

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroekologie a rostlinné produkce



**Uplatnění technologií precizního zemědělství v systémech
rostlinné výroby**

Bakalářská práce

**Ing. Josef Egert
Rostlinná produkce**

Ing. Pavel Hamouz, Ph.D.

© 2020 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci „Uplatnění technologií precizního zemědělství v systémech rostlinné výroby“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Pavlu Hamouzovi, Ph.D. za odborné vedení, vždy vstřícný přístup a velmi cenné rady a informace poskytnuté v celém průběhu vypracovávání této práce.

Děkuji též mé manželce a synovi a také mému zaměstnavateli, kteří mě během celého studia podporovali a poskytovali mi tolik potřebný klid a čas ke splnění všech mých studijních povinností.

Uplatnění technologií precizního zemědělství v systémech rostlinné výroby

Souhrn

Zemědělství se v současné době potýká s mnoha problémy. Mezi nejzávažnější patří růst nákladů bez kompenzace v podobě růstu výkupních cen komodit, probíhající klimatická změna spojená s riziky náhodných výpadků produkce a negativní pohled veřejnosti na zemědělství spojený s tlakem na omezení či zákaz používání pesticidů. Všechny tyto faktory vedou k nutnosti zvyšování efektivity práce zemědělců. Jednou z cest k jejímu zvýšení mohou být technologie souhrnně označované jako precizní zemědělství, o kterých pojednává tato práce.

Pojem precizní zemědělství označuje souhrn mnoha různých technologií, které využívají rozvoje vědy a techniky v posledních dekáдах. Obecným cílem těchto technologií je provádět správnou činnost o správné intenzitě ve správný čas na správném místě. S tímto cílem úzce souvisí variabilita vlastností půdy, porostu či škodlivých organismů v rámci každého pozemku a velká skupina technologií precizního zemědělství cílí právě na respektování této variability.

Základem technologií precizního zemědělství jsou navigační systémy, jejichž rozvoj umožnil určovat polohu až s centimetrovou přesností. Pro potřeby precizního zemědělství je využíváno mnoho různých strojů sloužících jako platformy pro nesení senzorů či pracovních orgánů. Sensory používané v precizním zemědělství měří mnoho různých fyzikálních či chemických veličin pro přímé i nepřímé určení požadovaných vlastností půdy, porostu nebo škodlivých organismů. Naměřená data jsou buď dále zpracovávána a vyhodnocována v různých specializovaných programech, nebo ihned využita pro úpravu prováděné pracovní operace.

Z pohledu ekonomiky i provozu lze technologie precizního zemědělství rozdělit do dvou skupin na technologie, které provádějí automatizaci (například automatické vypínání a zapínání pracovních orgánů nebo automatické navádění strojů) a technologie, které se věnují problematice variability a s tím souvisejícím změn pracovních operací (například variabilní příprava půdy, setí, hnojení či aplikace pesticidů). Technologie provádějící automatizaci mají jasně definovatelný ekonomický přínos a jejich činnost probíhá téměř bez zásahu obsluhy. V současné době je v praxi tato skupina technologií již poměrně rozšířená. Technologie, které jsou zaměřeny na variabilitu, vyžadují odborné znalosti, velké množství času a práce pro vyhodnocení dat a jejich ekonomický přínos nemusí být vždy jednoznačný. Tato negativa se projevují v podobě jejich velmi pozvolného zavádění do praxe i přes to, že mnohé jsou již desítky let dostupné. Významným faktorem, který ovlivňuje úspěšné zavádění technologií precizního zemědělství do praxe je jejich spolehlivost a vzájemná kompatibilita. Z ekonomického hlediska je také nutné na tyto technologie pohlížet jako na celek a veškerá jejich pozitiva i negativa hodnotit společně v rámci celého zemědělského podniku.

Závěrem je vhodné zdůraznit, že tyto technologie nemají nahrazovat odborné znalosti a zkušenosti zemědělců, ale mají jim poskytnout nástroje, s jejichž pomocí se mohou rychleji, lépe a efektivněji rozhodovat a pečovat o své pozemky a plodiny.

Klíčová slova: rostlinná výroba, precizní zemědělství, variabilní aplikace, vegetační index, ekonomika

Application of precision farming technologies in crop production systems

Summary

Nowadays, agriculture is facing many problems. Among the most important are the cost increase without compensation in the form of rising commodity price, the ongoing climate change associated with the risks of random production outages and the negative public view on agriculture linked with pressure to reduce or ban pesticide use. All these factors make it necessary to increase farmer's work efficiency. One way to increase it could be technologies in summary referred as precision agriculture, which is discussed in this thesis.

Precision agriculture refers to many different technologies which have been developed as an outcome with the development of science and technology in recent decades. The goal of these technologies is to perform the right activity at the right intensity in the right place at the right time. This objective is closely related to the variability of soil, vegetation or pests properties within each field and a large group of these technologies aims to respect this variability.

The basis of precision farming technologies are navigation systems, the development of which has enabled positioning up to centimeter accuracy. For the needs of precision farming, many different machines are used as platforms for carrying sensors or working organs. Sensors used in precision agriculture measure many different physical or chemical variables for the direct and indirect determination of the managed soil, crop or pests properties. The measured data are either further processed and evaluated in various specialized programs, or immediately used for modification of the performed work operation.

From the economic and operational point of view, precision farming technologies can be divided into two groups. First group are technologies that perform automation (for instance, automatic turning off/on of work organs or automatic machine guidance). The second group consist of technologies that address variability and related changes in work operations (for example, variable soil preparation, sowing, fertilizing or pesticide application). Automation technologies have clearly defined economic benefits and operate almost without the operator's intervention. Currently, these technologies are already relatively widespread. Technologies that focus on variability require expertise, a large amount of time and effort to evaluate data and their economic benefits may not always be clear. These negatives are manifested in the form of their very gradual implementation despite the fact that many have been available for decades. An important factor that influences the successful implementation of precision farming technologies in practice is their reliability and mutual compatibility. From an economic point of view, it is also necessary to view these technologies as a whole and assess all their positive and negative aspects together across the farm.

Finally, it should be highlighted that these technologies are not intended to replace farmer's expertise and experience, but to provide them with the tools to help them make faster, better and more efficient decisions while caring for their fields and crops.

Keywords: crop production, precision agriculture, variable rate applications, vegetation index, economics

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Cíl práce	11
3	Literární rešerše	12
3.1	Precizní zemědělství.....	12
3.2	Variabilita.....	13
3.3	Globální navigační satelitní systémy	15
3.3.1	Princip činnosti GNSS.....	15
3.3.2	Souřadnicové systémy	17
3.4	Navigace strojů.....	18
3.4.1	Přijímače GNSS signálu	18
3.4.1.1	GNSS navigace strojů.....	18
3.4.1.2	Ruční GNSS přijímače	19
3.4.2	Navigace strojů s využitím senzorů.....	19
3.4.2.1	Laserové navigace	19
3.4.2.2	Radar.....	20
3.4.2.3	Ultrazvukové senzory	20
3.4.2.4	Strojové vidění.....	20
3.4.3	Řízený provoz po pozemcích	21
3.5	Nosiče senzorů a pracovních strojů v precizním zemědělství.....	22
3.5.1	Pozemní systémy	22
3.5.2	Nepilotované letecké systémy	23
3.5.3	Pilotované letecké systémy	23
3.5.4	Satelitní systémy.....	23
3.6	Analýza vlastností půdy, porostu a škodlivých organismů.....	24
3.6.1	Analýza půdních vlastností	25
3.6.1.1	Laboratorní rozborů půdy	25
3.6.1.2	Senzory využívající elektromagnetické záření	26
3.6.1.3	Svažitosť pozemků.....	27
3.6.1.4	Konduktivita a rezistence půdy	28
3.6.1.5	Permitivita půdy	29
3.6.1.6	Mechanický odpor půdy	29

3.6.1.7	Akustické senzory.....	29
3.6.1.8	Elektrochemické senzory.....	29
3.6.2	Analýza vlastností porostu	30
3.6.2.1	Laboratorní rozbory rostlinného materiálu.....	30
3.6.2.2	Mapování výnosu a kvality produkce.....	30
3.6.2.3	Senzory využívající elektromagnetické záření	31
3.6.2.4	Strojové vidění.....	32
3.6.2.5	LiDAR	33
3.6.3	Analýza škodlivých organismů	33
3.6.3.1	Plevelé	33
3.6.3.2	Škůdci	34
3.6.3.3	Choroby	35
3.7	Zpracování získaných informací a informační systémy.....	35
3.8	Pěstování plodin s využitím precizního zemědělství.....	36
3.8.1	Variabilní zpracování půdy	37
3.8.2	Variabilní setí	37
3.8.3	Variabilní hnojení.....	37
3.8.4	Variabilní aplikace pesticidů	39
3.9	Ekonomický a provozní dopad precizního zemědělství	40
3.9.1	Ekonomický dopad.....	41
3.9.2	Provozní dopad.....	43
3.10	Budoucnost precizního zemědělství.....	44
4	Závěr	46
5	Seznam literatury	48

1 Úvod

V souvislosti se zemědělstvím je často zmiňován neustálý růst lidské populace a s tím spojená potřeba růstu zemědělské produkce. Také je ale často zmiňován negativní vliv zemědělství na životní prostředí především ve vztahu k používání pesticidů a průmyslových hnojiv. V Evropě je v současné době značný tlak veřejnosti proti konvenčnímu způsobu zemědělství, ať už ve vztahu k rostlinné, tak i k živočišné výrobě. S tím jsou spojené zákazy a omezení již známých a osvědčených postupů.

Tento trend však do značné míry stojí proti růstu zemědělské produkce i proti růstu její efektivity. Dalším faktorem, který jde proti zvyšování produkce, je klimatická změna, která je navíc opět značnou částí veřejnosti dávana za vinu právě zemědělcům. Pokud bude limitujícím faktorem nedostatek dešťových srážek, nebo dlouhodobě stejné množství srážek při významně vyšších teplotách, tak bude velmi problematické až nemožné dosahovat vyšších, nebo alespoň současných výnosů. S tím je spojené významné ekonomické riziko návratnosti již vložených investic během hospodářského roku především ve formě dusíkatých hnojiv, která navíc nebudou plodinami využita a následně v období intenzivnějších srážek dojde k jejich proplavení mimo hlavní kořenovou zónu rostlin a do spodních vod. V neposlední řadě je také otázkou, jak intenzivně se budou vyvíjet rezistence škodlivých organismů vůči současným pesticidům a jejich účinným látkám a zda v budoucnu budou k dispozici nové účinné látky, které zvládnou rezistentní škodlivé organismy potlačit.

Důležitou problematikou je také ekonomická situace zemědělských podniků, které čelí nárůstu všech nákladových položek, jako jsou například mzdy, pachtovné, ceny osiv, hnojiv, pesticidů a techniky. Přitom výkupní ceny komodit v posledních letech spíše klesají vlivem lokálního nadbytku zemědělské produkce v Evropě. Extrémním způsobem také rostou požadavky na odborné znalosti zemědělských pracovníků na všech pozicích vlivem technologického pokroku a legislativních nařízení a restrikcí.

Z výše uvedeného vyplývá, že zemědělci se musí čím dál více soustředit na zvyšování efektivity své práce, tedy na snížení či eliminaci veškerých neúčelných nákladů při udržení vysoké kvality a množství produkce. To vše při extrémním tlaku veřejnosti a legislativy na způsob hospodaření a rizika neúrody vlivem klimatické změny. Jako východisko z této situace mohou zemědělcům pomoci nové vědecké poznatky a moderní technologie. Velká skupina technologií a obecně přístupu k hospodaření na zemědělské půdě, který cílí na zvyšování efektivity, je označován souhrnně jako precizní zemědělství.

2 Cíl práce

Cílem této práce bylo vytvoření uceleného přehledu technologií precizního zemědělství uplatnitelných v systémech rostlinné výroby a analýza jejich vlivu na chod zemědělského podniku z agrotechnického, provozního a ekonomického hlediska. Byl popsán vývoj jednotlivých technologií do současnosti a očekávaný trend v následujících letech. U zvolených technologií byl analyzován jejich vliv na hospodaření podniku.

3 Literární rešerše

3.1 Precizní zemědělství

Pojem precizní zemědělství může být obecně popsán jako provádění vhodných postupů o vhodné intenzitě na správném místě a ve správném čase (Mulla 2015). Podrobněji je možné precizní zemědělství definovat jako komplexní systém péče o plodinu, který sbírá, zpracovává a analyzuje data různých veličin s uvažováním jejich prostorové a časové variability a ty poté kombinuje s dalšími dostupnými informacemi, aby agronom mohl provést co nejlepší rozhodnutí s ohledem na zvýšení efektivity využití dostupných surovin, produktivity práce, dosaženého výnosu a kvality produktu a ziskovosti. To vše při minimalizaci negativního dopadu na životní prostředí (Shibusawa 1998; Reichardt 2009).

Z výše uvedeného mimo jiné vyplývá, že v systému precizního zemědělství není na určitý souvislý zemědělsky využívaný prostor (zemědělský pozemek) nahlíženo zjednodušeně jako na homogenní celek, ale je zkoumána i variabilita vlastností uvnitř tohoto prostoru, která je dána přírodními zákonitostmi. Tato základní myšlenka precizního zemědělství však není ve své podstatě nová. V minulosti byla jednotlivá pole výrazně menší a jejich hranice byly přizpůsobeny krajině a jejím vlastnostem. Tehdejší rolníci měli možnost individuálně volit péči o jednotlivá pole dle jejich stavu a vlastností, které byly mnohem blíže homogenitě právě vlivem jejich menší rozlohy a vhodného prostorového uspořádání. Navíc každý rolník své pole podrobně znal na základě zkušeností, které se mnohdy předávaly z generace na generaci. Seskupováním polí do větších celků, zvyšováním intenzity hospodaření, využíváním výkonnější mechanizace, průmyslových hnojiv, pesticidů a snižováním počtu pracovníků v zemědělství v druhé polovině minulého století se stalo velmi problematickým až nemožným udržet podrobný přehled o jednotlivých pozemcích nebo dokonce v rámci těchto pozemků brát ohled na jejich heterogenitu (Stafford 2000; Neudert et al. 2015).

Precizní zemědělství je tedy z tohoto pohledu zaměřeno především na větší podniky s intenzivní zemědělskou výrobou a s většími půdními celky a umožňuje jim návrat k detailnímu a individuálnímu přístupu jaký měli jednotliví rolníci v minulosti (Zhang et al. 2002; Pedersen 2017).

Do konceptu precizního zemědělství ale nepatří pouze technologie zaměřující se na variabilitu, ale obecně jakékoliv technologie, které jsou zaměřeny na zvýšení efektivity produkce při snížení negativního dopadu na životní prostředí. Hranice mezi tím, co je a co není považováno za precizní zemědělství, není přesně definovaná a každý si pod tímto pojmem může představit něco jiného. Obecně jsou to však moderní technologie, které souvisí s vývojem elektroniky a informačních systémů. Je však nutné zdůraznit, že tyto technologie v žádném případě nenahrazují klíčovou roli zemědělce v rozhodovacím procesu (Shannon et al. 2018).

Velmi rychlý rozvoj elektroniky a výpočetní techniky v posledních dekadách umožnil sběr a zpracování nepřehledného množství informací. Rozmach technologie globálních navigačních satelitních systémů umožnil přiřadit ke každé hodnotě sledované veličiny i informaci o její poloze. Opačně je možné pomocí této technologie navést jakýkoliv stroj či zařízení na konkrétní místo na pozemku, kde by měla být vykonána určitá činnost anebo stroj po pozemku v přesné trajektorii navádět, tak aby jeho pohyb byl optimální. V různých fázích

vývoje či komerčního nasazení existují senzory veličin, které umožňují monitorovat nejen půdní vlastnosti a vlastnosti porostu, ale i přítomnost škodlivých organismů a jejich identifikaci. Výstupem senzorů je velké množství informací, které je nutné zpracovat a vytvořit z nich srozumitelný výstup nejčastěji v podobě map, v nichž jsou graficky vyjádřeny různé intenzity sledované veličiny. Za tímto účelem jsou vyvíjeny různé informační systémy. Zpracovaná data lze následně použít pro variabilní vykonávání agrotechnických činností, ať už se jedná o zpracování půdy před setím nebo během vegetace, setí, hnojení či aplikaci pesticidů. Přesnost a spolehlivost všech výše uvedených technologií se může zásadním způsobem lišit a velmi záleží na úrovni dostupného technického a programového vybavení a na znalostech uživatele (Krishna 2013).

Rychlost zavádění technologií precizního zemědělství je pomalejší, než se původně očekávalo i přes to, že tyto technologie jsou ve většině případů již komerčně dostupné (Tey et al. 2012). Pro zavedení těchto technologií jsou ve většině případů nutné nezanedbatelné investice do specifické techniky a programového vybavení, které nemusí mít na první pohled jasnou návratnost. Je nutné zásadním způsobem rozšířit znalosti všech pracovníků od obsluh strojů po vedoucí pracovníky, aby byli schopni s novými technologiemi pracovat. Předpokladem pro implementaci technologií precizního zemědělství je také důvěra vedoucích pracovníků v tento koncept a jejich ochota jej přijmout (Shockley et al. 2019).

3.2 Variabilita

Při pohledu na satelitní snímky zemědělské krajiny je zřejmé, že půda a případně porost není v rámci všech pozemků homogenní. Tyto rozdíly jsou nejčastěji způsobeny lokálními změnami vlastností půdy či porostu uvnitř pozemků. Z pohledu půdy se může měnit například její zrnitost – změna poměru jemných a hrubých částic, hloubka ornice, míra utužení, půdní reakce – pH, obsah minerálních látek, obsah organické hmoty a dostupnost vody. Z pohledu porostu se může měnit například hustota porostu, vegetační fáze, obsah vody a minerálů v rostlinách, přítomnost a intenzita škodlivých organismů jako jsou plevely, choroby a škůdci (Heege 2013). Rychlost a intenzita s jakou se vlastnosti v prostoru mění, je různá a závisí na konkrétní vlastnosti. Některé, jako například obsah nitrátů v půdě se mění velmi rychle od milimetrů po metry, jiné jako například obsah organické hmoty v půdě se mění pozvolna v řádu metrů až kilometrů (Adamchuk et al. 2010).

Vlastnosti půdy, porostu či škodlivých organismů se nemění pouze v prostoru, ale i v čase. Změny mohou probíhat rychle jako například nitrifikace aplikovaného hnojiva či nálet škodlivého hmyzu anebo pomalu jako například změna půdní zrnitosti. Pochopení zákonitostí časové variability půdy, rostlin či škodlivých organismů je důležité pro odhad budoucího chování těchto faktorů (Kitchen & Clay 2018).

Prostorová variabilita vlastností půdy a porostu se může projevovat buď náhodně (random pattern) tak, že veškerá místa na pozemku jsou variabilitou ovlivněna stejně anebo v určitém vzoru (nested pattern), to znamená, že na pozemku jsou oblasti různých tvarů a velikostí, kde daná vlastnost dosahuje vyšších hodnot a naopak. Stejným způsobem je možné rozdělit variabilitu časovou. Je nutné vhodně zvolit prostorové a časové rozlišení, jakým bude variabilita zkoumána. To, co se může zdát v jednom rozlišení jako náhodné rozložení, může v jiném rozlišení představovat určitý vzor (Heege 2013).

V současné době již technologie umožňují snímat a zaznamenat mnoho různých vlastností půdy či porostu, které se v rámci pozemku mohou měnit. Měření a analýza jakékoliv veličiny však prakticky vždy představuje určité náklady navíc. Výše těchto nákladů je mimo jiné ovlivněna požadovanou přesností a prostorovým a časovým rozlišením, tedy tím, kolik hodnot sledované veličiny bude zaznamenáno na jednotku plochy (například hektar) a kolikrát bude toto měření opakováno v rámci určitého časového úseku (například rok). Je důležité stanovit, jak rychle se sledovaná veličina může měnit v rámci prostoru a času, v jakém časovém a prostorovém rozlišení je možné snímání a záznam provádět a v jakém časovém a prostorovém rozlišení je možné provést případný zásah. Z této úvahy je poté možné zvolit vhodné časové a prostorové rozlišení pro konkrétní veličinu. Je ekonomicky neúčelné měřit určitou veličinu ve vysokém rozlišení, když následný zásah nebude možné ve stejném rozlišení provést. Opačně však není vhodné měřit určitou veličinu v příliš nízkém rozlišení, které by přítomnou variabilitu nemuselo zaznamenat (Adamchuk 2010).

V terminologii precizního zemědělství je spolu s pojmem prostorové rozlišení používán také pojem buňka (cell), která je definovaná svou velikostí, umístěním v rámci pozemku a svým tvarem. Buňka představuje nejmenší jednotku prostoru, který je již v rámci variabilního přístupu ošetřován jednotně. Nízké rozlišení znamená nižší počet buněk o větší velikosti a vysoké rozlišení znamená vyšší počet buněk o menší velikosti (Heege 2013).

Jak již bylo uvedeno výše, tak je ekonomicky neúčelné, aby velikost buněk byla z pohledu stroje provádějícího ošetření menší, než je velikost, kterou je možné variabilně provádět případný zásah (pracovní záběr stroje, případně sekce a rychlost reakce pracovních orgánů). Stroje obvykle provádí zásah v určité šířce po přibližně rovné trajektorii. Tvar buněk je pak obvykle definován jako čtverec nebo obdélník. Velikost buňky kolmo na směr jízdy odpovídá nejmenší variabilně ošetřitelné šířce (jeden nástroj, jedna sekce, celý pracovní záběr stroje). Velikost buňky ve směru jízdy pak odpovídá nejmenší možné vzdálenosti, za kterou je stroj schopen reagovat na požadovanou změnu (otevření/zavření trysky či hradítka, zapnutí/vypnutí secích botek a další). Tento přístup však respektuje pouze technické možnosti stroje a neuvažuje skutečné rozložení změn dané veličiny v prostoru. Pokud se určitá vlastnost mění v rámci pozemku pozvolně, tak není nutné bez ohledu na technické vybavení stroje provádět variabilní ošetření o vysokém prostorovém rozlišení. Opačně pokud by se daná vlastnost v prostoru měnila velmi rychle, tak je omezení dáno právě technickými možnostmi stroje. V současné době však stroje běžně mohou měnit chování na velmi malém prostoru (jednotky metrů i méně) a tak je vhodné zaměřit se na stanovení optimální velikosti buněk z pohledu vlastností půdy či porostu. Pro tento účel je využíváno statistických výpočtů (Heege 2013).

Matheron (1963) definoval popis závislosti změny určité veličiny v prostoru pomocí tzv. variogramu, který udává závislost semivariance na vzdálenosti. Semivariance je velmi zjednodušeně míra rozptylu všech párů naměřených hodnot, které jsou od sebe stejně vzdálené. Předpokladem prostorové závislosti určité veličiny je, že rozptyl (semivariance) hodnot této veličiny v bodech naměřených ve vzájemně menší vzdálenosti bude nižší než u bodů naměřených ve vzájemně větší vzdálenosti. Od určité vzdálenosti mezi body, která je označována jako dosah variogramu (range), se již hodnota rozptylu nezvyšuje a body, které jsou více vzájemně vzdálené, již nejsou prostorově závislé. Z toho vyplývá, že při návrhu velikosti buněk pro variabilní ošetření je nutné, aby velikost buňky byla menší, než je rozsah

variogramu. Hodnota semivariance by teoreticky při vzdálenosti mezi body blízké nule měla být nulová, což je ale v praxi spíše výjimka. Tato vlastnost označovaná jako zbytkový rozptyl (nugget variance) představuje složku rozptylu, která je způsobena buď variabilitou na nižší úrovni vzdálenosti, než je nejmenší vzdálenost použitého vzorkování, nebo chybami měření. Čím menší je podíl zbytkového rozptylu, tím vyšší je míra prostorové závislosti a naopak. V extrémním případě může být celý rozptyl ve formě zbytkového rozptylu, což značí, že při daném vzorkovacím měřítku nevykazuje veličina zřetelnou prostorovou závislost a nemá smysl provádět variabilní ošetření. Variogram může vykazovat různý průběh v různých směrech, což značí anizotropii sledované vlastnosti. Pro výpočet variogramu je nutné získat dostatečný počet vzorků vhodně rozmístěných napříč pozemkem. Pro isotropní rozložení je doporučený minimální počet vzorků 100 (Kerry & Oliver 2008; Heege 2013; Neudert & Lukas 2015).

Z výše uvedeného vyplývá, že největší možná velikost buňky je ovlivněna dosahem variogramu. Z pohledu vzorkování je nutné, aby vzdálenost vzorků odebraných kdekoliv ze dvou sousedících čtvercových či obdélníkových buněk byla menší, než je rozsah variogramu. Z toho vyplývá největší možná velikost buňky jako polovina rozsahu variogramu (Kerry & Oliver 2008). Variogramy půdních vlastností byly experimentálně stanoveny pro velké množství půd a podmínek a nejvíce rozsahů variogramů byly mezi 20 metry až 110 metry (McBratney & Pringle 1999). Z toho vyplývá, že obecně by velikost buňky pravděpodobně měla být mezi 10 metry až 55 metry, což může být proveditelné pro různé online senzory, avšak pro běžný odběr vzorků s laboratorní analýzou by tento způsob byl ekonomicky neúnosný (Heege 2013).

3.3 Globální navigační satelitní systémy

Precizní zemědělství je založené na sledování změn v prostoru a čase a provádění vhodných reakcí na zjištěné změny. Orientace v prostoru byla dříve (a stále v běžném zemědělství je) omezena na zkušenosti zemědělců, kteří přibližně ví, která část pozemků je úrodnější, na které části je půda lehčí nebo naopak těžší, na které části se vyskytují konkrétní druhy plevelných rostlin apod. Cílem precizního zemědělství je tyto oblasti prostorově popsat mnohem přesněji, než je běžně zemědělec schopen. K tomu je nutný systém, který při měření sledovaných veličin umožní zaznamenat i místo měření a který dále umožní při provádění reakcí návrat na konkrétní místo. V současné době je orientace v prostoru zajištěna globálními navigačními satelitními systémy (GNSS z anglického Global Navigation Satellite System) (Whelan & Taylor 2013).

3.3.1 Princip činnosti GNSS

Běžně je tento souhrnný termín zaměňován s termínem GPS (Global Positioning System). NAVSTAR GPS je pouze jednou z GNSS technologií a byl vyvinut v USA původně pro vojenské účely. Na konci 20. století byl jako první a v té době jediný uvolněn i pro civilní využití. Mezi další systémy GNSS patří Ruský GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), Evropský Galileo a Čínský BeiDou. Poslední dva zmíněné systémy jsou stále ve vývoji, nicméně oba plánují plnou funkčnost na rok 2020. Následující text bude

zaměřen na popis systému GPS, který je v našich podmínkách nejvíce rozšířen, nicméně všechny systémy GNSS pracují na podobném principu (Heege 2013).

Obecně tyto systémy fungují tak, že na oběžnou dráhu Země byly umístěny umělé družice, které neustále vysílají datové zprávy (signály) mimo jiného s informacemi o své aktuální poloze a času vyslání této datové zprávy. Speciální přijímač na Zemi tyto signály zachycuje, zpracovává a na základě známého času potřebného k doručení datových zpráv, rychlosti šíření vysílaných signálů a známých pozic satelitů vypočítává svou polohu. Přijímač pro určení své polohy musí vypočítat svou zeměpisnou šířku, zeměpisnou délku a nadmořskou výšku. Pro určení všech těchto údajů musí zpracovat signál nejméně od čtyřech satelitů. Z čím většího počtu satelitů přijímač signály zpracovává, tím přesněji je schopen určit svou polohu. Celý tento proces je však zatížen chybami, které omezují přesnost určení pozice. Chyby mohou vzniknout například při průchodu signálu atmosférou, nepřesností atomových hodin v satelitech a určování pozice satelitů na oběžné dráze, odrazy signálů od terénních nerovností a budov, v přijímačích GNSS signálů, které nemají přesné možnosti určení času a mohou být ovlivněny okolními zdroji rušení apod. (Whelan & Taylor 2013).

Běžná přesnost navigačních systémů je v řádu metrů, což by bylo pro mnohé aplikace nedostatečné. Proto byly zavedeny korekční systémy. Systém DGPS (diferenciální GPS) zpřesňuje pozici získanou systémy GNSS. Jedná se o referenční stanice o známé poloze, které sami vyhodnocují svou polohu stejně jako GPS přijímač a vypočtenou polohu srovnávají se svou skutečnou polohou. Rozdíl (diference) mezi vypočtenou a skutečnou polohou referenční stanice představuje nepřesnosti, které běžný GPS systém zatěžují. Z takto získaných dat jsou vypočteny korekce pro GPS přijímače do určité vzdálenosti od referenční stanice. Korekční data jsou následně těmto GPS přijímačům odesílána. Těchto systémů je více a liší se přesností, způsobem předávání korekčního signálu, opakovatelností měření a výší poplatku za využívání (Balafoutis et al. 2017).

V současné době je za nejpresnější v zemědělství běžně dostupnou korekční metodu považován systém RTK (Real-time kinematic), který poskytuje přesnost v řádu centimetrů. Velkou výhodou je také to, že přesnost je absolutní, tedy že zaměřená pozice se v průběhu času nemění, což je základní předpoklad například pro meziřádkové setí nebo plečkování. Systém RTK dosahuje vysoké přesnosti oproti ostatním korekčním systémům tím, že zpracovává mimo kódovaných zpráv ze satelitů i nosné vlny, na které jsou kódované zprávy modulovány. Systém je pomocí složitých algoritmů schopen spočítat počet nosných vln mezi satelitem a přijímačem a ze známé vlnové délky nosné vlny spočítat mnohem přesněji vzdálenost mezi satelitem a přijímačem. Tento proces však není triviální, a proto RTK korekce obvykle vyžaduje delší čas než běžná diferenciální korekce. Systém RTK pro zpřesnění také využívá diferenciálních korekcí. Jedním ze způsobů je samostatná základová korekční stanice, která ale musí být relativně blízko RTK přijímači – řádově 10-20 km. Toto omezení může být eliminováno připojením RTK přijímače k síti základových stanic, které korekční signál zpracovávají kolektivně. V blízkosti přijímače tato síť vytváří další korekční stanici (pouze virtuální) a vzdálenost od přijímače poté může být až 70 km. Přenos korekčních dat mezi samostatnou základovou stanicí a přijímačem obvykle probíhá pomocí rádiového signálu. Přenos korekčních dat mezi sítí základových stanic a přijímačem probíhá obvykle pomocí internetového připojení (Heege 2013; Stombaugh et al. 2018).

3.3.2 Souřadnicové systémy

Pro reprezentaci pozice určitého místa na zemském povrchu jsou používány souřadnicové systémy. Souřadnicové systémy jsou výhodně využívány i jako komunikační rozhraní systémů GNSS. Polohu každého místa na zemském povrchu je možné definovat pomocí souřadnic vztahených k určitému souřadnicovému systému. V souvislosti se systémy GNSS jsou využívány dva typy souřadnicových systémů – geografický souřadnicový systém a kartézský souřadnicový systém. Geografické souřadnicové systémy pro určení polohy určitého místa využívají zeměpisnou délku a zeměpisnou šířku, které jsou uváděny ve stupních. Zeměpisná šířka je definována jako úhel, který svírá plocha rovníku s přímkou procházející příslušným bodem a středem země. Může nabývat hodnot od -90° pro jižní pól po $+90^\circ$ pro severní pól. Zeměpisná délka je definována jako úhel mezi rovinou nultého poledníku (prochází Královskou observatoří v Greenwichi v Anglii) a rovinou poledníku procházejícího příslušným bodem. Místa ležící na západ od nultého poledníku mají hodnotu zeměpisné délky zápornou – 0° až -180° . Místa ležící na východ od nultého poledníku mají hodnotu zeměpisné délky kladnou – 0 až 180° . Geografické souřadnicové systémy využívají různých matematických modelů pro zjednodušení tvaru zemského povrchu. Každý souřadnicový systém využívá jiný model, proto se hodnoty souřadnic v různých systémech liší, a proto je důležité vždy znát, ve kterém souřadnicovém systému jsou souřadnice uvedeny. Nejznámějším a pro účely GPS využívaným geografickým souřadnicovým systémem je WGS84 (World Geodetic System 1984). Problémem geografických souřadnicových systémů je měření vzdálenosti. Každý stupeň zeměpisné délky představuje odlišnou vzdálenost v závislosti na zeměpisné šířce. V extrémním případě představuje 360° zeměpisné délky na rovníku vzdálenost 40 075 kilometrů a na pólech 0 kilometrů. Z tohoto důvodu jsou pro měření vzdálenosti využívány kartézské souřadnicové systémy (označované také jako projekční), které pomocí různých matematických modelů transformují části zemského povrchu na plochu a souřadnice určitého místa jsou vyjádřeny jako vzdálenost X a Y v metrech od středu souřadnicového systému. Celosvětově užívaný je univerzální transverzální Mercatorův systém souřadnic (UTM), který rozděluje zemský povrch na velké množství menších zón a k souřadnicím je vždy přidána informace o zóně, ke které souřadnice patří (Brase et al. 2018).

V České republice je také využíván systém jednotné trigonometrické sítě katastrální (S-JTSK), což je kartézský souřadnicový systém vytvořený pro potřeby bývalého Československa a který vychází z kuželového zobrazení. Cílem bylo vytvořit souřadnicový systém tak, aby oblast Československa měla vždy obě souřadnice kladné. Osa X v tom souřadnicovém systému směřuje k jihu a osa Y k západu (Sütö 1998).

Například souřadnice budovy rektorátu České zemědělské univerzity jsou 50.1300006N 14.3735722E ve formátu WGS84, 745543.61400 1037850.60890 ve formátu S-JTSK a 33 U 455225 5553275 ve formátu UTM. Obecně je mezi souřadnicovými systémy možný převod. Pro účely záznamu a uložení souřadnic je nejvýhodnější použít geografické souřadnicové systémy a souřadnice převést do kartézských souřadnicových systémů v případě potřeby zpracování skutečných vzdáleností (Whelan & Taylor 2013).

3.4 Navigace strojů

3.4.1 Přijímače GNSS signálu

Přijímače GNSS signálu jsou v současnosti kompaktní a je možné jejich umístění na jakoukoliv zemědělskou techniku. K dispozici jsou i velmi kompaktní ruční přijímače, které mohou být využity tam, kde není účelné využívat mechanizaci. Obecně se přijímače skládají z modulu antény, která GNSS signál přijímá a zpracovává a dále z terminálu, který získanou pozici zobrazuje (Stombaugh et al. 2018).

3.4.1.1 GNSS navigace strojů

Vývoj a rozšíření technologie GNSS umožnil její využití i pro navigaci a řízení zemědělských strojů při provádění pracovních operací jako je například příprava půdy, setí, kultivace během vegetace, aplikace pesticidů, hnojení, sklizeň a další. Všechny tyto operace se vyznačují definovaným pracovním záběrem, který závisí na konkrétním stroji. Pro navigaci strojů je nutné znát tvar pozemku, jeho pozici v prostoru a případně souřadnice již přítomných kolejových řádků. Buď je možné využít mapy vytvořené při předchozích operacích, nebo již vytvořenou mapu do navigačního systému nahrát z jiného stroje, případně je možné celý pozemek objet a tím získat potřebné informace o tvaru a poloze. S těmito informacemi je následně možné nechat navigační systém vygenerovat optimální trasy jednotlivých jízd, nebo využít již známých tras a stroj do nich navigovat. Tímto způsobem je možné omezit neproduktivní jízdy vlivem nevhodně navržených tras, minimalizovat vynechávky a překryvy, zvýšit komfort obsluhy a umožnit jí více se věnovat kvalitě prováděné operace, snížit utužení půdy, zvýšit produktivitu práce, zvýšit efektivitu meziřádkové kultivace, případně meziřádkové setí. Všechny tyto aspekty v souhrnu snižují náklady, zvyšují produktivitu a výnos. V současné době se používají tři stupně autonomie navigace strojů – manuální, asistované a autonomní (Balafoutis et al. 2017).

Manuální řízení je nejjednodušší způsob využití navigačních systémů pro navádění strojů. Obsluha stroje musí sama provádět korekce směru jízdy volantem a navigační systém pouze vizuálně zobrazuje odklon od požadované trasy například pomocí LED diod v zorném poli obsluhy. Pro tento způsob řízení nejsou nutné žádné akční členy navigačního systému, a i nároky na přesnost použitých korekcí jsou nejmenší. S tím je spojena nízká pořizovací cena ve srovnání s pokročilejšími metodami (Balafoutis et al. 2017).

Asistované řízení má oproti manuálnímu řízení výhodu v přítomnosti akčního členu, který je instalován na hřídel řízení pod věnec volantu. Z toho vyplývá fakt, že volant se při jízdě otáčí. Akční člen při jízdě sám otáčí volantem dle požadované trasy. Obsluha stroje pouze kontroluje, zda navigační systém správně dodržuje trasu a zda v trase nejsou překážky, kterým je nutné se vyhnout. V takovém případě může obsluha kdykoliv převzít kontrolu nad strojem a trasu upravit. Tento systém je velkým přínosem pro obsluhu stroje, která se může více věnovat sledování kvality prováděné operace. Vzhledem k přítomnosti akčního členu a obvyklého požadavku na přesnější korekční signál je pořizovací cena výrazně vyšší než u manuálního řízení. Výhodou tohoto systému je jednoduchá opravitelnost/vyměnitelnost

v případě poruchy akčního členu a relativně snadná přenositelnost do jiného stroje (Balafoutis et al. 2017).

Autonomní řízení je nejpokročilejší a teoreticky nejpřesnější systém. Výhodou oproti systémům asistovaného řízení je přítomnost senzorů sledujících natočení kol, tedy zpětné vazby pro regulační obvod a umístění proporcionálního akčního členu přímo do hydraulického okruhu řízení stroje, což přináší rychlejší a přesnější reakce navigačního systému. Nevýhodou je praktická nemožnost přenosu akčního členu na jiný stroj v rámci běžného provozu a náročnější opravitelnost/vyměnitelnost v případě poruchy akčního členu. Tento systém má zároveň nejvyšší pořizovací cenu (Balafoutis et al. 2017).

3.4.1.2 Ruční GNSS přijímače

V některých případech není možné nebo účelné používat navigační systémy nainstalované na strojích. Může se jednat například o ruční odběry půdních a rostlinných vzorků nebo o zaměření hranic pozemků či různých překážek. Za tímto účelem se používají kompaktní GNSS přijímače s bateriovým napájením. Jako terminál pro zobrazení informací slouží buď specializované zařízení podobné dnešním mobilním telefonům či běžný mobilní telefon nebo tablet. U specializovaných zařízení může být GNSS přijímač integrovaný nebo externě umístěný a komunikující buď prostřednictvím kabelu, nebo bezdrátově. U běžných mobilních telefonů či tabletů je GNSS přijímač vždy externí, jelikož běžný integrovaný GNSS přijímač je velmi nepřesný (Balafoutis et al. 2017).

3.4.2 Navigace strojů s využitím senzorů

V některých situacích není možné či účelné využívat navigací strojů pomocí technologie GNSS. Náklady na pořízení přesné GNSS technologie jsou stále velmi vysoké a pro navigaci v již založeném porostu jsou nutné přesně definované pozice jednotlivých řádků. Stroje lze s výhodou a s velmi vysokou přesností a spolehlivostí navigovat pomocí optických senzorů neboli senzorů využívajících elektromagnetické záření bez nutnosti používat technologii GNSS (Shufeng et al. 2016).

3.4.2.1 Laserové navigace

Navigace strojů pomocí laseru (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je využívána především u sklízecích mlátiček, kde je tímto způsobem zajištěn optimální záběr žací lišty a automatické řízení stroje podél hrany porostu bez nutnosti využití technologie GNSS. Senzor je umístěn na kabině stroje a průběžně detekuje hranu porostu buď na levé, nebo na pravé straně před žací lištou sklízecí mlátičky. Podle pozice zjištěné hrany je následně upravováno natočení kol mlátičky dle požadované pozice vůči hraně porostu (Chateau et al. 2000). Systémy, které pro vnímání využívají laserové technologie, jsou často založeny na detekci doby letu paprsku. Je měřen čas, za který elektromagnetická laserová vlna vyzářená vysílačem dorazí ke snímanému povrchu, odrazí se a doletí zpět do přijímače. Ze znalosti času a rychlosti světla lze jednoduše dopočítat vzdálenost od snímaného povrchu. Zařízení, které využívají laseru jako senzoru, jsou označovány jako LiDAR (Light Detection And Ranging) (Shufeng et al. 2016).

3.4.2.2 Radar

Radar (radio detection and ranging) funguje na podobném principu jako LiDAR, ale využívá oproti laseru jinou část elektromagnetického spektra (3 MHz - 110 GHz). Pomocí radaru je možné s využitím Dopplerova efektu stanovit i rychlost snímaného objektu vůči vysílači. Radarové technologie jsou v zemědělství využívány buď pro měření rychlosti stroje, nebo jako bezpečnostní prvky (Shufeng et al. 2016).

3.4.2.3 Ultrazvukové senzory

Ultrazvukové senzory (Ultrasonic sensor) využívají podobný princip jako LiDAR s tím rozdílem, že zvukové vlny se prostorem šíří mechanickým pohybem molekul daného média (nejčastěji vzduchu) a jejich rychlost je řádově nižší oproti elektromagnetickému záření. Označení ultrazvuk znamená, že frekvence vlnění je vyšší než nejvyšší frekvence slyšitelná lidským uchem, tedy více než 20 kHz. Nejčastěji ultrazvukové senzory pracují na frekvenci mezi 40 kHz až 250 kHz. S ohledem na rychlost šíření zvukových vln je oblast detekce omezená na méně než 10 metrů. Stejně jako v případě Radaru jsou ultrazvukové senzory využívány jako bezpečnostní prvky a dále jako senzory zajišťující pozici pracovního nářadí vůči porostu (Shufeng et al. 2016).

3.4.2.4 Strojové vidění

Strojové vidění je technologie, která velmi zjednodušeně pracuje podobným způsobem jako lidský zrak. Systém je složen z kamery a počítače vybaveného algoritmy, které zajišťují zpracování, analýzu a extrakci požadovaných informací z nasnímaného obrazu. Na základě získaných informací pak může být navázána automatická operace nebo mohou být data zpracována a použita v rozhodovacím procesu. Tato technologie je běžně využívána v průmyslu například pro kontrolu kvality dílů a kompletnosti výrobků, třídění výrobků, čtení textů či kódů a mnoho dalších. V rostlinné výrobě může být požadovanou informací například přítomnost, počet, rozmístění a morfologie kulturních rostlin. Pro extrakci požadované informace z obrazu je nutné znát její jednoznačný popis a podle něj provést nejprve tzv. segmentaci, což je proces separace požadované informace od pozadí obrazu. Jako příklad může sloužit běžná separace zelených ploch, které obvykle odpovídají rostlinám od pozadí. Následně je například podle popsané morfologie provést separaci konkrétního rostlinného druhu a dále například podle tohoto druhu analyzovat geometrii řádku s kulturní plodinou (Tschärke 2018).

García-Santillán et al. (2017) navrhli novou metodu pro detekci řádků v porostu. Pro studii byl použit porost kukuřice během počátku vegetace. Studie byla zaměřena na zlepšení spolehlivosti detekce v běžných polních podmínkách včetně nerovnoměrných mezer mezi rostlinami a mezi řádky, různých světelných podmínek a přítomnosti plevelných rostlin. Výsledky prokázaly přesnost detekce pro rovné řádky se stejnými mezerami 91 %, pro řádky v oblouku se stejnými meziřádkovými mezerami 86 %, pro řádky v oblouku s různými meziřádkovými mezerami 85 %.

Dlouhý et al. (2016) testoval optickou navigaci nízko letícího dronu (1,5-2,5 m) pomocí integrované kamery jako simulaci navádění strojů v případě nedostupnosti či nevhodnosti

GPS systému. V interiérových podmínkách byla navigace na umělou trasu bezchybná, v exteriérových podmínkách byla navigace na přirozenou trasu (chodník) problematická a velký vliv měl aktuální stav počasí.

3.4.3 Řízený provoz po pozemcích

Řízený provoz po pozemcích (CTF z anglického Controlled Traffic Farming) je systém, který se zabývá optimalizací přejezdů zemědělské techniky na pozemcích za účelem snížení utužení půdy. Základním předpokladem tohoto přístupu je fakt, že rostliny nejlépe rostou na neutužené půdě a stroje se nejlépe pohybují na pevné cestě. Utužení půdy degraduje a snižuje její produktivitu především vlivem snížení prostupnosti pro vzduch, vodu a kořeny rostlin. Utužení půdy je obecně způsobeno hmotností stroje, která je přenášena na půdu obvykle pneumatikami. Čím vyšší je hmotnost stroje, tím vyšší je tlak na půdu a čím větší je styčná plocha stroje se zemí, tedy průměr a šířka pneumatik, tím je naopak tlak na půdu nižší. Extrémní případ zvětšení styčné plochy stroje se zemí jsou pásy. Z toho vyplývá, že pro redukci tlaku na půdu, a tedy i utužení je možné použít buď stroje s menší hmotností anebo stroje s co největší styčnou plochou a optimálně kombinaci obou opatření. Bohužel obě opatření mají své limity s ohledem na produktivitu práce a žádná nedokáže utužení eliminovat úplně. Pokud není možné eliminovat utužení půdy, tak je vhodné alespoň minimalizovat plochu pozemku, která bude utužením negativně ovlivněna. Kroulík (2014) provedl výzkum o procentuálním zastoupení povrchu pozemku, po které během hospodářského roku projela pneumatika stroje, a uvádí, že při konvenční technologii s využitím pluhu se jednalo o 86,1 % plochy pozemku a v případě půdoochranné technologie 63,8 % plochy pozemku. Na souvratích se vždy jednalo o více než 80 % plochy. Systém řízeného provozu byl vyvinut k tomu, aby tuto plochu redukoval a tím přispěl k vyššímu výnosu pěstovaných plodin. Realizace je provedena návrhem optimálního rozložení kolejových řádku pro veškeré stroje, které na pozemek během hospodářské sezóny vjedou. Je však nutné zajistit, aby pracovní záběry jednotlivých strojů byly vzájemně v násobcích a rozchody kol jednotlivých strojů byly sjednocené. Například v Austrálii je využíván systém rozchodu kol 3 m, pracovní záběr sečky a sklízecí mlátičky 9 m a pracovní záběr postřikovače 27 m (Tullberg 2014). Dále je nutné, aby stroje byly vybaveny systémy GNSS pro přesnou navigaci v navržených trajektoriích. S tím souvisí i možnost optimalizace trajektorií jednotlivých jízd s ohledem na tvar pozemku a přítomné překážky (Tullberg 2018).

Druhým benefitem spojeným s optimalizací přejezdů je redukce valivého odporu pneumatik spojená se snížením spotřeby paliva. Tullberg (2014) uvádí celkovou spotřebu nafty při konzervačním hospodaření se zpracováním půdy bez obracení 52 l/ha, při pokročilém no-till systému 24 l/ha a při CTF no-till systému 14 l/ha.

Celkové přínosy systému řízeného provozu je možné shrnout jako zlepšení infiltrace dešťových srážek a vodní kapacity půdy, snížení půdní eroze, zlepšení zdravotního stavu půdy a biologické aktivity, snížení potřeby energie a spotřeby paliva, zlepšení produktivity spojené s optimálním návrhem trajektorií, zlepšení výnosů pěstovaných plodin a snížení emisí (Tullberg 2018).

3.5 Nosiče senzorů a pracovních strojů v precizním zemědělství

Pro umístění senzorů či pracovních orgánů v precizním zemědělství jsou využívány různé technické prostředky od strojů již běžně v zemědělství používaných po stroje, které jsou z pohledu současného zemědělce spíše exotické, a jejich původ nemusí být se zemědělstvím vůbec spojený. Jsou to například bezpilotní letecké prostředky, satelitní systémy apod. Systémy využívané pro nesení senzorů je možné rozdělit podle způsobu jejich pohybu na ty, které se pohybují po zemském povrchu a ty, které se pohybují nad zemským povrchem. Velká skupina systémů, které se v různé výšce pohybují nad zemským povrchem, je označována souhrnným pojmem Dálkový průzkum Země (DPZ nebo v angličtině remote sensing). Tato skupina systémů je specifická tím, že jejich senzory snímají elektromagnetické záření. Blíže bude tento způsob snímání popsán v následujících kapitolách (Neudert & Lukas 2015). Technologie snímání, kdy jsou senzory velmi blízko sledovaného povrchu, nebo jsou s ním v přímém kontaktu, jsou označovány anglickým termínem Proximal sensing (Ferguson et al. 2018).

3.5.1 Pozemní systémy

Obecně pozemní systémy využívají ke svému pohybu po pozemcích kola nebo pásy. Nejběžnějším pozemním strojem je traktor, který slouží jako tažný (nosný) prostředek pro pracovní stroje. Traktory jsou v současné době běžně vybaveny terminálem, který umožňuje shromažďovat data o provozu, a pokud je traktor vybavený technologií GNSS, tak i k těmto datům přiřadit informaci o poloze. Traktory mohou být dále vybaveny různými navigačními asistenty, které umožňují více či méně samočinné řízení na pozemku. Mimo traktorů jako tažných strojů jsou používány i samohybné pracovní stroje, které jsou přímo konstrukčně osazeny pracovním ústrojím jako například samohybný postřikovač (Field & Long 2018).

V posledních letech vlivem rozvoje technologií do komerčního provozu začínají pronikat více či méně autonomní roboty označované jako UAGV (Unmanned Agriculture Ground Vehicle), které by do budoucna mohly nahradit běžné pracovní stroje s obsluhou (Tullberg 2018). V současné době již technologie umožňují více či méně přesný samočinný neboli autonomní pohyb zemědělských strojů po pozemcích spojený s prováděním určité operace. Velký počet společností již prezentuje své koncepty autonomních strojů, například John Deere, Case IH, New Holland, AGROINTELLI a další.

Jedním z hlavních požadavků na autonomní stroje je schopnost bezchybné detekce jakýkoliv překážek, a především detekce a ochrana člověka. Ochrana člověka ve vztahu k autonomním zemědělským strojům je řešena v normě EN ISO 18497 (ISO 2015), která mimo jiné předepisuje výbavu stroje, způsoby chování a metodiku testování ve vztahu k ochraně člověka.

Christiansen et al. (2016) testovali detekční systém pro ochranu člověka složený z různých senzorů (RGB kamera, 3D kamera, infrakamera a LiDAR) v podmínkách sečení trávy. Testovacími subjekty byly stojící, sedící a ležící lidé a figuríny a ISO barel dle normy EN ISO 18497 (ISO 2015). Testování ukázalo přednosti jednotlivých senzorů v konkrétních situacích a jejich slabiny v jiných situacích. RGB kamera byla schopna detekovat stojící postavy, ale účinnost se významně snižovala se vzrůstající komplexitou modelové situace.

LiDAR a 3D kamera dobře detekovaly objekty vystupující nad porost, ale nebylo možné detekovat objekty pod úrovní porostu. Infrakamera dobře detekovala objekty s odlišnou teplotou, což dobře fungovalo na detekci lidí, ale problém by mohl vzniknout v situaci s vyšší okolní teplotou, kde by rozdíl teplot nemusel být dostatečný pro detekci. V závěru byla zdůrazněna nutnost použití komplexnějšího systému vyhodnocení dat z kombinace různých typů senzorů.

3.5.2 Nepilotované letecké systémy

Nepilotované letecké systémy (UAS z anglického Unmanned Aerial Systems) jsou stroje různých velikostí, tvarů a funkcí, které mohou být dálkově řízené, nebo autonomně se pohybující nad sledovanou oblastí pomocí technologie GNSS případně v kombinaci s dalšími senzory. Mohou být vybaveny různými senzory pro monitorování, nejčastěji kamerami snímajícími různé části elektromagnetického spektra. Mohou však být také použity například pro aplikaci pesticidů (Wang et al. 2018). Výhody těchto strojů jsou především v jednoduché manipulaci, relativně nízkých nákladech pro použití, variabilitě pracovních výšek, vysokém prostorovém rozlišení výstupů ze snímačů (Simelli a Tsagaris 2015). Hlavními technickými problémy spojenými s nepilotovanými leteckými systémy jsou nedostatečná nosnost, krátká doba letu, problémy se stabilitou a manévrovatelností během nepříznivých povětrnostních podmínek, poruchovost, snadná možnost poškození a vysoké náklady spojené s opravami. Dále jsou s provozem těchto prostředků spojené legislativní problémy spojené s omezením leteckého provozu v okolí letišť a jiných zón a s nutností vlastnit příslušné licence. Náročné je také zpracování získaných dat, kdy jednotlivé snímky na sebe musí navazovat pro vytvoření ucelené mapy a mohou vzniknout problémy spojené s osvětlením snímaného pozemku (Zhang & Kovacs 2012).

3.5.3 Pilotované letecké systémy

Pilotované letecké systémy, především letadla, mohou být využity stejně jako nepilotované letecké systémy vybaveny různými senzory pro snímání zemědělských pozemků. Hlavní výhodou je delší doba letu a to, že tato technologie byla dostupná mnohem dříve než nepilotované letecké systémy a historicky představovala jednu z mála možností vzdáleného snímání pozemků. Hlavní nevýhoda je obvykle nižší prostorové rozlišení a náklady spojené se samotným leteckým systémem (Oliver 2010).

3.5.4 Satelitní systémy

Satelitní snímání je pro zemědělské účely využíváno již od sedmdesátých let minulého století, kdy byl vypuštěn satelit Landsat 1, který disponoval prostorovým rozlišením 80 m, časovým rozlišením 18 dnů a zaznamenával zelené pásmo, červené pásmo a dvě infračervená pásma při šířce pásma nejméně 60 nm. V následujících desetiletích došlo vlivem rozvoje technologií k zásadnímu vývoji až například k satelitu WorldView-2, který byl vypuštěn v roce 2009 a disponuje prostorovým rozlišením 0,5 m, časovým rozlišením 1,1 dne a zaznamenává fialové, modré, zelené, žluté, červené, red edge a NIR části spektra při šířce

pásma nejméně 40 nm. Hyperspektrální satelitní systémy pak umožňují snímkování v kroku 10 nm pro část spektra od 400 nm do 2500 nm (Mulla 2013).

Satelitní systémy mají oproti jiným systémům velkou výhodu ve velmi vysoké produktivitě, kdy během krátkého času zaznamenají velký prostor kdekoliv na Zemi při relativně vysokém časovém rozlišení (v současné době řádově dny). Data je navíc obvykle možné získat i zpětně pro vyhodnocení stavu v minulosti. Výhodou také je, že existují systémy, jejichž data jsou zdarma dostupná (například Sentinel 2). Zásadní nevýhodou je však ovlivnění získaných dat meteorologickými jevy, především oblačností. King et al. 2013 uvádí, že průměrně se oblačnost nachází na 55 % pevniny v závislosti na ročním období. Dostupnost dat je tedy těmito jevy významně ovlivněna a může být problematické získat data z konkrétního času. Další nevýhodou (oproti jiným systémům), která se však velmi rychle zmenšuje, je nižší prostorové rozlišení dat, které může být dostačující například pro hodnocení obsahu dusíku v rostlinách, ale není dostačující například pro rozpoznání plevelných rostlin v porostu. Nutno však dodat, že současné systémy s prostorovým rozlišením 30 cm (Geoeye-2) dokazují technologický pokrok (Whelan & Taylor 2013). Bližší popis využití satelitních systémů a principu jejich snímačů je uveden v následujících kapitolách.

3.6 Analýza vlastností půdy, porostu a škodlivých organismů

Získávání aktuálních a přesných informací o vlastnostech půdy, vegetace či škodlivých organismech je klíčovou součástí systému precizního zemědělství a je nutné mu věnovat maximální pozornost. Měření požadovaných veličin může probíhat buď pomocí senzorů, nebo odběrem vzorků s následnou laboratorní analýzou. Sensory pro měření půdních vlastností mohou být podle principu měření rozděleny na několik skupin. Elektrické a elektromagnetické měří elektrickou vodivost, rezistivitu, kapacitu či indukčnost, která je ovlivněna průchodem půdou. Optické a radiometrické senzory vysílají elektromagnetické záření a měří množství pohlcené a odražené energie půdními částicemi. Mechanické senzory měří tahovou sílu vyvolanou pracovními nástroji v půdě, akustické senzory snímají zvuk generovaný nástroji v půdě a pneumatické senzory měří schopnost penetrace vzduchu do půdy. Elektrochemické senzory využívají membrány, které generují napětí v odezvě na přítomnost iontů v půdě například vodík, draslík, dusík, sodík atd. Výstupní hodnota většiny výše uvedených senzorů je ovlivněna větším množstvím půdních vlastností. Ve většině případů lze najít použitelnou korelaci mezi výstupní hodnotou senzoru a příslušnou půdní vlastností pro určitý typ půdy nebo v případě zanedbatelného vlivu ostatních interferujících půdních vlastností (Adamchuk 2004).

Z pohledu průběhu měření je možné senzory rozdělit na stop-and-go a on-the-go. Stop-and-go senzory, jak už z názvu vyplývá, provedou měření při zastavení v konkrétním místě, poté se přesunou na jiné místo, kde provedou další měření. Výsledky jsou tedy bodové, detailní a obvykle s menším prostorovým rozlišením, obdobně jako při laboratorním vzorkování. On-the-go senzory měří průběžně během svého pohybu napříč měřeným pozemkem a generují velké množství informací, které je možné buď ihned zpracovat a použít pro precizní aplikaci (tento způsob je často označován jako realtime nebo online aplikace) nebo zaznamenat spolu s údaji o poloze a využít pro pozdější zpracování (tvorba aplikačních

map a offline aplikace). Oba dva typy senzorů měří vlastnosti půdy či vegetace v určitém čase. Pro zachycení časových změn veličin je nutné využívat stacionární senzory, které měří neustále stejné místo v průběhu času a naměřené informace jsou obvykle bezdrátově přenášeny ke zpracování. Volba způsobu měření sledovaných veličin závisí na konkrétní veličině a technologických možnostech jejího měření, časové náročnosti měření a následné analýzy, požadované přesnosti, požadovaného prostorového a časového rozlišení a také na výši nákladů spojených s provedením měření (Adamchuk et al. 2018).

3.6.1 Analýza půdních vlastností

3.6.1.1 Laboratorní rozborů půdy

Laboratorní rozborů půdy jsou běžně prováděny především pro určení půdní reakce, obsahu dostupných makro a mikro prvků, obsahu organické hmoty a určení kationtové výměnné kapacity. Stanovení hodnot těchto veličin je přesné v závislosti na použité laboratorní metodě. Pro potřeby běžného zemědělství se na pozemcích dle jejich velikosti provádí menší počet rozborů půdy a odběr půdy pro jeden vzorek je prováděn z větší oblasti. Například dle vyhlášky č. 275/1998 Sb. (Ministerstvo zemědělství 1998) je plocha pro odběr jednoho vzorku při agrochemickém zkoušení půd (AZP) 7 ha nebo 10 ha dle oblasti a na této ploše je provedeno nejméně 30 vpichů. Oblast odběru vzorku je možné zaznamenat s použitím GNSS přijímačů. Pro zachycení prostorových změn uvedených veličin uvnitř pozemku toto rozlišení nemusí být dostatečné. S nárůstem počtu vzorků však narůstají i náklady na jednotku plochy. Při tradičním odběru půdních vzorků s následnou laboratorní analýzou je hustota vzorkování pro účely precizního zemědělství zpravidla jeden vzorek na 1-5 ha. Mimo samotné hustoty vzorkování je také důležité rozmístění odběrů vzorků v rámci pozemku. Precizní zemědělství pracuje především s mapovými podklady a měřená data jsou na ně převáděna. V místech, ve kterých nebylo měření provedeno, a tedy zde není hodnota sledované veličiny známa, je nutné pomocí statistických algoritmů tuto hodnotu dopočítat. Běžně jsou používány 3 metody vzorkování. Náhodné vzorkování (random sampling), síťové vzorkování (grid sampling) a zónové neboli cílené vzorkování (zone sampling) (Neudert & Lukas 2015).

Náhodné vzorkování je nejběžnější a vzorky z půdy jsou odebrány náhodně bez cíleného schématu z celé plochy pozemku pro zjištění průměrné hodnoty. Zde je riziko, že vzorky budou umístěny tak, že nepostihnou variabilitu pozemku. Nejpřesnější je využití síťového vzorkování (grid sampling), kde jsou jednotlivé vzorky rozmístěny v pravidelných vzdálenostech po celé ploše pozemku v hustotě dle informací získaných z variogramu vypočteného z předchozího náhodného vzorkování. Využití je především u pozemků, kde není žádná předchozí znalost variability. Hlavním problémem této metody jsou vysoké náklady spojené s vysokou hustotou vzorkování. Zónové vzorkování (zone sampling) využívá předem známých informací o variabilitě pozemku získaných měřeními jiných veličin, které by měly odpovídat variabilitě půdy a jejichž měření lze provést ve vysokém rozlišení bez vysokých nákladů. Je možné například použít letecké nebo satelitní snímkování, výnosové mapy, elektrickou vodivost půdy a další. Na základě takto získaných dat je pozemek rozdělen na homogenní oblasti (zóny), kde je pak v každé zóně odebrány vzorky pro laboratorní

analýzu. Velikost, tvar a počet zón může být různý a závisí na variabilitě pozemku. Obecně zónové vzorkování redukuje potřebný počet vzorků ve srovnání s vzorkováním v síti. Lukas a Neudert (2010) porovnávali vzorkování v síti a zónové vzorkování na základě dat z leteckých snímků nebo měření elektrické vodivosti půdy a bylo dosaženo redukce v počtu vzorků až 48 % u zónového vzorkování oproti vzorkování v síti (Neudert & Lukas 2015).

3.6.1.2 Senzory využívající elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření je příčné postupné vlnění elektrického a magnetického pole, které se šíří prostorem rychlostí světla a je emitováno veškerými objekty, jejichž teplota je vyšší než 0 K a platí, že čím vyšší je teplota objektu, tím vyšší je frekvence emitovaného záření. Zdrojem elektromagnetického záření je sluneční energie, záření emitované ze země, případně umělý zdroj. Elektromagnetické záření je charakterizováno především pomocí frekvence vlnění, resp. její převrácené hodnoty – vlnové délky. Souhrn elektromagnetického záření o všech frekvencích je označováno jako elektromagnetické spektrum. Podle vzrůstající vlnové délky je elektromagnetické spektrum rozděleno postupně na oblasti gama záření, rentgenové záření, ultrafialové záření, viditelné záření (světlo), infračervené záření, mikrovlnné záření a rádiové záření. Pro potřeby zemědělství se nejčastěji využívá oblast viditelného záření (400-700 nm), oblast blízkého infračerveného záření (700-2 500 nm) a oblast středního infračerveného záření (2 500-25 000 nm). Teoreticky každá látka (včetně látek tvořících půdu a rostliny) může být jednoznačně charakterizována způsobem její interakce s dopadajícím elektromagnetickým zářením a následnou analýzou spektra záření vyzářeného a odraženého. Tímto způsobem je možné charakterizovat různé vlastnosti půdy i porostu. V současné době jsou tyto charakteristiky pro některé půdní a vegetační vlastnosti již známé. Je otázkou, které části spektra mají být pro snímání využity. Obecně jsou k dispozici dva přístupy, a to buď snímání frekvenčně širokých pásem spektra, nebo snímání frekvenčně úzkých pásem spektra. Výsledky jsou velmi ovlivněny technickými vlastnostmi a možnostmi snímačů, především jejich rozlišením (Heege 2013).

Spektrální rozlišení představuje schopnost přesně určit a použít pouze požadovanou vlnovou délku elektromagnetického spektra, tedy na kolik segmentů nebo spektrálních pásem je možné elektromagnetické spektrum rozdělit. Radiometrické rozlišení určuje počet možných hodnot, které mohou být pro každé pásmo uloženy. Počet a frekvence spektrálních kanálů určuje kolik a jakých částí elektromagnetického spektra je senzor schopen zaznamenat. Senzory se obecně dělí na dva typy, a to multispektrální a hyperspektrální. Multispektrální senzory obvykle měří od tří do deseti spektrálních pásem. Satelitní systémy obvykle mají frekvenčně širší spektrální pásma (wide bands) a letecké systémy mají frekvenčně užší spektrální pásma (narrow bands). Hyperspektrální senzory mohou měřit přes 200 spektrálních pásem, která jsou frekvenčně velmi úzká, obvykle méně než 10 nm (Whelan & Taylor 2013).

Senzory mohou být dle typu umístěny buď na speciálních nosičích přímo v zemi, na pracovních či tažných strojích v malé výšce nad zemí, na pilotovaných či nepilotovaných letounech, anebo na satelitech. Každý typ umístění senzorů má své využití a své výhody i nevýhody. Obecně se s vyšší vzdáleností senzorů od měřeného povrchu snižuje prostorové rozlišení a měření může být ovlivněno atmosférickými vlivy – nejčastěji oblačností. Z druhé strany s vyšší vzdáleností senzorů se zvyšuje velikost zaznamenané plochy, a tedy i

produktivita měření. Senzory umístěné v zemi, nebo v malé výšce nad zemí mohou využívat umělé zdroje elektromagnetického záření a nejsou omezeny na měření během dne (Heege 2013).

Tyto technologie jsou v současné době komerčně využívané, jelikož jsou rychlé, nedestruktivní a ekonomicky i pracovníčně efektivní ve srovnání s laboratorními rozbory. Umožňují současné měření různých fyzikálních i chemických vlastností půd jako například obsah organické hmoty a uhlíku, obsah dusíku, texturu půdy, obsah železitých oxidů, pH a vlhkost půdy a další. Jedna ze skupin senzorů využívá viditelnou a NIR část spektra a je označována jako vis-NIR (z anglického Visible and NIR). Tyto senzory mohou být použity buď laboratorně na odebrané vzorky půdy nebo pro on-the-go měření, které však nedosahuje takové přesnosti. Výsledky mohou být ovlivněny například půdní vlhkostí, okolním světlem, teplotou apod. (Adamchuk et al. 2018).

Gama spektrometr je senzor, který využívá toho, že v půdě dochází k přirozenému radioaktivnímu rozpadu, při kterém jsou emitovány částice alfa, beta a gama záření. Částice alfa a beta jsou však velmi rychle odstíněny půdou. Gama záření je elektromagnetické záření o vysoké frekvenci, dokáže lépe pronikat půdou a je tedy možné jej měřit. I tak je však možné snímat gama záření pouze z částic, které jsou v půdě do hloubky 50 cm, kdy je již veškeré záření pohlceno. Gama záření je navíc významně ovlivněno vlhkostí půdy, kdy každé procento vlhkosti půdy utlumí procento gama záření. Nejčastěji jsou v půdě přítomny radioaktivní izotopy draslíku, uranu a thoria, které při rozpadu emitují gama záření o různé frekvenci. Gama záření může být bezkontaktně měřeno gama spektrometry umístěnými na pozemních či leteckých platformách. Naměřené hodnoty indikují variabilitu mateční horniny a půdotvorného procesu (Whelan & Taylor 2013). Söderström et al. (2016) využili data z leteckého mapování gama spektrometrem pro analýzu půdní variability ve Švédsku a uvádí, že většina ploch ve Švédsku je již letecky zmapována pomocí gama spektrometru.

Georadar (GPR z anglického Ground Penetrating Radar) využívá přenos a odraz elektromagnetických vln o velmi vysoké frekvenci pro detekování variability půdních vlastností a různých podzemních objektů či otvorů. Hlavním prvkem ovlivňujícím odrazivost je relativní permitivita. S ohledem na velký rozdíl relativní permitivity mezi půdou a vodou je možné senzor použít i pro měření variability půdní vlhkosti (Lambot et al. 2004). Skládá se z vysílače a přijímače, které se pohybují nad povrchem půdy (Adamchuk et al. 2018) Castrignanò et al. (2018) použil georadar pro mapování půdní variability u olivovníkového porostu v Itálii.

3.6.1.3 Svažitost pozemků

Svažitost pozemků ovlivňuje mnoha způsoby systém hospodaření. Má vliv na pohyb vody, a tedy i riziko vodní eroze spojené s přesunem půdy ze svahů do údolí, což se může projevit na variabilitě porostu mezi svažitými a údolními částmi pozemků. Ovlivňuje vznik podmáčených nebo naopak vysušených oblastí a ovlivňuje oslunění půdy a tím i teplotu půdy. Čím je menší úhel mezi půdou a dopadajícími slunečními paprsky, tím méně sluneční energie je do půdy předáno a tím nižší je teplota půdy (Whelan & Taylor 2013).

Mapu svažitosti pozemků je možné sestavit z dat navigačních systémů. Každý navigační systém mimo jiné zaznamenává i nadmořskou výšku. Je tedy možné využít data

z různých pracovních operací. S ohledem na prostorové rozlišení je vhodné využít pracovní operace s malým záběrem například hluboké zpracování půdy. Z pohledu náročnosti na přesnost systému GNSS je vhodné využít co nejpřesnější (například RTK), jelikož vertikální chyba systému je obvykle násobně větší než chyba horizontální. Pro zpřesnění je možné použít data z většího počtu přejezdů a ty poté zprůměrovat. Takto získaná data lze převést do tzv. digitálního modelu terénu (DEM z anglického Digital Elevation Model) (Heege 2013).

Moravec et al. (2017) porovnávali různé zdroje dat o svažitosti pozemků ve vztahu k výnosu jarního ječmene. Byla porovnávána data získaná pomocí dronu, leteckého LiDARu a sklízecí mlátičky. V případě dronu bylo prostorové rozlišení 0,05 m, pro letecký LiDAR 5 m a pro sklízecí mlátičku do 0,3 m. Schopnost digitálního modelu terénu postihnout variabilitu výnosu byla pouze 22 % bez ohledu na použitou technologii. Autoři uvádí, že v takovém případě není účelné používat časově a finančně nákladné prostředky a je vhodnější použít data s nižší přesností, která mohou být dostupná zdarma.

3.6.1.4 Konduktivita a rezistence půdy

Konduktivita je schopnost látky vést elektrický proud. Půda může vést elektrický proud přes půdní roztok, přes kationty na jílových částicích a přes pevné částice, které jsou v kontaktu. S ohledem na různé cesty je konduktivita ovlivněna více půdními vlastnostmi – obsahem jílu, vlhkostí půdy, kationtovou výměnnou kapacitou, koncentrací iontů v půdním roztoku a teplotou půdy. Vyšší hodnoty zmíněných veličin znamenají vyšší konduktivitu a obecně vyšší konduktivita představuje vyšší úrodnost půdy a potenciální výnos. Příliš vysoké hodnoty naopak ukazují na zasolení půdy. Corwin a Plant (2005) uvádí, že první použití senzorů pro měření konduktivity půdy bylo již v 70. letech minulého století právě pro měření zasolení půdy. Konduktivita půdy může být měřena buď bezkontaktně pomocí senzorů pracujících na principu elektromagnetické indukce nebo kontaktně pomocí senzorů pracujících na principu rezistivity (Whelan & Taylor 2013; Adamchuk et al. 2018).

Indukční senzory jsou vybavené páry indukčních cívek, kde vždy jedna cívka vytváří primární magnetické pole, které indukuje vířivé proudy uvnitř půdy. Vířivé proudy v půdě indukují sekundární magnetické pole, které je detekováno druhou cívkou a jehož intenzita je úměrná velikosti proudu uvnitř půdy (Whelan & Taylor 2013).

Lukas et al. (2018) testovali korelaci mezi hodnotami z indukčního senzoru a půdními vlastnostmi získanými laboratorními rozbory. Výsledky ukázaly korelaci hodnot z indukčního senzoru s obsahem jílových částic v půdě a obsahem organické hmoty v půdě. Naopak výsledky neprokázaly vztah mezi hodnotami konduktivity půdy a obsahu hlavních makroprvků a pH.

Senzory měřící rezistivitu půdy musí být s půdou v kontaktu – penetrovat ji. Jsou složeny z aktivního páru elektrod, který do půdy vysílá el. proud při známém napětí a pasivních párů elektrod, které měří pokles napětí v závislosti na vzdálenosti od aktivního páru elektrod. Rezistivita půdy je převrácená hodnota konduktivity, takže konduktivitu lze jednoduše vypočítat (Adamchuk et al. 2018).

3.6.1.5 Permitivita půdy

Relativní permitivita představuje velmi zjednodušeně schopnost látek udržet elektrický náboj. Její hodnoty jsou v rozsahu 3 až 6 pro půdu a 80 pro vodu. Z tohoto důvodu jsou tyto senzory využívány pro určení vlhkosti půdy. Metody se liší podle způsobu měření na časovou reflektometrii (Time Domain Reflectometry – TDR), frekvenční reflektometrii (Frequency Domain Reflectometry – FDR) a kapacitní metodu (Frequency Domain Capacitance – FD). U TDR jsou do půdy vloženy kovové jehly a je měřen čas, který trvá vysokofrekvenčnímu impulsu „proběhnutí“ mezi jehlami. Metoda FDR měří změnu vlastní frekvence kondenzátoru vytvořeného z kovových desek či jehel umístěných v půdě, kde půda funguje jako dielektrikum kondenzátoru. V případě metody FD je měřen čas nabití kondenzátoru, kde půda opět funguje jako dielektrikum. Obecně jsou tyto senzory využívány ručně nebo jako stop-and-go (Adamchuk et al. 2018). Existují však i experimenty s on-the-go senzory, které prováděl například Adamchuk et al. (2009).

3.6.1.6 Mechanický odpor půdy

Senzory mechanického odporu půdy mohou být rozděleny na dvě skupiny. Buď je měřen výkon, nebo síla potřebná k tažení nástroje půdou a měření probíhá horizontálně nebo je měřen odpor půdy proti vtlačování sondy a měření probíhá vertikálně. Mechanický odpor půdy je ovlivněn například stlačitelností půdy, třecím odporem mezi půdou a sondou a smykové napětí. Vertikální senzory jsou využívány buď pro ruční měření nebo pro stop-and-go měření. Horizontální senzory jsou využívány pro kontinuální měření napříč měřeným pozemkem (Adamchuk et al. 2018).

3.6.1.7 Akustické senzory

Naderi-Boldaji et al. (2019) vyvinuli tyčový půdní penetrometr kombinující mechanické, dielektrické a akustické odezvy pro určení půdní vlhkosti, stupně utužení a zrnitosti půdy. Byly měřeny pasivní akustické vysokofrekvenční odezvy při penetraci půdy sondou. Výsledky mimo jiné prokázaly schopnost rozlišit zrnitost půdy na základě akustické odezvy na písčité a hlinité či jílovité půdy. Rozlišení hlinité a jílovité půdy již bylo problematické. Dále byl zjištěn vliv vlhkosti půdy na frekvenční rozlišení akustické odezvy.

3.6.1.8 Elektrochemické senzory

Nejvyužívanější skupinou elektrochemických senzorů jsou iontově selektivní elektrody (ISE z anglického Ion-selective Electrodes) a iontově selektivní tranzistory s efektem pole (ISFET z anglického Ion-Sensitive Field-Effect Transistor). Využívají se především pro analýzu pH, ale mohou být využity pro zjištění koncentrace dalších iontů v půdě například H^+ , NO_3^- , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} . Senzory na bázi iontově selektivních elektrod jsou obecně složeny z referenční elektrody a iontově selektivní elektrody s membránou, která propustí pouze určené ionty. Senzor přitom měří vzniklé napětí mezi oběma elektrodami (Heege 2013). U iontově selektivních tranzistorů s efektem pole je velikost proudu mezi elektrodami tranzistoru řízena pomocí iontově selektivní membrány, a tedy intenzitou aktivity iontů. Pro

oba typy senzorů je pro H^+ ionty membrána vyrobena z kovu nebo skla, pro K^+ , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} z polyvinylchloridu a pro Na^+ ze skla (Adamchuk et al. 2018).

Smolka et al. (2017) vyvinuli polní senzor pro měření koncentrace NO_3^- , NH_4^+ , K^+ a PO_4^{3-} v půdním vzorku pomocí kapilární elektroforézy, což je metoda, která umožňuje separaci látek pomocí různé pohyblivosti v elektrickém poli a následného měření koncentrace dle vodivosti.

3.6.2 Analýza vlastností porostu

Vlastnosti porostů jsou ovlivněny mnoha abiotickými i biotickými faktory jako například vlastnostmi půdy, podmínkami stanoviště, průběhem počasí a přítomností, resp. hustotou plevelů, chorob a škůdců. Sledováním vlastností porostů je možné analyzovat vliv některých faktorů na průběh vegetace a případně provést opravné zásahy (Kitchen & Clay 2018).

3.6.2.1 Laboratorní rozborů rostlinného materiálu

Laboratorní rozborů rostlin jsou využívány především pro kontrolu obsahu živin v rostlinách ve vztahu ke hnojení porostu nebo k požadovaným obsahovým parametrům produkce. Dále je možné pomocí rozborů provádět kalibraci různých polních senzorů, které provádějí měření jinými způsoby. Mimo rozborů rostlin jsou především ve výkupech prováděny rozborů semen pro posouzení kvality produkce. Opět je možné tyto rozborů použít pro kalibraci polních senzorů měřících například vlhkost či obsahy zásobních látek (Adamchuk et al. 2018).

3.6.2.2 Mapování výnosu a kvality produkce

Výnos plodin může být během sklizně automaticky průběžně sledován pomocí tzv. výnosměřů. Principů činnosti je více a liší se i v závislosti na sklizené plodině. Obecně je však sledován záběr sklízecího stroje a jeho rychlost, množství sklizené hmoty procházející do zásobníku a její vlhkost. Způsoby sledování množství hmoty procházející do zásobníku lze obecně rozdělit do dvou skupin na ty, které sledují změnu dopadové síly a ty, které sledují změnu v objemu (Fulton et al. 2018).

Mapování výnosu kombinuje data z výnosměřů se souřadnicemi ze systémů GNSS. Výsledkem je tzv. výnosová mapa, která zobrazuje prostorové rozložení výnosu na pozemku. Mapování výnosu je zatíženo různými chybami, které mohou negativně ovlivnit kvalitu získaných dat. Chyby mohou být způsobeny nepřesností použitých senzorů, provozními podmínkami (svah, prudké změny rychlosti), chybou obsluhy stroje (nepřesné nastavení šíře záběru), nesprávně provedenou kalibrací senzorů nebo časovou prodlevou mezi místem sklizení konkrétní rostliny a jejího produktu na čidle. Není vhodné pouze na základě výnosových map stanovovat závěry, jelikož výnos plodiny je ovlivňován mnoha faktory, ať už přirozeně se vyskytujícími (například počasí, škodlivé organismy, vlastnosti půdy a topografie pozemku) nebo způsobenými hospodařením (volba odrůdy, kvalita založení porostu, vstupy hnojiv a pesticidů, zpracování půdy, osevnické postupy atd.). Výsledky výnosměřů a variabilita výnosů může sloužit například jako podklad pro zónové vzorkování

nebo jako podklad pro statistické vyhodnocení dat z několika let, kde lze lépe odlišit stálé a proměnné faktory (Neudert & Lukas 2015).

Mimo kvantitativního mapování výnosu je možné i kvalitativní mapování obsahu látek určujících kvalitu komodity. U zrnin se jedná například o obsah bílkovin, u olejnin o obsah oleje. Jejich měřením je možné doplnit informace z výnosových map a posoudit efektivitu využití dusíku a případně úpravu aplikačních zón. Tyto senzory mohou být instalovány na sklízecí mlátičky a fungují na principu blízké infračervené spektroskopie (NIRS z anglického Near Infrared Spectroscopy). Semeno je vystaveno zdroji světla a senzor měří světlo semenem odražené nebo vyzářené, které je částečně pozměněné vlivem interakce světla s molekulami semene (Whelan & Taylor 2013).

3.6.2.3 Senzory využívající elektromagnetické záření

Obecný princip využití elektromagnetického záření byl již popsán v kapitole 3.6.1.2. Odraz různých částí elektromagnetického spektra od porostu je ovlivněn jeho vlastnostmi a zdravotním stavem. Analýza těchto změn je z pohledu senzorové techniky relativně jednoduchá a poskytuje velmi efektivní nástroj. Z pohledu fyziologie rostlin jsou nejvýznamnější části spektra červené a NIR pásmo. U zdravé rostliny je modré pásmo (400-500 nm) a červené pásmo (600-700 nm) absorbováno chlorofylem a NIR pásmo (700-1300 nm) a zelené pásmo (500-600 nm) je částečně odraženo. Rozdíl mezi červeným a NIR pásmem je vysoký. Rostliny, které jsou stresované, absorbují mnohem méně záření v oblasti červeného pásma vlivem redukce aktivity chlorofylu, a odrážejí méně záření v NIR pásmu. Rozdíl mezi červeným pásmem a NIR pásmem je nízký. Pro zjednodušení a srovnávání byly zavedeny tzv. vegetační indexy, které matematicky porovnávají určité části spektra ve vztahu k určité vlastnosti porostu. Nejznámější je normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI z anglického Normalised Difference Vegetation Index), který je definován jako podíl rozdílu a součtu NIR pásma a červeného pásma. Takto uměle vytvořené pásmo vytváří obraz, ve kterém vyšší hodnota znamená lepší zdravotní stav a vitalitu porostu. Zároveň svou strukturou redukuje negativní vliv atmosférických jevů na obraz (Whelan & Taylor 2013). Index NDVI vykazuje určité problémy vlivem odrazivosti půdy bez porostu. Z tohoto důvodu byl zaveden index SAVI (Soil-adjusted vegetation index), který do výpočtu zavádí korekční koeficient, který vyjadřuje pokrytí plochy porostem a vede k potlačení vlivu půdy bez porostu. Od tohoto indexu byly odvozeny další indexy, jako například TSAVI (transformed SAVI), MSAVI (modified SAVI), OSAVI (optimized SAVI) a GESAVI (generalized SAVI). S výjimkou MSAVI všechny indexy používají určitou konstantní hodnotu korekčního koeficientu, což opět může vést k problémům, protože je před samotným použitím těchto indexů nutné znát pokryv půdy. Index MSAVI a jeho následník MSAVI2 eliminují nutnost znát pokryv půdy a korekční koeficient určují početně (Jiang et al. 2007). Dalším indexem, který optimalizuje vlastnosti NDVI je index EVI (Enhanced Vegetation Index). Ten zahrnuje korekční koeficient pro hustotu porostu podobně jako SAVI a dále zahrnuje korekci pro atmosférické jevy (Matsushita et al. 2007). Zatímco NDVI je citlivý na chlorofyl, tak EVI je více citlivý na variace struktury a typu porostu a oba indexy se vzájemně doplňují (Heute et al. 2002). Dalším indexem je například VARI (vegetation atmospherically resistant index), který nahrazuje NIR část spektra zeleným pásmem a zjednodušeně určuje,

jak zelený obraz je, a NDWI (normalized difference water index), který koreluje s obsahem vody v listech (Roberts et al. 2011).

Mimo senzorů pro off-line aplikace byly vyvinuty i senzory pro on-line aplikace. Tyto senzory jsou především využívány pro úpravu dávky při variabilním hnojení dusíkatými hnojivy. Jedním z komerčně využívaných systémů pro variabilní hnojení je N-Senzor (Yara International ASA). Je umístěn na tažném stroji a při pohybu stroje v reálném čase snímá odraz elektromagnetického záření od okolního porostu a podle vnitřních algoritmů stanovuje zásobu dusíku v rostlinách a upravuje aplikovanou dávku hnojiva. Současný model již disponuje aktivním zdrojem světla, takže není závislý na okolních světelných podmínkách. Na podobném principu pracují i další komerční systémy jako například OptRx (Ag Leader Technology), CropSpec (Topcon Positioning Systems, Inc.) nebo CropXplorer (AGXTEND). Vzájemně se odlišují konstrukcí, nabízenými funkcemi či dalšími snímanými vegetačními indexy (Adamchuk et al. 2018).

Jurecka et al. (2018) v letech 2014 až 2016 porovnávali data ze satelitního systému MODIS a Landsat 8 v podobě NDVI a EVI ve vztahu k predikci výnosu pěstovaných plodin. V případě systému MODIS byla použita data o prostorovém rozlišení 250 m a v případě systému Landsat 8 měla použitá data rozlišení 30 m. Výsledky prokázaly lepší korelaci mezi výnosy a vegetačními indexy získanými ze systému Landsat 8 oproti systému MODIS. Autoři přikládají tento rozdíl především nižšímu prostorovému rozlišení systému MODIS, který není schopen dostatečně postihnout detaily sledovaných pozemků.

Wagner & Hank (2012) srovnávali použitelnost satelitních, leteckých a pozemních měření ve vztahu k variabilní aplikaci dusíku. Pro pozemní měření byl použit YARA N-Senzor, letecké snímky zajišťoval AISA-EAGLE senzor a satelitní snímky byly pořízeny jedním z RapidEye satelitů. Výsledky ukázaly nevýhodu YARA N-Senzoru, který nesleduje celou plochu záběru stroje oproti leteckým snímkům, které podaly nejlepší výsledky. Naopak nevýhodou leteckých snímků byla cena, kterou autoři vypočítali o v přepočtu 400 Kč/ha vyšší oproti pozemnímu měření. Satelitní snímky nemohly být použity, protože jako ukazatel byl použit inflexní bod Red Edge oblasti spektra, kterým satelit nedisponoval.

Cohen et al. (2016) využili letecké snímkování jako metody pro ověření teoretických předpokladů různých metodik pro zjištění indexu vodního stresu rostlin bavlníku pomocí termokamery.

Farrell et al. (2018) použili multispektrální letecké snímky pro zjištění jejich korelace k vlastnostem porostu kukuřice. Spektrální snímky korelovaly s vlhkostí půdy, obsahem dostupného dusíku a výnosem.

3.6.2.4 Strojové vidění

Rodriguez-Moreno et al. (2016) testovali schopnost analyzovat snímky z multispektrální kamery se sub-centimetrovým rozlišením vytvořených za běžných světelných podmínek pozemní platformou a uvádí přesnost rozlišení listů, stonků, stínů, půdy apod. více než 99 %.

Liu et al. (2016) vytvořili systém analýzy obrazu pro sčítání jedinců pšenice ve fázi jednoho listu. V této studii byly snímky porostu vytvořeny běžným digitálním fotoaparátem ve výšce 50 cm nad porostem a následně zpracovány pomocí algoritmů. Jako kontrola byl

vždy skutečný počet jedinců ručně sečten. Bylo testováno pět různých odrůd pšenice a pět různých hustot porostu. Výsledky ukázaly vysokou přesnost sčítání více než 92 % pro hustoty porostu od 120 rostlin/m² do 240 rostlin/m². Pro hustotu porostu vyšší než 250 rostlin/m² byla přesnost sčítání 85 %. Odrůda pšenice neměla na výslednou přesnost vliv.

3.6.2.5 LiDAR

Anfu et al. (2019) využili pro měření výšky porostu pšenice v maloparcelových pokusech a následnou tvorbu 3D výškové mapy v průběhu celé vegetace LiDAR, který byl umístěn ve výšce 1,5 m a rámci experimentu byl umístěn buď v rozích parcel, nebo uvnitř. Výsledky prokázaly možnost přesné detekce výšky od 0,18 m s optimálním rozsahem od 0,42 m do 0,9 m. Optimální velikost úhlového kroku byla 0,06° a optimální skenovací pozice byla v rozích parcel.

3.6.3 Analýza škodlivých organismů

Škodlivé organismy jsou nechtěné organismy, které redukuje výnos pěstovaných plodin, jejich kvalitu, nebo jiným způsobem negativně ovlivňují průběh pěstování a obecně způsobují rostlinám stres. Může se jednat o plevelné rostliny, živočichy či patogeny. Narozdíl od abiotických faktorů jsou škodlivé organismy ovlivněny abiotickými faktory stejně jako pěstované rostliny. Bez ohledu na druh škodlivého organismu, by prvním krokem vždy měla být jeho správná identifikace a zmapování výskytu (Kitchen & Clay 2018).

3.6.3.1 Plevelle

V současné době je největší pozornost a technologický vývoj věnován preciznímu ošetření proti plevelným rostlinám a jsou k dispozici různé komerční detekční systémy. Identifikovat a zmapovat přítomnost plevelů na pozemcích lze ručně, nicméně tento způsob vyžaduje zkušenosti a je časově velmi náročný v závislosti na požadované přesnosti a intenzitě zaplevelení. Dále je možné využít data z Dálkového průzkumu Země, která však mohou mít v závislosti na konkrétním systému nedostatečné prostorové rozlišení pro detekci a případně určení plevelných rostlin. Problémem také je, že takto získaná data je nutné dále analyzovat, zpracovat a vytvářet aplikační mapy. Takto získaná data je také nutné ověřovat fyzickou kontrolou na pozemcích. Technologický rozvoj umožnil vývoj detekčních systémů, které jsou umístěny přímo na ramenou postřikovače a v reálném čase detekují rostliny a některé jsou schopny i rozpoznání plevelných rostlin od kulturních plodin. Jedná se v podstatě o systémy strojového vidění. Tyto systémy jsou obecně složeny z kamer, které neustále snímají porost před rameny postřikovače, a počítače, který zaznamenaný obraz analyzuje a na základě vložených algoritmů rozhoduje o aktivaci či deaktivaci sekcí či trysek postřikovače. Z komerčně dostupných systémů se jedná například o systém WeedSeeker (Trimble Inc.), který neselektivně detekuje zelené rostliny například ve strništi a aplikuje herbicid pouze na ně. Výrobce udává až 90% redukci použitého herbicidu. Dalším komerčně dostupným systémem je DAT (Dimensions Agri Technologies AS), který na rozdíl od systému WeedSeeker obraz analyzuje tak, aby byl schopen odlišit plevelné rostliny od kulturních plodin na základě jejich velikosti, tvaru, barvy a textury. Výrobce udává až 50% redukci

herbicidů. Obdobným způsobem funguje i systém H-sensor (Agricon GmbH). Mezi výhody patří kompaktnost a jednoduchost celého systému, kdy odpadá komplikované detailní mapování pozemků před samotnou aplikací a nezávislost na navigačních systémech. Určitou nevýhodou nebo spíše technologickou komplikací je extrémní náročnost na přesnost a rychlost reakce celého detekčního systému i systému postřikovače a vzájemné naladění (Ørum et al. 2017).

Bosilj et al. (2018) vytvořili metodu zpracování obrazu pro rozlišení kulturní plodiny od plevelů s využitím dekompozičního algoritmu max-tree, který umožnil zpracování obrazu lokálně na základě informací o tvarech. Jako zdrojové snímky byly použity multispektrální (RGBN) snímky cibule a cukrové řepy s rozlišením 3 pixel/mm pro cukrovou řepu a 2,5 pixel/mm pro cibuli. Výška kamery nad povrchem byla u cukrové řepy 85 cm a u cibule 100 cm. Nová metoda byla srovnávána se stávajícími metodami pro rozlišení vegetace (Otsu's a RATS) a výsledky byly z pohledu kvality lepší nebo srovnatelné. Velkým benefitem bylo potlačení šumu vstupujícího do obrazů vegetace. Autoři následně provedli zpracování vegetačních obrazů pro rozlišení kulturní plodiny a plevelů s výslednou přesností 85 % pro cibuli a 76 % pro cukrovou řepu.

3.6.3.2 Škůdci

Variabilní ošetření proti škůdcům není tak dobře prozkoumané jako variabilní ošetření proti plevelným rostlinám či variabilní hnojení. Přesto by této problematice měla být věnována patřičná pozornost, protože uniformní aplikací insekticidů jsou často poškozeni či úplně zničeni přirození nepřátelé škůdců a i jiné užitečné organismy. Je tedy logický tlak odborníků na životní prostředí proti aplikacím insekticidů, což bez možností cílené aplikace spíše vede k úplnému zákazu účinných látek (Abit et al. 2018).

Mapování variability výskytu škůdců uvnitř pozemku je časově a ekonomicky náročné a problematické. Sledování projevů poškození rostlin škůdci navíc může vykazovat určité zpoždění a škůdce již může být v jiné části pozemku. Metody stanovující rozložení škůdců v rámci pozemku jsou zaměřeny především na jejich způsob chování a spíše odhadují, jakým způsobem se škůdci budou pohybovat. Je snaha o monitoring pomocí analýzy spektrálních snímků porostů, ale tyto metody jsou prozatím ve fázi vývoje (Helden 2010).

Goldshtein et al. (2015) vyvíjeli systém pro automatickou detekci *Ceratitis capitata* v ovocných plodinách pomocí automatického vyhodnocování přítomnosti hmyzu v pastech. Problém však vznikal při falešných nápočtech například mravenců či dešťových kapek. Autoři také konstatovali, že v dané době nebyly k dispozici automatické systémy pro sledování přítomnosti hmyzu.

Golomb et al. (2015) sledovali pomocí termosnímků napadení palmy škůdci z čeledi Curculionidae, jejichž larvy vyžírají měkké části rostlin. Bylo zjištěno, že přítomnost larev způsobuje vodní stres, což se projevuje zvýšením teploty rostlin. Analýzou leteckých termosnímků rostlin bylo možné určit, které rostliny jsou napadené.

Liu, Huajian et al. (2016) testovali možnost detekce různých druhů bezobratlého hmyzu na zelených listech pomocí elektromagnetického záření v laboratorních podmínkách. Konkrétně byly použity tyto části elektromagnetického spektra: UV, viditelné světlo a NIR

s tím, že UV část spektra byla hlavním přínosem této studie. Výsledky potvrdily pozitivní vliv UV části spektra na schopnost detekce.

3.6.3.3 Choroby

Při ošetření proti chorobám je důležité nákazu detekovat co nejdříve a provést ošetření před tím, než způsobí nevratné škody. V této fázi se často choroby rozšiřují z nízkého počtu malých nakažených oblastí a jejich detekce je komplikovaná. Projevy chorob jsou závislé na mnoha faktorech jako například jejich druh, fáze nákazy, počasí a další. Z pohledu precizního zemědělství je důležité detekovat choroby právě v této počáteční fázi, protože čím později bude choroba detekována, tím větší plochu bude nutné ošetřit a z variabilní aplikace bude spíše aplikace uniformní. Je možné využít dva odlišné přístupy. První spočívá v preventivním ošetření celé plochy, kdy se mění aplikační dávka podle vlastností porostu jako je například jeho hustota či podle různých vegetačních indexů. Detekce těchto veličin je možná pomocí snímání elektromagnetického záření při použití všech dostupných platform. Tímto způsobem je eliminována možnost pochybení při mapování přítomnosti choroby. Druhý způsob spočívá v lokální bodové aplikaci fungicidů právě v místech počátku nákazy. Tento způsob sebou přináší potenciál významné úspory fungicidů, avšak je zde nutné správně detekovat přítomnost nákazy. Pro detekci je opět využíváno snímačů elektromagnetického záření, jelikož mnoho chorob ovlivňuje spektrální odrazivost rostlin. Další možností je detekce fluorescence rostlin, spolu s ozářením umělým zdrojem světla, která je také ovlivněna chorobami. Zde je však problém spojený s přirozenou fluorescencí vlivem slunečního záření, která ovlivňuje výsledky. Dalším problémem je možnost záměny příčin spektrálních změn s různými abiotickými či jinými faktory (Clay et al. 2018).

Sankaran et al. (2010) zpracovali přehled dostupných metod pro analýzu rostlinných chorob. U metod spojených s molekulární analýzou (ELISA, PCR, IF, FISH) uvádí jako omezení časovou náročnost, pracnost a nároky laboratorní procedury a přípravu vzorků, což vylučuje jejich použití pro předběžné snímání pozemků. Jako vhodnou metodu pro rychlou, nedestruktivní, hromadnou polní metodu autoři považují spektrometrii.

Feng et al. (2016) zkoumali možnost detekce nákazy *Blumeria graminis* pomocí spektrometrie v porostech ozimé pšenice při různém stupni napadení a různé růstové fázi porostu. Autoři definovali dvoupásmové vegetační indexy korelující s napadením *Blumeria graminis* na vlnových délkách 570-590 nm a 536-566 nm pro poměrový index a 568-592 nm a 528-570 nm pro normalizovaný diferenční index. Pro DGSR (584, 550) (dual-green simple ratio) a DGND (584, 550) (dualgreen normalized difference) byl shodný koeficient determinace 0,845.

3.7 Zpracování získaných informací a informační systémy

V precizním zemědělství je z pohledu zpracování dat obecně nutné řešit různé úkoly, které mohou být individuální pro každý podnik v závislosti na jeho cílech a požadavcích. Mezi tyto úkony patří například zaznamenání a uložení záznamů o činnostech, zpracování podkladů, trajektorií a tras pro navigaci strojů, zpracování dat z různých druhů senzorů a jejich transformace do map, analýza výsledků z měření, tvorba aplikačních map a provedení

jejich exportu do terminálů různých výrobců a mnoho dalších. Některé programy jsou vytvořeny pro jeden jediný účel (například tvorba aplikačních map), zatímco jiné jsou navrženy jako komplexní a zvládnou celý management. Vzhledem k tomu, že je na trhu velké množství produktů od různých výrobců, tak vzniká problém se vzájemnou kompatibilitou dat a jejich případným přenosem. Mimo programů speciálně vyvinutých pro potřeby precizního zemědělství jsou dostupné i pokročilé programy používání pro geografii – geografické informační systémy (GIS z anglického Geographical Information System). Obecně se programy liší dle své komplexity i možností a s tím souvisejících nároků na znalosti uživatele. Obvykle spolu s možnostmi roste i cena za program. Mimo programy určené pro stolní počítače a notebooky jsou vyvíjeny i jejich zjednodušené verze, které je možné používat v mobilních telefonech a tabletech (Whelan & Taylor 2013).

Lindblom et al. (2016) pojednává o problémech spojených s vývojem a implementací informačních systémů v precizním zemědělství pro zemědělskou praxi. Jako významný důvod vedoucí k neúspěchům autoři mimo jiné uvádí komunikační bariéru mezi vývojáři a zemědělci, kdy vývojáři nemají přehled o požadavcích zemědělců a znalosti problematiky. Jako příklad uvádí systém CropSAT, který na základě zpracování satelitních snímků s vegetačním indexem umožňuje rozdělit pozemek na jednotlivé zóny a přiřadit jim dávku dusíkatého hnojiva. Zemědělci však upozornili na to, že problematika stanovení dávky dusíku je komplexnější a vyžaduje detailnější rozbor než jen s pomocí satelitního snímku s vegetačním indexem.

3.8 Pěstování plodin s využitím precizního zemědělství

Pěstování plodin s využitím technologií precizního zemědělství je založeno především na znalosti a pochopení lokálních faktorů (například vlastností půdy) ovlivňujících růst, vývoj a výnos pěstovaných plodin. Cílem je zpřesnění volby a použití různých vstupů od přípravy půdy, přes setí, hnojení, aplikaci pesticidů až po sklizeň. Přesněji použité vstupy by měly zajistit jejich vyšší efektivitu, a tedy i vyšší zisk a mělo by dojít ke snížení ztrát a zátěže životního prostředí. Před rozhodnutím o zahájení využívání variabilních vstupů na zemědělském podniku je důležité prověřit a co nejlépe optimalizovat veškeré stávající „uniformní“ agrotechnické postupy. Je vhodné provést laboratorní analýzu půdních vlastností napříč celým podnikem a odstranit celoplošné nedostatky například nevhodné pH půdy (Heege 2013).

Zahájení analýzy vnitropozemkové variability lze jednoduše provést rozdělením na oblasti s dlouhodobě nízkým, průměrným a vysokým výnosem, které je možné identifikovat pomocí výnosměrů. V takto zjištěných oblastech lze následně provést kompletní půdní rozbor, sledování plodin na přítomnost škodlivých organismů a posouzení těchto oblastí ve vztahu k topografii pozemku (terénní vyvýšeniny, deprese, svahy, údolí, orientace ke slunci). Následně se veškeré získané informace zkombinují se znalostmi na základě zkušeností o daných oblastech, a pokud je to možné, tak se identifikují zdroje variability. Pokud je výnos ve zkoumaných oblastech ovlivněn faktory, které mohou být změněny jako například utužení půdy, nevhodné pH půdy, nedostatek nebo přebytek určitých živin, přítomnost škodlivých organismů a další, je možné uvažovat o přípravě map variabilní aplikace příslušného opravného prostředku v těch místech, kde tato aplikace bude ekonomicky přínosná. V této

souvislosti by měla být upravena evidence agrotechnických zásahů tak, aby záznamy obsahovaly informace o prostorovém rozložení aplikované dávky (Whelan & Taylor 2013).

3.8.1 Variabilní zpracování půdy

Zpracování půdy by mělo vhodnými postupy a nástroji zajistit optimální podmínky pro vzcházení, růst a vývoj rostlin. Patří sem vytvoření vhodné struktury půdy do požadované hloubky, rozmístění živin a organické hmoty v rámci půdního profilu, odstranění případných utužených míst a vrstev v půdě, likvidace vzešlých plevelů a zapravení semen ostatních plevelů, kvalitní zapracování posklizňových zbytků a řízení vlhkosti v různých vrstvách půdy. Metody zpracování půdy jsou různé v závislosti na půdních a klimatických podmínkách, na druhu zapracovávané plodiny i následné plodiny, na přítomnosti plevelů atd. (Heege 2013).

V současné době jsou komerčně dostupné především senzory měřící půdní vodivost pomocí soustavy indukčních cívek. Tyto senzory měří hloubku utužené vrstvy půdy, rozdíly v nasycení půdy vodou a půdní druh. Podle zjištěných informací a pěstitelského cíle je možné měnit hloubku zpracování půdy buď ihned v rámci jedné operace, pokud je senzor nainstalován na tažném stroji (na předním tříbodovém závěsu), nebo později, pokud je senzorem prováděno pouze mapování s následným zpracováním a vyhodnocením (Heege 2013).

3.8.2 Variabilní setí

Obecně při setí jakékoliv plodiny by měl být kladen důraz na hloubku uložení semen, počet semen umístěných na jednotce plochy a způsob plošného rozmístění semen. Přibližné hodnoty všech těchto parametrů jsou dány pěstovanou plodinou a případně odrůdou. Hloubka uložení semen může být dále upřesněna dle půdního druhu a množství půdní vláhy. Počet semen na jednotce plochy může být upřesněn kvalitou přípravy půdy, půdním druhem a očekávaným úhrnem srážek během vegetace (dlouhodobými zkušenostmi). Plošné rozmístění semen je omezeno především technologií secích strojů, nicméně výzkumy ukazují, že optimální by bylo rovnoměrné rozmístění semen do trojúhelníkového sponu (Cox and Cherney 2011).

Výše uvedené půdní vlastnosti je v současné době možné analyzovat a podle výsledků optimalizovat výsevek a hloubku uložení semen. Plošné rozmístění lze měnit v případě plodin setých přesnými mechanickými secími stroji, kde je možná synchronizace jednotlivých secích ústrojí a případně i synchronizace v rámci jednotlivých jízd secího stroje. U pneumatikých secích strojů je přesná kontrola rozmístění semen problematická (Heege 2013).

3.8.3 Variabilní hnojení

Obecným pravidlem při výživě rostlin je bilanční přístup, tedy navrácení takového množství jednotlivých živin do půdy, které bylo v rámci sklizených produktů pěstovaných plodin a ztrát vlivem půdních procesů z půdy odebráno. S ohledem na možnou heterogenitu půdních vlastností lze předpokládat i heterogenní množství sklizených produktů pěstovaných plodin. Velmi obecný předpoklad je, že v místech s příznivějšími půdními vlastnostmi by pěstované plodiny mohly poskytovat vyšší výnosy, k čemuž by ale potřebovaly i vyšší

množství živin. Naopak v místech s méně příznivými půdními vlastnostmi plodiny bez ohledu na dostupnost živin nemohou poskytovat srovnatelné výnosy a množství dodaných živin může být nižší. Technologie precizního zemědělství pouze umožňují tuto heterogenitu v rámci jednotlivých pozemků analyzovat a přizpůsobit jí výživu rostlin. Při běžném rovnoměrném způsobu hnojení tak úrodnější části pole postupně vyčerpávají půdní zásoby živin, a naopak v méně úrodných částech se živiny v půdě kumulují a případně dochází k jejich ztrátám půdními procesy. Jedná se však o velmi obecný pohled a pro každý konkrétní pozemek je nutné provést důkladnou analýzu půdních vlastností, aby bylo možné vyhodnotit, co je příčinou přítomné variability, zda je tato příčina napravitelná a až když bude jasné, že příčinu nelze ekonomicky napravit, tak přistoupit ke snížení dávek hnojiv. Informace o heterogenitě půdních a vegetačních vlastností je možné získat více způsoby a nejpřesnějšího výsledku bude dosaženo kombinací dílčích výsledků jednotlivých metod. Mezi metody používané v zemědělské praxi se řadí mapování výnosů předchozích plodin výnosoměry a následné kalkulace odebraných živin, mapování půdních či vegetačních vlastností optickými senzory a pro upřesnění a kontrolu zjištěné variability je vhodné provést odběry půdních a vegetačních vzorků pro laboratorní analýzu (Krishna 2013).

Získaná data jsou následně zpracována do podoby aplikačních map, které prostor příslušného pozemku rozdělí na oblasti (zóny) s podobnými půdními či vegetačními vlastnostmi ve vztahu k příslušné látce, kterou bude hnojení prováděno. K jednotlivým zónám je přiřazena požadovaná aplikační dávka hnojiva. V celém procesu tvorby aplikačních map je možné provádět úpravy na základě místních zkušeností a pěstitelských metod. Při variabilním hnojení je dále nutné rozhodnout, zda je cílem vyrovnání porostu, a tedy aplikovat vyšší dávku hnojiva na slabší části anebo naopak porost diferencovat a dále podpořit silné části porostu. Toto rozhodnutí je závislé na mnoha faktorech, a především na zdroji vzniklé heterogenity porostu. Nevyrovnaný porost může vést například ke komplikacím při sklizni, kde slabší část porostu již bude zralá a v lepší části porostu bude dozrávání opožděné. Před samotnou aplikací hnojiva se aplikační mapy nahrají do navigačního systému tažného stroje vybaveného GNSS přijímačem. Ten na základě hodnot zadaných v aplikační mapě a polohy stroje na pozemku mění aplikovanou dávku hnojiva (Krishna 2013).

Diacono et al. (2012) analyzovali literární zdroje a shrnuli závěry a doporučení pro variabilní hnojení dusíkem v porostech pšenice. Na prvním místě autoři uvádí nutnost analýzy a porozumění prostorové půdní variabilitě a výživovému stavu pšenice. Efektivitu půdních analýz lze zvýšit použitím různých, vzájemně se doplňujících senzorů. Výsledky ukazují účelnost použití vzdáleného i pozemního snímání porostů během sezóny pro zjištění stavu dusíku v rostlinách. Red edge a NIR části spektra vykazují schopnost penetrace do vyššího porostu a lépe korelují s výnosem, stavem dusíku a obsahem vody s koeficientem determinace vyšším než 0,7. Polní studie porovnávající precizní aplikace dusíku s konvenčními postupy ukazují zvýšenou efektivitu využití dusíku až o 368 %, snížení spotřeby hnojiv o 10-80 % a snížení reziduálního dusíku v půdě o 30-50 % bez negativního vlivu na výnos a kvalitu zrna. Cílené hnojení dusíkem s využitím real-time aplikací vykazuje finanční úspory ve výši 115-1376 Kč/ha v porovnání s běžnými metodami.

3.8.4 Variabilní aplikace pesticidů

V současné době je většina aplikací pesticidů prováděna rovnoměrně po celém pozemku stejnou aplikační dávkou i v případě, že výskyt škodlivých organismů nemusí být celoplošný a intenzita výskytu škodlivých organismů se může napříč pozemkem lišit. Z toho vyplývá, že pesticidy jsou aplikovány i na místa, kde aplikovány být vůbec nemusí, případně by mohly být použity v nižší aplikační dávce. Tento postup neúčelně zatěžuje životní prostředí rezidui pesticidů, snižuje produktivitu práce a v případě herbicidů může negativně ovlivnit růst a vývoj pěstovaných plodin (fytotoxicity). Navíc je zde významný potenciál úspory nákladů na pesticidy, pokud by byla aplikace prováděna jen v oblastech skutečně zasažených škodlivými organismy (Hamouz 2014).

Cílem variabilního ošetření plodin proti škodlivým organismům je obecně snížení množství aplikovaných účinných látek a tím snížení jejich negativního dopadu na životní prostředí a také snížení pořizovacích nákladů na pesticidy. S tím souvisí i zvýšení produktivity práce vlivem nižšího počtu plnění postřikovačů. Neustále však musí být zachován dostatečný redukční efekt na škodlivé organismy (Ørum et al. 2017).

V současné době je však stále významným problémem strojní mapování přítomnosti a identifikace škodlivých organismů napříč pozemkem. Mapování obvykle probíhá snímáním elektromagnetického záření ve viditelném a blízkém infračerveném spektru. Senzory mohou být umístěny buď přímo na ramenou postřikovače, na bezpilotním letounu, pilotovaném letounu nebo mohou být využita satelitní data. Získaná data mohou být buď ihned vyhodnocována a použita k úpravě aplikace (v případě senzorů na ramenou postřikovače), nebo mohou být použita pro tvorbu aplikačních map, které jsou následně vloženy do navigačního systému tažného stroje a podle nich je prováděna aplikace (Whelan a Taylor 2013).

S ohledem na velikost škodlivých organismů, případně jejich projevů na porostu je pro správnou identifikaci nutné porost snímat ve velmi vysokém prostorovém a případně spektrálním rozlišení. Další komplikací je možná vzájemná zaměnitelnost příznaků způsobených různými škodlivými organismy či abiotickými faktory. V případě již vzrostlého porostu také dochází k vzájemnému překrývání listových ploch, čímž může dojít k částečnému nebo úplnému zakrytí škodlivých organismů, a tedy ke špatnému vyhodnocení oblasti pro aplikaci. Z výše uvedeného vyplývá nutnost kontroly zjištěných výsledků fyzickou kontrolou na pozemku (Clay et al. 2018).

Důležitým parametrem při rozhodování o aplikaci pesticidů je tzv. ekonomický práh škodlivosti, který udává populační hustotu škodlivého organismu nebo stupeň napadení rostlin, při kterém je vhodné provést ošetření porostu tak, aby se zabránilo dalšímu růstu populace škodlivého organismu na tzv. ekonomickou hladinu škodlivosti, která odpovídá populační hustotě škodlivého organismu nebo stupni napadení rostlin, který způsobí stejné ekonomické škody na porostu, jako jsou náklady na jeho ošetření. Rozdělení na ekonomický práh škodlivosti a na ekonomickou hladinu škodlivosti má význam u škodlivých organismů, jejichž populace se v čase významně zvyšuje a je nutné provést ošetření dříve. Ekonomický práh škodlivosti v tomto případě udává populační hustotu, u které je nutné provést ošetření a ekonomická hladina škodlivosti udává populační hustotu, která způsobí škodu ekvivalentní

nákladům na ošetření. Pro škodlivé organismy, jejichž populace v čase významně nenarůstá, jsou oba výše uvedené termíny v podstatě shodné (Pedigo 1986; Kocourek 2013).

Z pohledu technického vybavení jsou pro variabilní aplikace pesticidů používány buď tažené, nebo samohodné postřikovače. V současné době existují i postřikovací zařízení nesená nepilotovanými letouny (Yang et al. 2017) či autonomními roboty (Gonzalez-de-Santos et al. 2016). Z pohledu variabilních aplikací je důležitý záběr postřikovače a schopnost a rychlost regulace (vypínání) částí záběru. V současné době je běžně záběr postřikovače rozdělen na několik částí (sekcí), které mohou být nezávisle vypínány a zapínány. Počet, šířka a rozložení jednotlivých sekcí je dle přání zákazníka od několika metrů až po jednotlivé trysky, které obvykle mívají rozteč 25-50 cm. Mezi základní technologie precizního zemědělství, které souvisí s aplikací pesticidů, patří spojení vypínání sekcí či trysek s navigačním systémem pro eliminaci přestříků na souvratích či v klínech. Zde je potenciál úspory přibližně 5 % pesticidů. Další možností je vypínání sekcí či trysek a (nebo) redukování dávky v rámci jednotlivých sekcí či trysek podle přítomnosti škodlivých organismů v závislosti na poloze stroje buď ve spojení s navigačním systémem a aplikační mapou, nebo ve spojení s on-line senzory na ramenech postřikovače. Návrhovatelnost tohoto systému závisí na intenzitě a rozložení výskytu škodlivých organismů na pozemcích. Pokud bude intenzita výskytu škodlivých organismů nižší, až do hodnoty ekonomického prahu škodlivosti, a jejich prostorová variabilita vyšší, tak bude návratnost rychlejší a naopak (Ørum et al. 2017). Komerční systém ukazující možnosti tohoto konceptu je například See & Spray (Blue River Technology).

V případě ošetření proti plevelným rostlinám může být tento systém v extrémním případě převeden do situace, kde na každou plevelnou rostlinu bude aplikována bodově velmi malá dávka herbicidu, což ale vyžaduje extrémně přesnou techniku zaměření konkrétní plevelné rostliny a přesné řízení aplikačních orgánů a je otázkou, zda tento nárůst technologické náročnosti spojené s pořizovacími náklady splní ekonomickou návratnost. Technologickou ukázkou tohoto systému je například Smart Weeding Robot (Ecorobotix) (Ørum et al. 2017).

Další možností, jak precizně aplikovat herbicidy, je jejich přímá injekce, kdy je v nádrži postřikovače čistá voda a na postřikovači je separátně umístěno několik nádob s herbicidy. K mísení dochází až v potrubí před tryskami. Tento systém lze kombinovat i s běžně připravenou postřikovou jíchou, kdy je přímo injektována pouze určitá složka. Problémem však může být opožděná reakce systému daná vzdáleností mezi míchacím zařízením a tryskami a dále dokonalost promísení injektované složky s vodou či jíchou (Ørum et al. 2017).

3.9 Ekonomický a provozní dopad precizního zemědělství

Pierpaoli et al. (2013) zpracovali přehled dostupné literatury zabývající se zaváděním technologií precizního zemědělství do zemědělských podniků. Jako typického zemědělce, který zavede koncept precizního zemědělství, autoři uvádí vzdělaného zemědělce, který vlastní větší zemědělský podnik s dobrou kvalitou půdy a který se zaměřuje na zavedení implementaci postupů zlepšujících produktivitu v situaci rostoucího konkurenčního tlaku. Velikost zemědělského podniku je nejčastěji zmiňovaný faktor ve vztahu k zavádění

technologií precizního zemědělství a za větší podnik je považováno alespoň 500 ha. S tím souvisí nárůst ekonomického přínosu precizního zemědělství ve vztahu s nárůstem velikosti zemědělského podniku. Tento závěr potvrzuje i Say et al. (2017). Jako druhým nejčastějším faktorem ovlivňujícím zavedení technologií precizního zemědělství je vztah zemědělce k informačním technologiím a případná předchozí zkušenost s podobnými technologiemi. S tím souvisí i trend, kdy precizní zemědělství častěji zavádí mladší zemědělci pod 50 let.

3.9.1 Ekonomický dopad

Technologie precizního zemědělství jsou obecně zatíženy vysokými pořizovacími náklady a jejich ekonomické přínosy nejsou na první pohled příliš viditelné. Pokud si zemědělský podnik pořídí například nové rozmetadlo průmyslových hnojiv, tak je to stroj, který bude během sezóny velmi vytížený, bude mít vysoký počet „odpracovaných“ hektarů a bude pro běžný zemědělský podnik zásadní. Zde nelze diskutovat o tom, zda jej pořídít, ale pouze jaký typ a od kterého výrobce. Oproti tomu vybavit parametricky stejné rozmetadlo technologií umožňující například přesné měření aplikované dávky vahou, eliminací přehozů při klínování v okolí souvrátí, možností použití aplikačních map apod., bude nákladově mnohem náročnější a cena takového stroje může být i dvojnásobná. K tomu je ještě nutné přičíst náklady na vybavení tažného stroje o kompatibilní systém GNSS (dle přesnosti a výbavy se řádově jedná o statisíce Kč) a případné náklady v podobě ročních poplatků za přesný korekční signál či za licenci pro software pro zpracování a tvorbu aplikačních map a také za čas pracovníka, který data bude zpracovávat a aplikační mapy vytvářet. Zde je již pochopitelná obava řídících pracovníků zemědělských podniků o účelnosti takto významného zvýšení vynaložených prostředků a pro odůvodnění účelnosti je nutné provést bližší rozbor přínosů jednotlivých technologií. Obecně lze technologie precizního zemědělství rozdělit na technologie, které slouží pro sběr dat a na technologie, které slouží k automatizaci (Lambert 2004).

Technologie sloužící k automatizaci jako například autonomní řízení strojů nebo automatická kontrola sekcí či trysek strojů mají jednoznačně definovatelný přínos v podobě minimalizace či eliminace pracovních překryvů anebo naopak vynechaných ploch, což se dále promítne ve snížení spotřeby aplikovaných prostředků (osivo, hnojivo, pesticidy), snížení spotřeby strojů, snížení utužení půdy přejezdy, zvýšení množství a kvality produkce, zvýšení produktivity práce, možnosti přesné práce i v nočních hodinách a možnosti setí do meziřádků plodin. Tyto technologie jsou také ihned po instalaci, kalibraci a zaškolení obsluhy připravené k použití a nevyžadují další vyhodnocování, informační systémy apod. (Schimmelpfennig 2016; Griffin et al. 2018).

Například Whelan a Taylor (2013) uvádí, že běžný aplikační překryv může být od 0,5 m do 1 m, což při 27 m pracovním záběru činí 2-4 %. Redukcí překryvů na 2 cm (prakticky eliminace překryvu) dojde k úsporám nákladů na palivo, hnojivo a pesticidy o 2-4 %. Čím užší je pracovní záběr stroje, tím vyšší bude úspora, jelikož stejný překryv představuje vyšší procento ze záběru stroje a stroj musí přejet pozemek vícekrát. Výše úspory bude záviset na preciznosti obsluhy stroje před zavedením této technologie. Griffin et al. (2005) uvádí u 12,8 m širokého kultivátoru překryv až 10 % bez systému GNSS.

Whelan a Taylor (2013) dále uvádí možnosti využití automatického ovládání trysek postřikovače v součinnosti s online optickými senzory plevelů. Jen výjimečně je plevely zasaženo více než 40 % plochy pozemku a více než 60 % pozemku je tak při běžné agrotechnice ošetřeno zbytečně. V současné době jsou na trhu k dispozici online senzory, například Weedseeker (Trimble Inc.), které neselektivně a bodově aplikují herbicid, pokud detekují rostlinu. Tímto způsobem byla ve výzkumech celková ošetřená plocha redukována na 4,5-15 %. Bohužel tento systém nepracuje selektivně a lze použít pouze pro likvidaci plevelných rostlin v období mezi vegetací. S ohledem na rychlý vývoj umělé inteligence a strojového vidění se pozvolna začínají do komerčního prostoru dostávat i stroje, které dokážou v plodině detekovat plevelné rostliny a aplikovat herbicid cíleně jako například Smart Weeding Robot (Exorobotix). Zde by mohly být úspory na množství použitých herbicidů mnohem vyšší.

Technologie pro sběr dat, jako například mapování půdních a vegetačních vlastností a tvorba aplikačních map spojená s následnými variabilními aplikacemi, vyžadují další znalosti a zkušenosti uživatele, software pro zpracování dat a velké množství času potřebného ke zpracování dat a jeho vyhodnocení. Benefity jsou především nehmotného charakteru jako například identifikace a pochopení faktorů způsobujících nevyrovnanost výnosů na pozemcích. Zde již není tak jednoduché a jednoznačné určit ekonomickou návratnost investice (Griffin et al. 2018).

Z druhé strany, pokud je podstata variability identifikována, tak lze určit, zda je možné v dané lokalitě provést opravný zásah (například úprava pH) a tím docílit zvýšení výnosu, a tedy i zisku, anebo zda v dané lokalitě nelze provést opravný zásah (výnos je limitován například půdním typem či druhem), a tedy snížit vstupy hnojiv na adekvátní úroveň, čímž dojde ke snížení nákladů, a tedy opět ke zvýšení zisku. Dle výzkumu prováděného v Austrálii mezi lety 2003 a 2008 došlo cílenou aplikací hnojiv k navýšení průměrného hektarového zisku v přepočtu o 700 Kč v případě fosforečných hnojiv a v přepočtu o 600 Kč v případě dusíkatých hnojiv (Whelan & Taylor 2013).

Whelan a Taylor (2013) dále uvádí dvě studie, které byly zaměřeny na ekonomický přínos technologií precizního zemědělství v rámci celých zemědělských podniků. V obou případech byl výsledkem ekonomický přínos těchto technologií s průměrným navýšením hektarového zisku v přepočtu o 300 Kč, resp. o 270 Kč v případě druhé studie. Autor nicméně zmiňuje, že pro výpočet ekonomických přínosů technologií precizního zemědělství je nutné posuzovat každý konkrétní zemědělský podnik zvlášť.

Pro vyhodnocení ekonomických přínosů technologií precizního zemědělství je nutné zvážit jejich komplexní vliv na fungování zemědělských podniků, vzájemné vazby mezi jednotlivými technologiemi a benefity, které přímo nesouvisí s hektarovými výnosy plodin. Mezi tyto nepřímé benefity patří například menší únava a vyšší komfort obsluhy stroje, nižší produkce skleníkových plynů, menší spotřeba pesticidů a efektivnější využití hnojiv. Je možné, že v rámci nové společné zemědělské politiky budou technologie precizního zemědělství podporovány legislativou, což by dále podpořilo jejich ekonomický přínos. Z druhé strany s ohledem na velmi rychlý vývoj odvětví lze očekávat postupné snižování pořizovacích cen těchto technologií. V neposlední řadě mohou tyto technologie především kvůli své šetrnosti k životnímu prostředí podpořit v očích veřejnosti pozitivní pohled na

zemědělce a zajistit lepší pozici například vůči konkurenci při jednání o propachtování zemědělské půdy (Griffin et al. 2018).

3.9.2 Provozní dopad

Z provozního hlediska představuje jakákoliv nová technologie potenciální komplikace a nemusí se jednat pouze o technologie precizního zemědělství. Mohou vzniknout například problémy s kompatibilitou se stávajícími systémy, spolehlivostí nových technologií, s obsluhou, která se musí naučit s novou technologií pracovat, s nedostatečným pochopením limitů nové technologie, které se projeví až během provozu, nebo s chybným úsudkem časové náročnosti nové technologie. Všechny tyto (a mnohé další) komplikace mohou vést k vytvoření negativního vztahu vůči nové technologii až k odporu k užívání. Technologie precizního zemědělství je možné z provozního hlediska rozdělit stejným způsobem jako v předchozí kapitole na technologie sloužící k automatizaci a technologie pro sběr dat (Griffin et al. 2018).

Technologie sloužící k automatizaci by měly být ihned po instalaci, kalibraci a zaškolení obsluhy připravené k použití bez nutnosti dalšího vyhodnocování nebo nákupu informačního systému. Pod tímto pozitivně orientovaným a často používaným spojením se však skrývá množství potenciálních komplikací. Samotná instalace a kalibrace již může být problematická především ve vztahu ke vzájemné kompatibilitě všech součástí, což může být například navigační systém komunikující s pracovním strojem umožňujícím variabilní změnu záběru a dávky. Problémy se mohou projevit například chybnou reakcí pracovního stroje na požadavek změny záběru v klínu či na souvrati. Tento komunikační problém nemusí mít jednoznačného původce a dodavatelé těchto technologií (obvykle jsou různí dodavatelé navigačního systému a pracovního stroje) pak na sebe mohou vzájemně svalovat vinu a od problémů se distancovat. Obecně vzato čím více možností tyto technologie nabízí, tím komplikovanější jsou jejich integrované počítačové systémy, a tím více jsou náchylné na různé softwarové chyby a kolapsy. Budoucí obsluha stroje, která je obvykle instalaci a kalibraci přítomna, pak může při problematickém průběhu instalace a kalibrace získat odpor k těmto technologiím ještě před zaškolením. I po zaškolení mohou vzniknout různé komplikace spojené se složitostí obslužného softwaru (Schimmelpfennig 2016; Griffin et al. 2018).

Lindblom et al. (2016) upozornili na komunikační bariéru mezi vývojáři softwaru a zemědělci, kdy uspořádání obslužného softwaru bývá vytvořeno spíše podle představ vývojářů než podle představ obsluhy stroje. Další komplikace může nastat v případě, že podnik nevlastí všechny navigační systémy od stejného výrobce. Vzájemný přenos dat například hranic pozemků či navigačních kurzů a zón sice obvykle možný je, ale nemusí být pro přenos podporovány všechny funkce a k uskutečnění je již nutný příslušný informační systém, který převod zajistí, nebo je nutné převod provést formou služby. Obojí pak představuje dodatečné časové i finanční náklady. Z druhé strany je nutno dodat, že pokud se veškeré tyto počáteční problémy vyřeší a obsluha se s novou technologií sžije, tak tyto technologie sloužící k automatizaci plní svůj účel.

Technologie sloužící pro sběr dat jsou z provozního hlediska výrazně náročnější (Miller et al. 2017). Griffin et al. (2018) uvádí nutnost znalostí a zkušeností uživatele, vlastnictví

softwaru pro zpracování dat ze senzorů a velké množství času uživatele. Měření a zpracování naměřených dat může provádět pracovník podniku seznámený s principem a cílem těchto technologií, což je obvykle agronom. S ohledem na vytížení agronomů, vysoké nároky na zkušenosti a specifickou odbornost jsou často tyto technologie poskytovány formou služby, kdy za určitou hektarovou úplatu je provedeno měření, zpracování dat a případné vytvoření aplikační mapy pro mechanizaci (Schimmelpfennig 2016).

3.10 Budoucnost precizního zemědělství

McBratney et al. (2005) se zabývali problémy a budoucím zaměřením precizního zemědělství a stanovili několik témat a cílů spojených s budoucností konceptu precizního zemědělství:

- Vliv politiky jako nástroje, který může podpořit koncept precizního zemědělství.
- Udržení zemědělce a jeho zkušenosti jako základního prvku, kterému technologie precizního zemědělství umožní přesnější rozhodování.
- Zaměření na vývoj systémů pro podporu rozhodování (DSS z anglického Decision Support System) a komplexních strategií pro management procesů v rámci zemědělské produkce, namísto samostatného zaměření na jednotlivé technologie jako například monitorování výnosu, hodnocení půdní variability a variabilní aplikace.
- Problematika ekonomického hodnocení precizního zemědělství, které by mělo být hodnoceno komplexně včetně environmentálních a sociálních přínosů, respektive nákladů spojených s negativními vlivy na životní prostředí a sociální sféru.
- Neopomíjení a výzkum časové variability, která může mít významný vliv.
- Orientace precizního zemědělství na zemědělský podnik jako celek, tak aby se technologie precizního zemědělství staly běžnou součástí fungování podniku.
- Třídění sklizených produktů dle jejich kvality jako konkurenční nástroj pro vytvoření produktů prémiové kvality.
- Vytvoření systému k dohledání původu produktu a operací provedených pro jeho vytvoření, jako například použití hnojiv nebo pesticidů.
- Možnost využití technologií precizního zemědělství pro systém kontrol pro přesné dokládání použití hnojiv či pesticidů.

Cíle, které stanovil McBratney a jeho kolegové již v roce 2005, je možné bez významných úprav použít i po více než dekádě od publikace původního článku, a to i přes to, jak významným způsobem během uplynulých patnácti let pokročila technologie. Stejná či podobná témata jsou probírána i dalšími autory (Heege 2013; Krishna 2013; Lal 2015; Lind & Pedersen 2017). Autoři mimo jiné zmiňují obecně známý fakt, kdy se v minulosti předpokládalo mnohem rychlejší zavádění technologií precizního zemědělství a bylo překvapením, že i po více než dvaceti letech tyto technologie hromadně zavedeny nejsou a jejich zavádění je velmi pozvolné. Zůstává neznámou, zda se zavádění těchto technologií urychlí spolu s generační obměnou zemědělců, kteří s informačními technologiemi byli v kontaktu již od útlého věku. Z druhé strany je pak důležité, aby tito zemědělci zachovali zdravě kritický pohled na technologie a slepě jim nedůvěřovali, jelikož žádná technologie není bezchybná a dokonalá. Dalším faktorem, který by mohl v blízké budoucnosti urychlit zavádění precizního zemědělství, je tlak veřejnosti a tím i státních orgánů na snížení

negativních dopadů současného zemědělství na životní prostředí. Z druhé strany je však nutné vyjasnit mnoho neznámých především v souvislosti s variabilními operacemi jako například kde, kdy, jak a proč variabilní operaci provádět. Dále stále zůstává mnoho otázek v souvislosti s reálným ekonomickým přínosem. V současné době jsou často názory odborníků rozdílné, což v zemědělci může vyvolat nejistotu a zdrženlivost. Všichni autoři jsou však ve shodě, že v blízké budoucnosti bude nutný vývoj směrem k vyšší produktivitě s ohledem na neustále rostoucí lidskou populaci.

4 Závěr

Současná situace v zemědělství, jak již bylo zmíněno v úvodní části, není příliš optimistická a v blízké budoucnosti lze spíše očekávat další zhoršení. Zemědělci budou muset výrazně zvyšovat efektivitu své práce, aby dokázali kompenzovat rostoucí náklady. Vědecké poznatky a moderní technologie mohou při zvyšování efektivity sehrát klíčovou roli.

Navigační systémy spojené s asistovaným či autonomním řízením jsou dnes již téměř standardem. Technologie sloužící k redukci ztrát osiv, hnojiv či pesticidů přesevy, přehozy či přestřiky se v současné době velmi rozšiřují a v blízké budoucnosti budou pravděpodobně rovněž standardem, jelikož pracují automaticky, bez zásahu obsluhy či agronoma, a mají jednoduše vyčíslitelný ekonomický přínos.

Technologie založené na variabilních aplikacích v souvislosti s variabilitou vlastností půdy, porostu či škodlivých organismů a jejím monitorováním se pozvolna začínají v zemědělské praxi rozšiřovat. V budoucnu může být benefitem, že technika vybavená navigačními systémy a technologiemi pro redukci ztrát osiv, hnojiv či pesticidů je obvykle připravena provádět také variabilní aplikace. Z této skupiny technologií jsou nejrozšířenější variabilní aplikace hnojiv, u kterých je monitoring, zpracování dat a vytvoření aplikační mapy často nabízeno formou služeb od specializovaných společností. Problémem rychlejšího uplatnění technologií variabilních aplikací může být nedůvěra vedoucích pracovníků v tento přístup a jejich obava o pěstitelský a ekonomický přínos, který nemusí být jednoduše vyčíslitelný.

Z pohledu variabilních aplikací hnojiv je nutné zajistit kvalitní analýzu vlastností půdy a porostu, aby nedošlo k chybnému určení původu případné variability a také stanovit kritéria, kdy je účelné daný pozemek variabilně hnojit. Přesná analýza je však obvykle velmi nákladná, a navíc celkové množství variabilně aplikovaného hnojiva může být v rámci celého podniku stejné jako při homogenní aplikaci. Zde jsou pak jednoduše vyčíslitelné dodatečné náklady za analýzu, a to, zda bude v konečném důsledku vyšší výnos plodin, je ovlivněno mnoha dalšími faktory, které s variabilní aplikací nesouvisí. Z pohledu variabilního výsevu je opět nutné přesně určit vlastnosti půdy, stanovit kritéria, která budou výsevek ovlivňovat, a zachovat určitou míru obezřetnosti s ohledem na možné změny podmínek po vysetí, především výrazné změny počasí. Technologie variabilní aplikace pesticidů skrývá významný potenciál v podobě úspory nákladů a pozitivního sociálního a environmentálního vlivu, na který je dnes kladen velký důraz. V současné době je však stále problémem nedostatečná spolehlivost detekce škodlivých organismů v běžných polních podmínkách a komerční nedostupnost technologií pro přesnou aplikaci pesticidů. Nejvíce pokročilá je z tohoto pohledu detekce plevelných rostlin, kde jsou již zjednodušené komerční systémy k dispozici.

Do budoucna může být také významná technologie autonomních systémů, které by mohly snížit mzdové náklady a zvýšit produktivitu práce. V současné době se začínají objevovat první komerční projekty, které však sebou přináší velké množství omezení a kompromisů a v porovnání s konvenčními technologiemi nepřináší ani snížení mzdových nákladů, ani zvýšení produktivity práce. V první řadě je nutné u autonomních technologií vyřešit legislativu pohybu samočinného stroje na pozemku bez dozoru, který (alespoň v Evropské unii) není v současné době povolený.

Technologie precizního zemědělství a obecně jakékoliv pokročilé technologie sebou přináší potenciální riziko v podobě spolehlivosti a vzájemné kompatibility. Je nepravděpodobné, že zemědělec nakoupí veškeré technologie spojené s precizním zemědělstvím od stejného výrobce, ať už z finančních či jiných důvodů a zároveň, že jeden výrobce bude svým portfoliem produktů pokrývat veškeré technologie spojené s precizním zemědělstvím. Pokud tyto technologie poté nebudou samy, případně při komunikaci s jinými systémy, fungovat bezchybně a spolehlivě, budou buď prodejci vráceny, nebo je uživatel nebude využívat, a vytvoří si k nim odpor.

Pro uplatnění technologií precizního zemědělství je nutné nahlížet na ně jako na celek (podobně jako je nahlíženo například na ekologické zemědělství) a jejich provozní, ekonomický, sociální, environmentální a jakýkoliv další vliv (ať už pozitivní nebo negativní) vyhodnocovat společně a v rámci celého podniku.

Autor této práce je přesvědčen o tom, že koncept precizního zemědělství je smysluplný, že v budoucnu budou mít podniky, které tento koncept praktikují, oproti ostatním výhodu a že je nutné se postupnými a smysluplnými investicemi připravovat a učit se s těmito technologiemi pracovat. Z druhé strany je však nutné zachovat zdrženlivost a kritický pohled na věc, protože v současné době intenzivního vývoje jsou tyto technologie velmi diverzifikované, rychle se měnící a jejich vzájemná kompatibilita a spolehlivost může způsobit zásadní problémy. Také je nutné nepodlehnout tlaku výrobců a prodejců, kteří precizní zemědělství rádi používají jako aktuální prodejní trend a prezentují jej zaručenými ekonomickými přínosy, často bez upozornění na spojená rizika. S tím souvisí problém, že již nyní přetížení agronomové čelící agronomickým, klimatickým, sociálním, environmentálním, legislativním a dalším problémům musí zvládnout orientaci v nové a rozsáhlé vědní disciplíně, protože v precizním zemědělství je technika a agronomie úzce a neodlučně propojena.

5 Seznam literatury

- Adamchuk VI, Hummel JW, Morgan MT, Upadhyaya SK. 2004. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. **44**:71-91.
- Adamchuk VI, Hempleman CR, Jahraus DG. 2009. On-the-Go Capacitance Sensing of Soil Water Content. Mid-Central Conference (MC09201) DOI: 10.13031/2013.29481.
- Adamchuk VI, Ferguson RB, Hergert GW. 2010. Soil Heterogeneity and Crop Growth. Pages 3-16 in Oerke EC, Gerhards R, Menz G, Sikora R, editors. *Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity*. Springer, Dordrecht.
- Adamchuk VI, Ji W, Rossel VR, Gebbers R, Tremblay N. 2018. Proximal Soil and Plant Sensing. Pages 119-140 in Shannon DK, Clay DE, Kitchen NR, editors. *Precision Agriculture Basics*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison.
- Anfu G, Fang Y, Cheng T, Tian Y, Zhu Y, Chen Q, Qiu X, Yao X. 2019. Detection of wheat height using optimized multi-scan mode of LiDAR during the entire growth stages. *Computers and Electronics in Agriculture* 165 (e104959). DOI: 10.1016/j.compag.2019.104959.
- Balafoutis AT, Beck B, Fountas S, Tsiropoulos Z, Vangeyte J, Wal T, Soto-Embodas I, Gómez-Barbero M, Pedersen SM. 2017. Smart Farming Technologies – Description, Taxonomy and Economic Impact. Pages 21-77 in Pedersen S, Lind K, editors. *Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*. Springer, Cham.
- Bosilj P, Duckett T, Cielniak G. 2018. Connected attribute morphology for unified vegetation segmentation and classification in precision agriculture. *Computers in Industry*. **98**:226-240.
- Brase T. 2018. Basics of a Geographic Information System. Pages 37-62 in Shannon DK, Clay DE, Kitchen NR, editors. *Precision Agriculture Basics*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison.
- Castrignanò A, Buttafuoco G, Quarto R, Parisi D, Viscarra Rossel RA, Terribile F, Langella G, Venezia A. 2018. A geostatistical sensor data fusion approach for delineating homogeneous management zones in Precision Agriculture. *Catena*. **167**:293-304.
- Clay SA, French BW, Mathew FM. 2018. Pest Measurement and Management. Pages 92-102 in Shannon DK, Clay DE, Kitchen NR, editors. *Precision Agriculture Basics*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison.
- Cohen Y, Alchanatis V, Saranga Y, Rosenberg O, Sela E, Bosak A. 2017. Mapping water status based on aerial thermal imagery: comparison of methodologies for upscaling from a single leaf to commercial fields. *Precision Agriculture* **18**:801-822.
- Corwin DL, Plant RE. 2005. Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. **46**:1-10.

- Cox WJ, Cherney JH. 2011. Growth and yield responses of soybean to row spacing and seeding rate. *Agronomy Journal*. **103**:123–128.
- Diacono M, Rubino P, Montemurro F. 2013. Precision nitrogen management of wheat. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. **33**:219–241.
- Dlouhy M, Lev J, Kroulik M. 2016. Technical and software solutions for autonomous unmanned aerial vehicle (UAV) navigation in case of unavailable GPS signal. *Agronomy Research* **14**:733-744.
- Farrell M, Gili A, Noellemeyer E. 2018. Spectral indices from aerial images and their relationship with properties of a corn crop. *Precision Agriculture* **19**:1127-1137.
- Feng W, Shen W, He L, Duan J, Guo B, Li Y, Wang C, Guo T. 2016. Improved remote sensing detection of wheat powdery mildew using dual-green vegetation indices. *Precision Agriculture* **17**:608–627.
- Ferguson R, Rundquist D. 2018. Remote Sensing for Site-Specific Crop Management. Pages 103-117 in Shannon DK, Clay DE, Kitchen NR, editors. *Precision Agriculture Basics*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison.
- Field H, Long J. 2018. *Introduction to Agricultural Engineering Technology*. Springer, Cham.
- Fulton J, Hawkins E, Taylor R, Franzen A. 2018. Yield Monitoring and Mapping. Pages 63-77 in Shannon DK, Clay DE, Kitchen NR, editors. *Precision Agriculture Basics*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison.
- García-Santillán I, Guerrero JM, Montalvo M, Pajares G. 2018. Curved and straight crop row detection by accumulation of green pixels from images in maize fields. *Precision Agriculture* **19**:18–41
- Goldshstein E, Cohen Y, Timar D, Rosenfeld L, Grinshpon Y, Gazit Y, Hoffman A, Mizrach A, Alchanatis V. 2015. An automatic system for Mediterranean fruit fly monitoring. Pages 635-642 in Stafford JV, editor. *Precision Agriculture'15*. Wageningen Academic Publishers, Netherlands.
- Gonzalez-de-Santos P, Ribeiro A, Fernandez-Quintanilla C, López-Granados F, Brandstoetter M, Tomic SDK, Pedrazzi S, Peruzzi A, Pajares G, Kaplanis G, Pérez-Ruiz M, Valero C, Cerro J, Vieri M, Rabatel G, Debilde B. 2017. Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture. *Precision Agriculture* **18**:574–614.
- Griffin T, Lambert D, Lowenberg-DeBoer J. 2005. Economics of lightbar and auto-guidance GPS navigation technologies. Pages 581-587 in Stafford JV, editor. *Precision Agriculture'05*. Wageningen Academic Publishers, Netherlands.
- Griffin TW, Shockley JM, Mark TB. 2018. Economics of Precision Farming. Pages 221-230 in Shannon DK, Clay DE, Kitchen NR, editors. *Precision Agriculture Basics*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison.

- Hamouz P. 2014. Metody regulace zaplevelení pro precizní zemědělství: certifikovaná metodika. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Heege HJ. 2013. Precision in crop farming: Site specific concepts and sensing methods: Applications and results. Springer, New York.
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* **83**:195-213.
- Chateau T, Debain C, Collange F, Trassoudaine L, Alizon J. 2000. Automatic guidance of agricultural vehicles using a laser sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*. **28**:243-257.
- Christiansen P, Kragh M, Steen KA, Karstoft H, Jørgensen RN. 2017. Platform for evaluating sensors and human detection in autonomous mowing operations. *Precision Agriculture* **18**:350-365.
- ISO EN 18497. 2015. Agricultural and forestry tractors and self-propelled machinery - Safety of highly automated machinery. ISO, Geneva.
- Jiang Z. 2007. Interpretation of the modified soil-adjusted vegetation index isolines in red-NIR reflectance space. *Journal of Applied Remote Sensing* 1 (e013503) DOI: 10.1117/1.2709702
- Jurečka F, Lukas V, Hlavinka P, Semerádová D, Žalud Z, Trnka M. 2018. Estimating crop yields at the field level using landsat and modis products. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* **66**:1141-1150.
- Kerry R, Oliver MA. 2008. Determining nugget:sill ratios of standardized variograms from aerial photographs to krige sparse soil data. *Page Precision Agriculture* **9**:33-56.
- King MD, Platnick S, Menzel WP, Ackerman SA, Hubanks PA. 2013. Spatial and temporal distribution of clouds observed by MODIS onboard the terra and aqua satellites. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **51**:3826-3852.
- Kitchen NR, Clay SA. 2018. Understanding and Identifying Variability. Pages 13-24 in Shannon DK, Clay DE, Kitchen NR, editors. *Precision Agriculture Basics*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison.
- Kocourek F. 2013. Využití ekonomických prahů škodlivosti v řízení ochrany polních plodin: certifikovaná metodika. Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha.
- Krishna K. 2013. Precision Farming: Soil Fertility and Productivity Aspects. Apple Academic Press, New York.
- Lal R. 2015. Challenges and Opportunities in Precision Agriculture. Pages 391-400 in Lal R, Steward BA, editors. *Soil-specific Farming: Precision Agriculture*. CRC Press, Boca Raton.

- Lambert DM, Lowenberg-DeBoer J, Griffin T, Peone J, Payne T, Daberkow SG. 2004. Adoption, Profitability, And Making Better Use Of Precision Farming Data. Working or Discussion Paper. Purdue University. Department of Agricultural Economics. DOI: 10.22004/ag.econ.28615.
- Lambot S, Rhebergen J, van den Bosch I, Slob EC, Vanclooster M. 2004. Measuring the Soil Water Content Profile of a Sandy Soil with an Off-Ground Monostatic Ground Penetrating Radar. *Vadose Zone Journal* **3**:1063:1071.
- Lind KM, Pedersen SM. 2017. Perspectives of Precision Agriculture in a Broader Policy Context. Pages 251-266 in Pedersen SM, Lind KM, editors. *Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*. Springer, Cham.
- Lindblom J, Lundström C, Ljung M, Jonsson A. 2017. Promoting sustainable intensification in precision agriculture: review of decision support systems development and strategies. *Precision Agriculture* **18**:309–331.
- Liu H, Lee SH, Chahl JS. 2017. An evaluation of the contribution of ultraviolet in fused multispectral images for invertebrate detection on green leaves. *Precision Agriculture* **18**:667:683.
- Liu T, Wu W, Chen W, Sun C, Zhu X, Guo W. 2016. Automated image-processing for counting seedlings in a wheat field. *Precision Agriculture* **17**:392-406.
- Lukas V, Neudert L. 2010. Optimization of soil sampling in sustainable agricultural systems. *Növénytermelés* **59**:89-92.
- Lukas V, Neudert L, Novák J, Paulová N. 2018. Identification of spatial variability of soil physico-chemical properties for precision farming. *Mechanization in agriculture & Conserving of the resources* **64**:117-119.
- Matheron G. 1963. Principles of geostatistics. *Economic Geology* **58**:1246–1266.
- Matsushita B, Yang W, Chen J, Onda Y, Qiu G. 2007. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to topographic effects: A case study in high-density cypress forest. *Sensors* **7**:2636-2651.
- McBratney AB, Pringle MJ. 1999. Estimating Average and Proportional Variograms of Soil Properties and Their Potential Use in Precision Agriculture. *Precision Agriculture* **1**:125–152.
- McBratney AB, Whelan B, Ancev T, Bouma J. 2005. Future directions of precision agriculture. *Precision Agriculture* **6**:7-23.
- Miller NJ, Griffin TW, Bergtold J, Ciampitti IA, Sharda A. 2017. Farmers' Adoption Path of Precision Agriculture Technology. *Advances in Animal Biosciences* **8**:708-712.
- Ministerstvo zemědělství. 1998. Vyhláška Ministerstva zemědělství ze dne 12. listopadu 1998 o agrochemickém zkoušení zemědělských půd a zjišťování půdních vlastností lesních pozemků. Pages 8337-8349 in *Sbírka zákonů České republiky, 1998, částka 97*. Česká republika.

- Moravec D, Komárek J, Kumhálová J, Kroulík M, Prošek J, Klápště P. 2017. Digital elevation models as predictors of yield: Comparison of an UAV and other elevation data sources. *Agronomy Research* **15**:249-255.
- Mulla D, Khosla R. 2015. Historical Evolution and Recent Advances in Precision Farming. Pages 1-35 in Lal R, Steward BA, editors. *Soil-specific Farming: Precision Agriculture*. CRC Press, Boca Raton.
- Mulla DJ. 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering* **114**:358-371.
- Naderi-Boldaji M, Tekeste MZ, Nordstorm RA, Barnard DJ, Birrel SJ. 2019. A mechanical-dielectric-high frequency acoustic sensor fusion for soil physical characterization. *Computers and Electronics in Agriculture* **156**:10–23.
- Neudert L, Lukas V. 2015. *Precizní zemědělství: technologie a metody v rostlinné produkci*. Mendelova univerzita v Brně, Brno.
- Oliver M. 2010. *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Springer, Cham.
- Ørum JE, Kudsk P, Jensen PK. 2017. Economics of Site-Specific and Variable-Dose Herbicide Application. Pages 93-110 in Pedersen SM, Lind KM, editors. *Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*. Springer, Cham.
- Pedigo LP, Hutchins SH, Higley LG. 1986. Economic Injury Levels in Theory and Practice. *Annual Review of Entomology* **31**:341-368.
- Pierpaoli E, Carli G, Pignatti E, Canavari M. 2013. Drivers of Precision Agriculture Technologies Adoption: A Literature Review. *Procedia Technology* **8**:61-69.
- Reichardt M, Jürgens C. 2009. Adoption and future perspective of precision farming in Germany: Results of several surveys among different agricultural target groups. *Precision Agriculture* **10**:73-94.
- Roberts D, Roth K, Perroy R. 2011. Hyperspectral Vegetation Indices. Pages 309-327 in Thenkabail PS, Lyon JG, Huete A, editors. *Hyperspectral remote sensing of vegetation*. CRC Press, Boca Raton.
- Rodriguez-Moreno F, Kren J, Zemek F, Novak J, Lukas V, Píkl M. 2017. Advantage of multispectral imaging with sub-centimeter resolution in precision agriculture: generalization of training for supervised classification. *Precision Agriculture* **18**:1-20.
- Sankaran S, Mishra A, Ehsani R, Davis C. 2010. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. *Computers and Electronics in Agriculture* **72**:1-13.
- Say SM, Keskin M, Sehri M, Sekerli YE. 2018. Adoption of Precision Agriculture Technologies in Developed and Developing Countries. *The Online Journal of Science and Technology* **8**:7-15.

- Shannon DK, Clay DE, Sudduth KA. 2018. An Introduction to Precision Agriculture. Pages 1-12 in Shannon DK, Clay DE, Kitchen NR, editors. Precision Agriculture Basics. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison.
- Shibusawa S. 1998. Precision Farming and Terra-mechanics. Fifth ISTVS Asia-Pacific Regional Conference in Korea, Korea.
- Shockley JM, Dillon CR, Shearer SA. 2019. An economic feasibility assessment of autonomous field machinery in grain crop production. Precision Agriculture **20**:1068-1085.
- Shufeng H, Steward BL, Tang L. 2016. Intelligent Agricultural Machinery and Field Robots. Pages 133-176 in Zhang Q, editor. Precision Agriculture for crop farming. CRC Press, Boca Raton.
- Schimmelpfennig D. 2016. Farm Profits and Adoption of Precision Agriculture. Economic Research Report. Economic Research Report 249773, United States Department of Agriculture, Economic Research Service, Washington, D.C.
- Simelli I, Tsagaris A. 2015. The Use of Unmanned Aerial Systems (UAS) in Agriculture. HAICTA 2015. Kavala, Greece.
- Smolka M, Puchberger-Enengl D, Bipoun M, Klasa A, Kiczakajlo M, Śmiechowski W, Sowiński P, Krutzler C, Keplinger F, Vellekoop MJ. 2017. A mobile lab-on-a-chip device for on-site soil nutrient analysis. Precision Agriculture **18**:152–168.
- Söderström M, Sohlenius G, Rodhe L, Piikki K. 2016. Adaptation of regional digital soil mapping for precision agriculture. Precision Agriculture **17**:588–607.
- Stafford J V. 2000. Implementing precision agriculture in the 21st century. Journal of Agricultural and Engineering Research **76**:267-275.
- Stombaugh T, Shannon DK, Clay D, Kitchen NR. 2018. Satellite-based Positioning Systems for Precision Agriculture. Pages 25-35 in Shannon DK, Clay DE, Kitchen NR, editors. Precision Agriculture Basics. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison.
- Sütti J. 1998. Accuracy and reliability of plane networks transformed from WGS84 into S-JTSK. Acta Montanistica Slovaca **3**:439:443.
- Tey YS, Brindal M. 2012. Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: A review for policy implications. Precision Agriculture **13**:713-730.
- Tscharke M. 2018. Applied Machine Vision in Agriculture. Pages 113-132 in Chen G. Advances in Agricultural Machinery and Technologies. CRC Press, Boca Raton.
- Tullberg JN. 2014. Energy in crop production systems. Pages 53-76 in Bundschuh J, editor. Sustainable Energy Solutions in Agriculture. CRC Press, London.
- Tullberg JN. 2018. Developments in Mechanization Technology. Pages 27-47 in Chen G. Advances in Agricultural Machinery and Technologies. CRC Press, Boca Raton.

- Van Helden M. 2010. Spatial and temporal dynamics of arthropods in arable fields. Pages 51-64 in Oerke EC, Gerhards R, Menz G, Sikora RA, editors. Precision Crop Protection - The Challenge and Use of Heterogeneity. Springer, New York.
- Wagner P, Hank K. 2013. Suitability of aerial and satellite data for calculation of site-specific nitrogen fertilisation compared to ground based sensor data. Precision Agriculture **14**:135-150.
- Wang G, Lan Y, Qi H, Chen P, Hewitt A, Han Y. 2019. Field evaluation of an unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer: effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat. Pest Management Science. Pest Management Science **75**:1546-1555.
- Whelan B, Taylor J. 2013. Precision Agriculture for Grain Production Systems. CSIRO PUBLISHING, Collingwood.
- Yang S, Yang X, Mo J. 2018. The application of unmanned aircraft systems to plant protection in China. Precision Agriculture **19**:278-292.
- Zhang C, Kovacs JM. 2012. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. Precision Agriculture **13**:693-712.
- Zhang N, Wang M, Wang N. 2002. Precision agriculture - A worldwide overview. Computers and Electronics in Agriculture **36**:113-132.