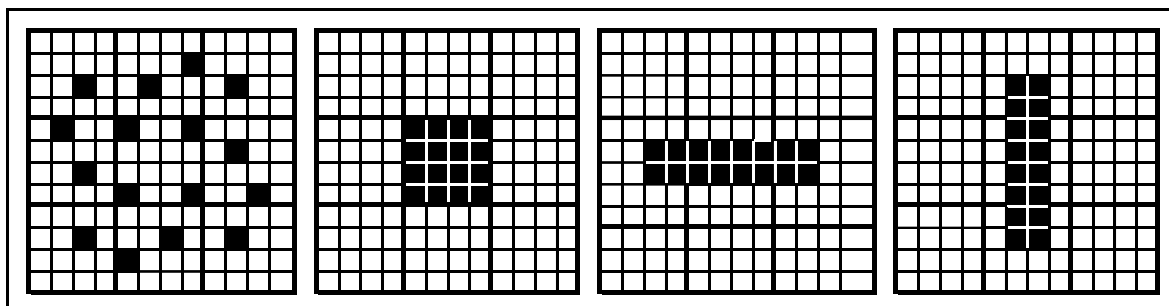
4.3.2. Simulace různých způsobů vzorkování

Pro stanovení vlivu intenzity vzorkování na jeho přesnost bylo navrženo 13 vzorkovacích schémat s narůstajícím počtem dílčích vzorků o velikosti 0,0625 m² uvnitř vzorkovaných buněk. Při umístování dílčích vzorků byla snaha dosáhnout přibližně rovnoměrného rozmístění v rámci buňky (Obr. 2).



Obr. 2: Vzorkovací schémata o ploše 3 x 3 m.

Aby mohl být zkoumán efekt nejen různých velikostí vzorků, ale i vliv různého rozmístění dílčích vzorků, byly navrženy tři schémata, kde bylo ve vzorkovacích buňkách hodnoceno vždy 16 dílčích vzorků, avšak s odlišným uspořádáním (Obr. 3).



Obr. 3: Schémata 3 x 3 m, n = 16.

4.3.3. Analýza chyb vzorkování

Pro jednotlivé intenzity vzorkování byla stanovena střední absolutní chyba odhadu (MAE - Mean Absolute Error) a relativní chyba odhadu (RPE- Relative Prediction Error):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

$$RPE = \frac{1}{\bar{y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

kde y_i je skutečná hustota svízele přítuly v i -té buňce a, \hat{y}_i je odhad hustoty v této buňce stanovený vzorkováním a n je rozsah výběrového souboru (celkový počet vzorkovaných buněk).

Jako alternativní ukazatel přesnosti mapování byla použita klasifikační analýza, která ukazuje, do jaké míry nepřesné stanovení hustoty populace ovlivní rozhodování o regulačním zásahu uskutečněném na základě prahu škodlivosti. Pro klasifikaci byl zvolen práh škodlivosti svízele přítuly 0,5 rostliny m^{-2} . Vzorkované buňky, jejichž skutečná hustota překročila práh škodlivosti, byly označeny jako „nadprahové“, ostatní jako podprahové. Stejná klasifikace byla provedena i pro hustoty odhadované pomocí vzorkování. Jako hlavní kritérium pro

hodnocení chyby byl zvolen podíl negativních chyb (PNCH), který byl vypočten jako počet nadprahových buněk, které byly na základě vzorkování chybně klasifikovány jako podprahové, dělený celkovým počtem nadprahových buněk. Tato veličina ukazuje, jaký podíl buněk s překročeným prahem škodlivosti by při regulačním zásahu (uskutečněném na základě tohoto prahu) zůstal neošetřen vinou nepřesného vzorkování.

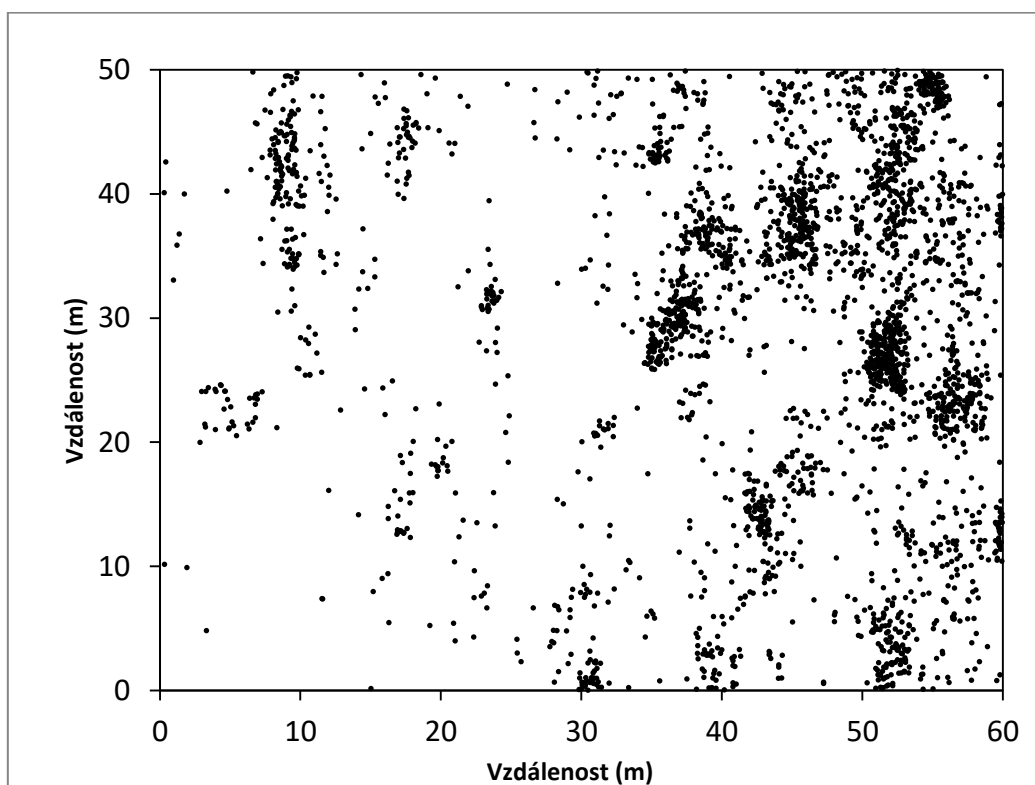
Pro všechny vypočtené kvantifikátory chyb (MAE, RPE a PNCH) byla graficky vyjádřena jejich závislost na intenzitě vzorkování a data byla pomocí nelineární regrese proložena křivkou v programu R (Grothendieck, 2013).

5. VÝSLEDKY

Na analyzované ploše bylo nalezeno celkem 2997 rostlin svízele přituly. Základní charakteristika zaplevelení byla vyjádřena průměrnou hustotou populace svízele přituly, která činila 1,005 rostlin m^2 . Vzhledem ke zvolené hodnotě prahu škodlivosti 0,5 rostliny m^2 lze považovat průměrnou hustotu populace tohoto plevelu v rámci celé plochy jako nadprahovou. Mezi jednotlivými částmi analyzované plochy byly v průměrné hustotě výrazné rozdíly.

Nadprahový výskyt byl zaznamenán ve 134 buňkách z celkových 320, což odpovídá 41,87 % celkové plochy.

Prostorové rozložení rostlin je znázorněno na obrázku č. 1. Ohniska jsou protáhlá ve směru zpracování půdy a sklizně. Stupeň indexu disperze $ID = 2,73$, odpovídá poměrně vysokému stupni prostorové variability.



Obr. 3: Distribuce rostlin svízele přituly na hodnocené ploše 50 x 60 m.

Hodnoty všech vypočtených MAE a RPE a PNCH vykazovaly stálou klesající tendenci se zvyšující se intenzitou vzorkování (Tab. 1).

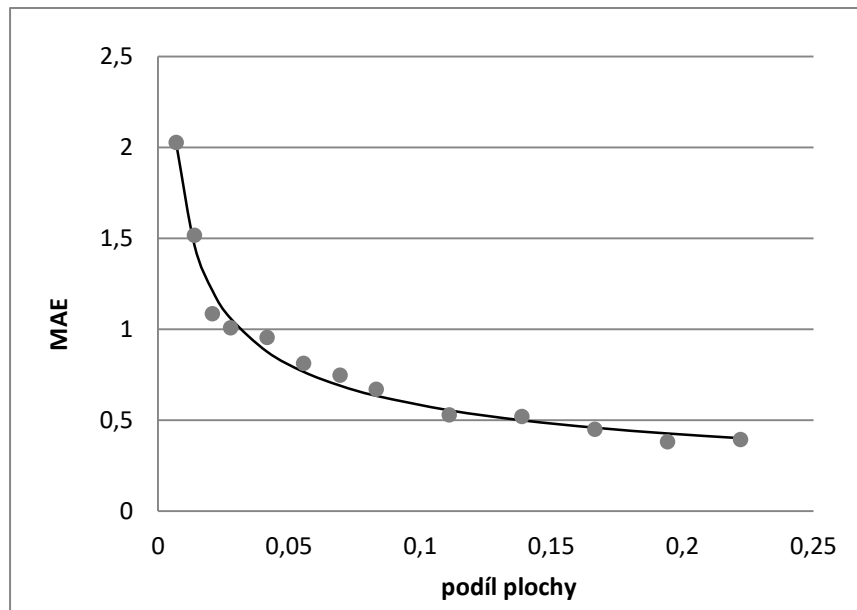
Tab. 1: Hodnoty MAE, RPE a PNCH pro jednotlivé intenzity vzorkování.

| Vzorkovaná plocha m ² | Podíl vzorkované plochy 9 % | Podíl negativních chyb (PNCH) | RPE | MAE |
|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------|--------|
| 0,0625 | 0,6944 | 0,8507 | 6,1324 | 2,0278 |
| 0,125 | 1,3889 | 0,7537 | 3,2754 | 1,5167 |
| 0,1875 | 2,0833 | 0,7015 | 2,0299 | 1,0854 |
| 0,25 | 2,7778 | 0,6269 | 1,8606 | 1,0083 |
| 0,375 | 4,1667 | 0,5373 | 1,7403 | 0,9549 |
| 0,5 | 5,5556 | 0,4403 | 1,4403 | 0,8118 |
| 0,625 | 6,9444 | 0,3731 | 1,3740 | 0,7472 |
| 0,75 | 8,3333 | 0,3134 | 1,1931 | 0,6701 |
| 1 | 11,1111 | 0,2313 | 0,9283 | 0,5299 |
| 1,25 | 13,8889 | 0,1567 | 0,9005 | 0,5207 |
| 1,5 | 16,6667 | 0,1567 | 0,7604 | 0,4493 |
| 1,75 | 19,4444 | 0,0896 | 0,6213 | 0,3812 |
| 2 | 22,2222 | 0,0746 | 0,6324 | 0,3939 |

Hodnoty MAE vykazovaly inverzní pokles vzhledem k intenzitě vzorkování (Graf 1). To umožnilo proložení nelineární funkce o dvou parametrech:

$$MAE = \left(\frac{1}{(5,0236 * (x^{0,46616}))} \right)$$

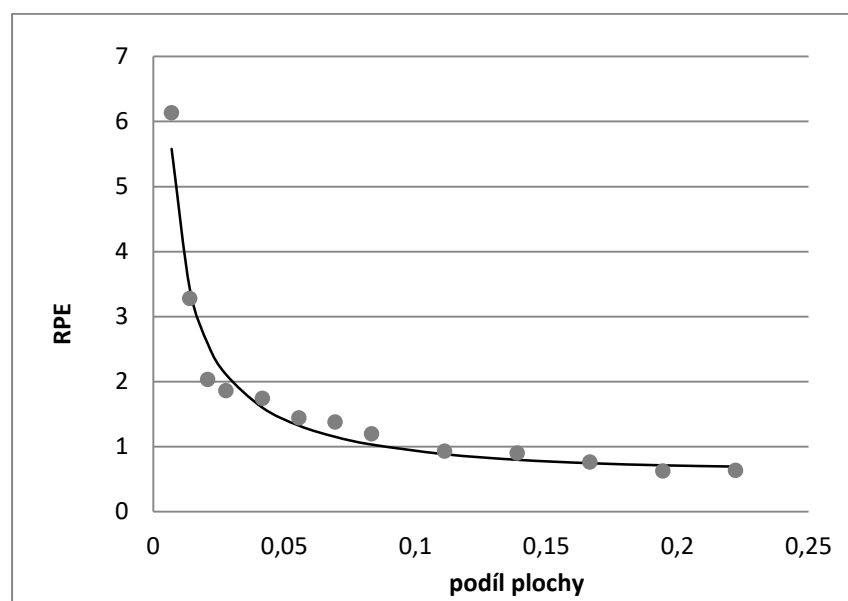
Podrobné statistické informace o parametrech proložených funkcí pro všechny tři kvantifikátory chyb jsou shrnuty v tabulce 2.



Graf č. 1.: Hodnoty MAE a proložená funkce.

Hodnoty RPE se rovněž snižovaly inverzně k intenzitě vzorkování, přičemž pro nízké intenzity vzorkování byly zjištěny vyšší hodnoty v porovnání s MAE (Graf 2). Průběh hodnot RPE byla proložen nelineární regresní funkcí se dvěma parametry:

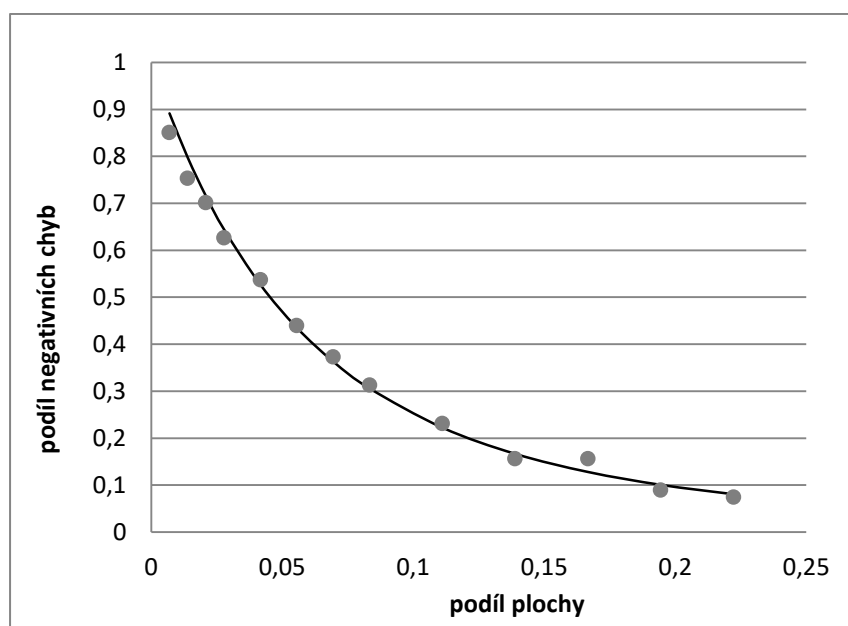
$$RPE = \left(\frac{1}{(6,25079 * (x^{0,71439}))} \right) + x$$



Graf 2: Průběh hodnot RPE s proloženou funkcí.

Podíl negativních chyb prokázal exponenciální pokles se zvyšující se vzorkovací plochou (Graf 3). Průběh hodnot PNCH byl proložen exponenciální regresní funkcí se dvěma parametry:

$$PNCH = e^{\left(\frac{-x}{0,05958+0,128918*x}\right)}$$



Graf 3: Průběh hodnot PNCH s proloženou funkcí

Tabulka 2: Odhady parametrů nelineárních regresních modelů pro MAE , RPE a PNCH s vyjádřením směrodatných odchylek a pravděpodobnostních hodnot (p) pro t-testy nulové hypotézy.

| Model | Parametry modelu | Odhad | Směrodatná odchylka | p(> t) |
|-------|------------------|----------|---------------------|----------|
| MAE | A | 5.0236 | 0.30233 | 3.86e-09 |
| | B | 0.46616 | 0.01687 | 1.63e-11 |
| RPE | A | 6.25079 | 0.94911 | 3.94e-05 |
| | B | 0.71439 | 0.03909 | 1.40e-09 |
| PNCH | A | 0.059580 | 0.002609 | 2.95e-11 |
| | B | 0.128918 | 0.020052 | 3.26e-05 |

Při porovnání vzorkovacích schémat, u nich byla zachována stejná celková plocha vzorku, ale bylo změněno uspořádání dílčích vzorků, je patrné, že agregace dílčích vzorků do souvislé plochy vedla ve všech případech k vyšším hodnotám chybových indikátorů MAE a RPE i PNCH v porovnání s rovnoměrným rozmístěním. Nejvyšší hodnoty chyb odhadu ve všech případech vykazovalo centrální umístění dílčích vzorků.

Při porovnání příčného a podélného uspořádání vzorků je zřejmé, že vyšší hodnoty chybových indikátorů vykazovaly dílčí vzorky, které byly uspořádány podélně. Hodnoty MAE, RPE a PNCH pro všechny způsoby uspořádání dílčích vzorků jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3: Porovnání chyb odhadu na vzorkované ploše 3 x 3 m při různém uspořádání dílčích vzorků 1 m².

| Uspořádání vzorku | Podíl negativních chyb (PNCH) | RPE | MAE |
|---------------------------|-------------------------------|--------|--------|
| a (rovnoměrné rozmístění) | 0,2313 | 0,9283 | 0,5299 |
| b (centrální čtverec) | 0,3134 | 1,5472 | 0,7604 |
| c (příčné uspořádání) | 0,2910 | 1,1152 | 0,6292 |
| d (podélné uspořádání) | 0,2985 | 1,5218 | 0,7538 |

6. DISKUSE

Svízel přítula obvykle vykazuje nižší početnost oproti ostatním jednoletým druhům plevelů, ale protože je jeho práh škodlivosti velmi nízký, může docházet ke ztrátám výnosu i při nízkých hustotách, což klade vysoké nároky na intenzitu vzorkování (Hamouz 2005). Na sledované ploše, se svízel přítula vykazoval průměrnou hustotu 1,05 rostlin na m^2 , což lze považovat za nadprahový výskyt, avšak díky agregaci populace do ohnisek bylo možné nalézt části plochy s podprahovým výskytem, které by umožnily úsporu herbicidu v případě cílené regulace tohoto plevelného druhu. Z obrázku č. 1 je patrné, že prostorové rozložení svízele přítuly je protáhlé ve směru zpracování půdy. Vliv agrotechniky na výskyt a rozmístění plevelů, je popsán v řadě studií (např. Gerhards et al., 2003; např. Wallinga et al., 1998), které tento vliv také potvrzují.

U všech sledovaných chybových indikátorů bylo zjištěno, že hodnoty klesaly s rostoucí intenzitou vzorkování. Pokud došlo ke sloučení dílčích vzorků do jednoho velkého, chyby odhadu se zvětšovali. Dílčí vzorky agregované do souvislé plochy umístěné ve středu každé buňky vedly k vyšším hodnotám MAE a RPE.

Z regresní funkce pro MAE lze vypočítat, že k udržení hodnoty MAE pod 0,5, by bylo potřeba vzorkovat 13,85 % z celkové plochy, pro MAE 1 vzorkovat pouze 3,13 % plochy. Tyto výpočty jsou platné, pokud je oblast vzorku rozdělena na dílčí vzorky. Zjištěné chybové hodnoty by mohly mít ve skutečnosti dopad na rozhodování o cílené regulaci zaplevelení.

Zjištěné vysoké hodnoty RPE jsou způsobeny malým počtem extrémních nadhodnocení, zatímco podhodnocení pro nízké hustoty vzorkování není možné. Na základě tohoto zjištění by RPE nemuselo být vhodným opatřením pro cílenou regulaci zaplevelení, z důvodu, že nadhodnocování zaplevelení je méně závažné než podhodnocování zaplevelení. Z regresní funkce lze vypočítat, že pokud bychom chtěli udržet hodnoty RPE pod 1, bylo by zapotřebí vzorkovat 8,8 % z celkové plochy, to znamená pro hustotu zaplevelení 1 rostlina na m^2 . Podobně jako u jiných studií (např. Armstrong et Collopy, 1992) bylo zjištěno, že MAE je méně citlivý na extrémní hodnoty než RPE.

Zvolená hodnota podílu negativních chyb $>0,5$ rostlin/ m^2 klesala se vzrůstající intenzitou vzorkování. Při vzorkování plochy nad 5 % z celkové plochy, škodlivost svízele přítuly by nemusela být zohledněna. Z regresní funkce pro PNCH lze vypočítat, že k udržení hodnoty 0,1 by bylo potřeba vzorkovat 19,9 % z celkové plochy. K udržení hodnoty 0,2 by bylo potřeba vzorkovat 12,09 % z celkové plochy.

Prah škodlivosti je taková hustota zaplevelení, při jejímž překročení je již ošetření herbicidy ekonomicky výhodné. Úspora herbicidů může být závislá na aplikovatelnosti prahů škodlivosti. Pokud je cílené regulace zaplevelení založena na výskytu plevelů, podhodnocení hustoty rostlin by mohlo v některých buňkách chemickou ochranu vynechat. Hamouz (2014) došel ve svém výzkumu k výsledkům, že pro dosažení přijatelné míry spolehlivosti map výskytu plevelů lze doporučit vzorkování 3 - 5 % celkové plochy pro druhy s vysokým prahem škodlivosti (např. violka rolní, rozrazil perský, hluchavky apod.). U druhů s nízkým prahem škodlivosti (např. svízel přitula, pcháč oset) doporučil vzorkování zintenzivnit na cca 10 % celkové plochy.

Ze získaných výsledků je patrné, že spolehlivé mapování populací s nízkou hustotou vyžaduje velmi vysokou intenzitu vzorkování, kterou nelze dosáhnout ručním mapováním a může být náročná i pro automatizované metody. Z důvodu nízké hustoty populace byl úmyslně vybrán jako modelový druh svízel přitula, protože může způsobit ztrátu na výnosu i při nízkých hustotách.

Velikost použitého vzorkovacího rámce do značné míry závisí na konkrétních počtech vyskytujících se plevelů. Příliš velký rámec při vysokých počtech plevelů vede k neúměrně dlouhé době potřebné k hodnocení. Naopak při nízkých počtech má malá vzorkovaná plocha za následek vysokou varianci a zvýšený podíl nulových hodnot (Skellam, 1952, cit. Horne et. Schneider, 1995). Toto se výrazněji projevuje zejména v místech s nízkou hustotou zaplevelení. Pokud je například uvnitř dílčího vzorku o ploše $0,25 \text{ m}^2$ nalezena jedna rostlina, v přepočtu odpovídá zaplevelení čtyřem rostlinám na 1 m^2 . Přesnost vzorkování závisí tedy na velikosti vzorku.

Pro diplomovou práci byla zvolena velikost vzorkované buňky 9 m^2 jako kompromis mezi potřebou přesnosti a technickými nároky SSWM na cílenou regulaci zaplevelení. Menší velikost buněk by poskytla vyšší úspory herbicidu, ale vyžadovala by i pokročilejší postřikovače pro aplikaci herbicidu. Umístění dílčích vzorků bylo pro diplomovou práci provedeno systematicky, což by se dalo přirovnat k poloautomatizovanému vzorkování, kde jsou snímače pevně namontovány na výložník.

7. ZÁVĚR

Jedním z důvodů zkoumání prostorové variability plevelných populací na pozemcích je úspora herbicidů, tedy ekonomická a ekologická regulace zaplevelení. Rozmístění plevelů na zemědělské půdě bývá většinou nerovnoměrné a populace svízele přítuly byla na mapovaném pozemku také rozmístěna nerovnoměrně. Prostorové uspořádání mohlo být ovlivněno způsobem obhospodařování půdy. Ohniska svízele přítuly byla protažena ve směru pohybu mechanizačních prostředků při kultivaci půdy a při sklizni.

Velikost vzorků je jedním ze základních problémů při prostorovém mapování. Nedostatečná velikost vzorku často vede k nezachycení rostlin v některých částech plochy. V jiných částech může naopak dojít k nadhodnocení. Použitý způsob vzorkování je vhodný spíše pro automatizované mapovací systémy. Dostatečná velikost vzorku je proto podmínkou pro eliminaci nežádoucí mikrovariability.

Pro spolehlivou detekci plevelových populací s nízkou hustotou lze na základě dosažených výsledků doporučit vzorkování minimálně 10 % z celkové plochy pozemku. Při této intenzitě vzorkování bude docházet jen k minimálnímu opomenutí rostlin či ohnisek plevelů při cílené regulaci. Nároky na vzorkování mohou být kromě hustoty populace do určité míry ovlivněny také dalšími faktory jako je míra agregace nebo způsob obhospodařování pozemku, aj.

8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Andújar, D., Gerhards, R., Weis, M. 2012. An ultrasonic systém for weed detection in cereal crops. *Sensors*. 12 (12). 17343-17357.

Andújar, D., Ruiz, D., Ribeiro, Á., Fernández-Quintanilla, C., Dorado, J. 2011. Spatial distribution patterns of Johnsongrass (*Sorghum halepense*) in corn fields in Spain. *Weed Science*. 59 (1). 82–89.

Andújar, D., Ribeiro, A., Carmona, R., Fernández-Quintanilla, C., Dorado, J. 2010. An assessment of the accuracy consistency of human perception of weed cover. *Weed Research*. 50. 638-647.

Armstrong, J. S., Collopy, F. 1992. Error measures for generalizing about forecasting methods: Empirical comparisons. *International Journal of Forecasting*. 8. 69-80.

Benlloch, J. V., Sánchez, A., Christensen, S., Walter, M. Weed mapping in cereal crops using image analysis techniques. *Research Gate* [online]. 1996. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z <https://www.researchgate.net/publication/258236621_Weed_mapping_in_cereal_crops_using_image_analysis_techniques >.

Benech, A. R. L., Sanchez, R. A., Forcella, F., Kruk, B. C., Ghera, C. M. 2000. Environmental control of dormancy in weed seed banks in soil. *Weed Science*. 67. 105–122.

Biller, R. H., Ihle, W. 2000. Pflanzenunterscheidung mit optischen Sensoren. *Landtechnik*. 55 (2). 148-149.

Bourgeois, A., Gaba, S., Munier-Jolain, N., Borgy, B., Monestiez, P., Soubeyrand, S. 2012. Inferring weed spatial distribution from multi-type data. *Ecological Modelling*. 226. 92-98.

Burgess, T. M., Webster, R. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. *Soil Science*. 31. 333-341.

Backes, M., Plümer, L. On the adequacy of GIS - generated weed maps for Precision Farming. Research Gate [online]. 1998. [cit. 2018-02-07]. Dostupné z <https://www.researchgate.net/publication/221013368_On_the_Adequacy_of_GIS-Generated_Weed_Maps_for_Precision_Farming>.

Brown, R. W., Steckler, J. P. G. A., Anderson, G. W. 1994. Remote sensing for identification of weeds in no-till corn. Transactions of the ASAE. 37 (1). 297-302.

Cardina, J., Sparrow, D. H., McCoy, E. L. 1995. Analysis of spatial distribution of common lambsquarters (*Chenopodium album*) in no-till soybean (*Glycine max*). Weed Science. 43. 298–308.

Cardina, J., Johnson, G. A., Sparrow, D. H. 1997. The nature and consequence of weed spatial distribution. Weed Science. 45. 364-373.

Clay, S. A, Lems, G. J., Forcella, F., Ellsbury, M. M., Carlson, C. G. 1999. Sampling weed spatial variability on a fieldwide scale. Weed Science. 47. 674-681.

Colbach, N., Dessaint, F., Forcella, F. 2000. Evaluating field-scale sampling methods for the estimation of mean plant densities of weeds. Weed Research 40. 411-430.

Cousens, R. 1985. A simple model relating yield loss to weed density. Annals of Applied Biology. 107. 239–252.

Dille, J., Milner, M., Groetke, J., Mortensen, D., Williams, M. 2002. How good is your weed map? A comparison of spatial interpolators. Weed Science. 51. 44-55.

Dieleman, J. A., Mortensen, D. A. 1999. Characterizing the spatial pattern of *Abutilon theophrasti* seedling patches. Weed Research. 39. 455-467.

Dieleman, J. A., Mortensen, D. A., Buhler, D. D., Ferguson, R. B. 2000. Identifying associations among site properties and weed species abundance. Weed Science. 48. 576–587.

Dvořák, J. 1987. Zemědělské soustavy. Vybrané kapitoly – polní plevel. VSŽ Brno. 2. Vyd. 59 s.

Dvořák, J., Smutný, V. 2003. Herbologie – Integrovaná ochrana proti polním plevelům. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. Brno. 186 s. ISBN: 8071577324.

Gerhards, R., Christensen, S. 2003. Real-time weed detection, decision making and patch spraying in maize, sugarbeet, winter wheat and winter barley. *Weed Research*. 43. 385-392.

Gerhards, R., Dicke, D., Fries, A. 2004. Determination of weed thresholds for site-specific weed control in malting barley. Conference: 22nd German Conference on Weed Biology and Weed Control. *Journal of Plant Diseases and Protection*.

Gerhards, R., Sökefeld, M., Knuf, D., Kühbauch, W. 1996. Kartierung und geostatistische Analyse der Unkrautverteilung in Zuckerrübenschlügen als Grundlage für eine teilschlagspezifische Bekämpfung. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 176. 259-266.

Gerhards, R., Sökefeld, M., Timmermann, C., Krohmann, P., Kühbauch, W. 2000. Precision weed control – more than just saving herbicides. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. Sonderheft XVII*. 179-189.

Grothendieck, G. Non-linear regression with brute force. R package version 0.2. [online]. 2013. [cit. 2018-03-18]. Dostupné z <<https://CRAN.R-project.org/package=nls2>>.

Guillot, G., Lorén, N., Rudemo, M. 2009. Spatial prediction of weed intensities from exact count data and image-based estimates. *Journal of the Royal Statistical Society Series. Applied Statistics*. 58. 525–542.

Hamouz, P. 2014. Metody regulace zaplevelení pro precizní zemědělství. Česká zemědělská univerzita. Praha. 41 s. ISBN: 9788021325388.

Hamouz, P., Hamouzová, K., Soukup, J., Tyšer, L. 2006. Evaluation of sampling and interpolation methods used for weed mapping. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz-journal of Plant Diseases and Protection*. 1 (20). 205 - 215.

Hamouz, P., Soukup, J., Holec, J., Jursík, M. 2004. Field-scale variability of weediness on arable land. *Plant soil environment*. 50 (3). 134-140.

Hantfield, J. L., Pinter, P. J. 1993. Remote sensing for crop protection. *Crop protection*. 12 (6). 403-413.

Heisel, T., Andreasen, C., Erbsoll, A. K. 1996. Annual weed distributions can be mapped with kriging. *Weed Research*. 36. 325–337.

Hron, F., Chodová, D., Kohout, V., Martinková, Z., Mikulka, J., Soukup, J., Stach, J. 1996. *Herbologie – Plevelle a jejich regulace*. Agronomická fakulta. ČZU Praha. 116 s. ISBN: 8021303085.

Hůla, J., Procházková, B. a kol. 2008. *Minimalizace zpracování půdy*. Profi Press. Praha. 246 s. ISBN: 9788086726281.

Jursík, M., Holec, J., Hamouz, P., Soukup, J. 2011. *Plevelle - biologie a regulace*. Kurent. České Budějovice. 232 s. ISBN: 9788087111277.

Kazda, J., Mikulka, J., Prokinová, E. 2010. *Encyklopedie ochrany rostlin*. Profi Press. Praha. 399 s. ISBN: 9788086726342.

Kohout, V. 1993. *Regulace zaplevelení polí*. 1. Vyd. Institut výchovy a vzdělání Ministerstva zemědělství České republiky. Praha. 37 s. ISBN: 8071050555.

Kostelanský, F. 1997. *Obecná produkce rostlinná*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. Brno. 212 s. ISBN: 8071572454.

Kropff, M. J., Spitters, C. J. T. 1991. A Simple model of crop loss by weed competition from early observations on relative leaf area of weeds. *Weed Research*. 31. 97–105.

Isaaks, E. H., Srivastava, R. M. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press. New York. p. 553. ISBN: 0195050126.

Lukas, V., Neudert, L., Křen, J. 2011. Mapování variability půdy a porostů v precizním zemědělství. Mendelova univerzita. Brno. 34 s. ISBN: 9788073755621.

Lukas, V., Neudert, L., Křen, J. 2008. Precizní zemědělství a jeho přínosy. Zemědělec [online]. 2010. [cit. 2016-12-06]. Dostupné z < <http://zemedelec.cz/precizni-zemedelstvi-a-jeho-prinosy/>>.

Lutman, P. J. W., Miller, P. C. H. 2007. Spatially variable herbicide application technology; opportunities for herbicide minimisation and protection of beneficial weeds. Research Review. 62.

Lutman, P. J. W, Perry, N. H., Hull, R. I. C., Miller, P. C. H., Wheeler, H. C., Hale, R. O. 2002. Developing a weed patch spraying system for use in arable crops. Project Report.

Martín, C. S., Milne, A. E., Webster, R. Storkey, J., Andújar, D., Quintanilla, C. F., Dorado, J. 2018. Spatial Analysis of Digital Imagery of Weeds in a Maize Crop. International Journal of Geo-Information. 7 (2). 61.

Mikulka, J. 1999. Plevelné rostliny polí, luk a zahrad. Farmář – Zemědělské listy. Praha. 160 s. ISBN: 8090241328.

Mikulka, J., Chodová, D. 2000. Změny druhového spektra plevelů v České republice. Sborník referátu z XV. Česká a Slovenská konference o ochraně rostlin. Brno. 287-288.

Oebel, H. Beckers, G. Sokefeld, M. Gerhards, R. Dicke, D. Lock, R. Therburg, R. D. 2004. Theilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline- und (Online-) Verfahren (TURBO). Universität Hohenheim. Hohenheim. pp. 176.

Paice, M. E. R., Day, W., Rew, L. J., Howard, A. 1998. A stochastic simulation model for evaluating the concept of patch spraying. Weed Research. 38. 373–388.

Penížek, V., Zádorová, T., Kodešová, R., Klement, A. 2014. Optimalizace vzorkovací sítě pomocí využití analýzy reliéfu pro popis prostorové variability půdních vlastností v rámci půdních bloků. Česká zemědělská univerzita. Praha. 41 s. ISBN: 9788021325333.

Rew, L. J., Cussans, G. W. 1997. Horizontal movement of seeds following tine and plough cultivation: implications for spatial dynamics of weed infestations. *Weed Research*. 37. 247-256.

Rew, L. J., Cussans, G. W., Muggleston, M. A., Miller, P. C. H. 1996. A technique for mapping the spatial distribution of *Elymus repens*, with estimates of the potential reduction in herbicide usage from patch spraying. *Weed Research*. 36. 283-292.

Rew, L. J., Cousens, R. D. 2001. Spatial distribution of weeds in arable crops: are current research methods appropriate? *Weed Research*. 40. 1-18.

Ripley, B. D. 1981. *Spatial Statistics*. USA. pp. 249. ISBN: 047169116X

Ruiz, D., Escribano, C., Fernández-Quintanilla, C. 2006. Assessing the opportunity for site-specific management of *Avena sterilis* in winter barley fields in Spain. *Weed Research*. 46. 379-387.

Scherrer, B. 1983. *Techniques de sondage en ecologie. Strategies D'echantillonnage En Ecologie*. Maison de Presses de l'UniversiteLaval-Quebec PUL. Canada. 63-162.

Soille, P. 2000. Morphological image analysis applied to crop field mapping. *Image Vision Computing*. 18. 1025-1032.

Sökefeld, M. 1997. *Atomatische Erkennung von Unkrautarten im Keimblattstadium mit Bildverarbeitung*. Dissertation Uni. Bonn.

Spurná, P. 2006. *Současné trendy v kvantitativní analýze geografických dat se zaměřením na využití metody geograficky vážené regrese*. Diplomová práce. Katedra sociální geografie a regionálního rozvoje PřF UK. Praha. 150 s.

Spurná, P. 2008. *Prostorová autokorelace – všudy přítomný jev při analýze prostorových dat?* *Sociologický časopis*. 44 (4). 767-787.

Schwarz, J., Wartenberg, G., Ackermna, I. 1999. Process-engineering investigations for site-specific weed control. *Proceedings Precision agriculture*. 99. 699-708.

Thompson, J. F., Stafford, J. V., Miller, P. C. H. 1991. Potential for automatic weed detection and selective herbicide application. *Crop Protection*. 10. 254-259.

Türker, U. 2005. Determination of spatial weed variability for precision spraying. *Tarım Bilimleri Dergisi*. 11 (4). 442-447.

Upton, G., Fingleton, B. 1985. *Spatial Data Analysis by Example - Volume 1: Point Pattern and Quantitative Data*. Wiley. p. 422. ISBN: 9780471905424.

Wallinga, J. 1995. The role of space in plant population dynamics: annual weeds as an example. *Oikos*. 74. 377-383.

Wallinga, J., Groeneveld, R. M. V., Lotz, L. A. O. 1998. Measures that describe weed spatial patterns at different levels of resolution and their applications for patch spraying of weeds. *Weed Research*. 38. 351-359.

Werner, B., Garbe, V. 1998. Bedeutung der Unkrautverteilung im Winterraps für eine gezielte Bekämpfung nach Schadensschwellen. *Z. PflKrankh. PflSchutz. Sonderheft*. XVI. 279-288.

Wilding, L. P. *Spatial Variability: Its Documentation, Accommodation, and Implication to Soil Surveys*. In: D. R. Nielsen and J. Bouma, Eds., *Soil Spatial Variability*, Pudoc., Wageningen, 1985. pp. 166-194.

Wiles, L. J. 2005. Symposium Sampling to make maps for site-specific weed management. *Weed Science*. 53. 228-235.