

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroekologie a rostlinné produkce



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Způsoby mapování plevelů a metody regulace zaplevelení
v systému precizního zemědělství**

Bakalářská práce

Petr Vaníček

Ekologické zemědělství

Ing. Pavel Hamouz, Ph.D.

© 2022 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Způsoby mapování plevelů a metody regulace zaplevelení v systému precizního zemědělství" 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 22.4.2022

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce, Ing. Pavlovi Hamouzovi, Ph. D., za čas, rady a odborné vedení. Poděkování patří mimo jiné i mé rodině a přátelům, kteří mě podporovali do poslední chvíle mého studia.

Způsoby mapování plevelů a metody regulace zaplevelení v systému precizního zemědělství

Souhrn

Předkládaná práce se zabývá manuálními a automatizovanými metodami mapování výskytu plevelů a metodami regulace zaplevelení. Shrnuje přehled metod regulace plevelů, kde se zabývá dvěma hlavními částmi. V první části obsáhle popisuje možnosti chemické regulace zaplevelení, kde se potýká s především technologiemi variabilního postřiku. V druhé části popisuje možnosti mechanické regulace zaplevelení, kde bylo popsáno především fungování autonomních robotů v zemědělství a poloautomatické nářadí tažené traktorem. Jsou popsány technologie vhodné pro detekci plevelů na zemědělské půdě a technické platformy využívané pro detekci zaplevelení.

V posledních letech se výrazně zvětšila přesnost a pracovní rychlost odplevelování zemědělskými stroji. Komunikace mezi nástroji a senzorovými systémy v reálném čase dále zvyšuje potenciál mechanické a chemické likvidace plevele. K dispozici je široká škála senzorů, včetně kamerové analýzy obrazu, GNSS, laserových a ultrazvukových systémů, pomocí kterých probíhá mapování plevelných jedinců na pozemku. Každý typ senzoru má své výhody a nevýhody. V kombinaci s mechanickými či chemickými systémy mohou zlepšit účinnost regulace plevele. Robustní a spolehlivé plečky pro polní plodiny s kamerovým ovládáním a hydraulickým bočním posuvem jsou v současné době široce dostupné od různých výrobců. Robotizaci ztěžuje vypořádání se s měnícími se podmínkami zemědělské půdy a plně automatizované systémy nemusí být uvedeny do praxe ještě po mnoho let. Tato rešerše pojednává o metodách mapování výskytu plevele na zemědělských pozemcích. Zaměřuje se na vývoj technologii pro chemickou a mechanickou ochranu kulturních rostlin, Tato práce vytváří souhrnný přehled systémů používaných v precizním zemědělství a poukazuje na jejich účinnost.

Klíčová slova: cílená regulace zaplevelení, detekce plevelů, strojové učení, analýza obrazu, neuronové sítě

Methods for weed mapping and site-specific weed management

Summary

This thesis deals with manual and automated methods of weed mapping and methods of weed control. It summarizes an overview of weed control methods, addressing two main parts. In the first part, it provides a comprehensive description of chemical weed control options, dealing primarily with variable spray technologies. In the second part, it describes the possibilities of mechanical weed control, where the operation of autonomous robots in agriculture and tractor-drawn semi-automatic implements have been described in particular. Technologies suitable for weed detection on agricultural land and technical platforms used for weed detection are described.

The accuracy and working speed of weeding with agricultural machinery has increased significantly in recent years. Real-time communication between tools and sensor systems further increases the potential for mechanical and chemical weed control. A wide range of sensors, including camera-based image analysis, GNSS, laser and ultrasonic systems are available to map weeds on the plot. Each type of sensor has its own advantages and disadvantages. When combined with mechanical or chemical systems, they can improve the effectiveness of weed control. Robust and reliable weeders for field crops with camera control and hydraulic lateral movement are now widely available from a variety of manufacturers. Robotics make it difficult to cope with changing farmland conditions and fully automated systems may not be around for many years. This thesis discusses methods for mapping weed incidence on agricultural land. Focusing on the development of technology for chemical and mechanical crop protection, this thesis provides a comprehensive review of systems used in precision agriculture and highlights their effectiveness.

Keywords: targeted weed control, weed detection, machine learning, image analysis, neural networks

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Cíl práce.....	9
3	Principy mapování pozemků.....	10
3.1	Manuální mapování výskytu plevelů.....	11
3.2	Automatizované metody	12
3.2.1	Dálkové průzkumné systémy	12
3.2.2	Pozemní sensorové systémy	13
3.3	Alternativní způsoby mapování plevelů	14
4	Metody regulace plevelů	16
4.1	Chemická regulace zaplevelení	16
4.1.1	Technologie variabilního postřiku	17
4.1.1.1	Technologie automatického cíleného postřiku založená na snímání pomocí sensorů v reálném čase.....	17
4.1.1.2	Technologie automatického cíleného postřiku založená na geografické informační technologii	18
4.1.2	Technologie variabilního řízení postřiku.....	19
4.1.2.1	Řízení tlakového průtoku	19
4.1.2.2	Průběh řízení PWM	19
4.1.2.3	Míchací systém regulující koncentraci kapaliny.....	20
4.1.2.4	technologie variabilního postřiku	21
4.2	Mechanická regulace zaplevelení.....	22
4.2.1	Autonomní roboti	25
4.2.2	Poloautomatické nářadí tažené traktorem	32
4.2.2.1	Systémy strojového vidění	32
4.2.2.2	Senzorové systémy GNSS.....	35
4.2.2.3	Laserové a ultrazvukové sensorové systémy	36
5	Závěr	39
6	Literatura.....	40
7	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	48

1 Úvod

Neustálé úsilí o zlepšení efektivity zemědělské prvovýroby při současném omezení používání agrochemikálií začalo na počátku 90. let 20. století, což si vynutilo hledání nových metod vedoucích ke snížení používání pesticidů. Ty mají negativní dopad na životní prostředí.

V dosavadním procesu správy se odlišně nakládalo pouze s jednotlivými parcelami jako s nejmenší možným územím pro aplikaci, což vedlo ke kontinuální ošetření na celém pozemku. Na druhé straně je precizní zemědělství založeno na prostorové heterogenitě půdy a časové dynamice procesu produkce výnosů plodin. Rozvoj aplikované technologie, možnost využití signálů GPS (Global Positioning System) pro navigaci a rychlý rozvoj elektronických technologií otevřely možnost aplikace pesticidů lokálně podle konkrétních podmínek. To umožňuje snížit výrobní náklady a snížit riziko znečištění životního prostředí agrochemikáliemi. Herbicidy v současnosti tvoří největší podíl zemědělských vstupů pesticidů (Kohout et al., 1996).

Zároveň lze v tomto ohledu výrazně ušetřit. Četné vědecké práce (Werner et Garbe, 1998, Clay et al., 1999, Nordmeyer et Häusler, 2000) prokázaly, že i na jednom pozemku je výskyt plevelů velmi nerovnoměrný. Cílená regulace plevelů na základě precizního hospodaření předpokládá, že aplikace herbicidů budou vynechány na plochách s nulovým zaplevelením nebo podprahovými hodnoty plevelů. Dávky budou upravovány na základě stupně zaplevelení v ošetřované ploše v závislosti na datech získaných mapováním pozemků (Sökefeld et al., 2000; Gerhards et al., 2000). Uplatnění místně specifických zásad regulace plevele však předpokládá dostatečně podrobné mapování zaplevelení pozemku. Při vytváření informací o výskytu jednotlivých druhů a jejich agregaci je důležité se co nejvíce přiblížit realitě při zachování nízké časové náročnosti. Vlastní mapování se stále většinou provádí přímým vyhodnocením, což je časově velmi náročné.

V dnešní době se tyto metody uplatňují v praxi a začínají být standardem. Ačkoliv jejich pořizovací cena je vyšší, z dlouhodobého pohledu a přístupu k šetrnému zacházení s přírodou, je tento způsob hospodaření nezbytně nutný.

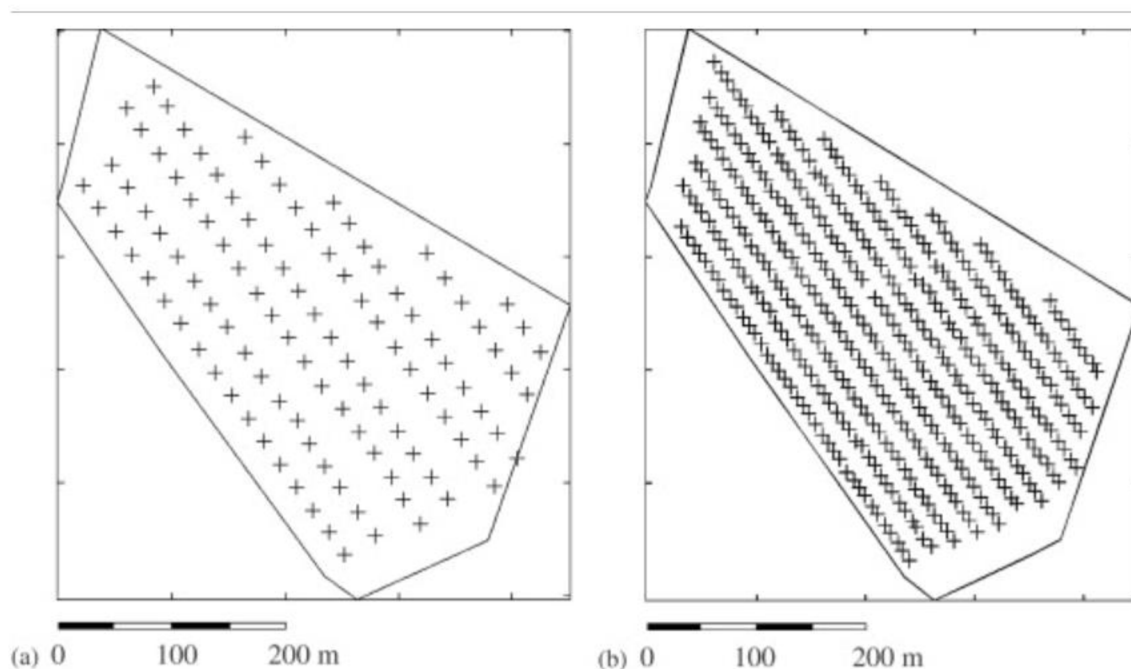
2 Cíl práce

Cílem práce bude vytvoření přehledu technologií vhodných pro detekci plevelů na zemědělské půdě. Budou popsány technické platformy využívané pro detekci zaplevelení, stroje pro cílenou aplikaci herbicidů a technika pro cílené mechanické zásahy vůči plevelům.

3 Principy mapování pozemků

Běžná zemědělská praxe ční v aplikaci jedné dávky herbicidů na celý pozemek, i když některé jeho části mají malý výskyt plevelů nebo se na něm nenachází žádný. Cílená regulace plevelů založená na principech precizního zemědělství tuto variabilitu plevelů zohledňuje. Regulační zásahy se provádějí pouze v místech, kde výskyt plevelů překračuje práh škodlivosti (Sökefeld et al. 2000 & Gerhards et al. 2000).

Tato cílená aplikace může vést k významným úsporám herbicidů (Hamouz et al. 2013), snížení negativního dopadu na životní prostředí a často i ke snížení poškození plodin herbicidy (Gerhards et al. 2012). Prostorové rozložení populace plevelů na pozemku lze mapovat ručně nebo pomocí sensorové technologie. Při ručním mapování jsou plevely v porostech zjišťovány pomocí hodnotícího rámce o známé velikosti, ve kterém je hodnocena početnost jednotlivých druhů plevelů nebo jejich pokryvnost. Zvláště v případě hodnocení početnosti jsou metody ručního mapování poměrně časově náročné a jsou účinné pouze tehdy, když je na pozemku velmi malé procento výskytu plevelů. V tomto případě je posouzení vzorkované plochy rychlé a dosažené úspory herbicidů jsou vysoké. Automatizované metody využívající senzory a výpočetní techniku mohou zajistit rychlejší způsob mapování. U obou mapovacích metod však musí být intenzita odběru vzorků dostatečná k získání map (viz obr. č.: 1), které jsou spolehlivé, aby odrážely skutečný výskyt plevelů na pozemku (Hamouz, 2014).



Obr. č.: 1 Schéma pole s mřížkovými body ručního a poloautomatického mapování plevelů (a) a automatického mapování plevelů (b) (Zdroj: <https://www.sciencedirect.com> 2022)

3.1 Manuální mapování výskytu plevelů

Při mapování výskytu plevelu na větších pozemcích nelze hodnotit průběžně celou oblast, ale je nutné se omezit pouze na vzorové plochy, které vytváří specifickou odběrovou síť. Větší výskyt plevelů zvyšuje nároky na množství vybraných vzorových ploch a výrazně tak prodlužuje čas potřebný pro mapování (Hamouz, 2005).

Při mapování pozemků je důležité vybrat správnou velikost vzorkovacího rámce, což samozřejmě do značné míry závisí na počtu přítomných plevelů. Pokud je rámec příliš velký, dochází při vysokých počtech plevelů k neúměrně dlouhé době hodnocení. Naopak s nízkým výskytem plevelu a malou plochou vzorkování má vyhodnocení rámce vysokou variabilitu a zvýšený podíl nulových hodnot. Hamouz (2005) zjistil, že u druhů s vysokým prahem škodlivosti, jako je violka rolní, postačí vzorkovaná plocha 2 x 0,25 m² pro každý bod vzorkovací sítě. Síť 40 x 40 m považuje za dostatečnou pro druhy s vysokými prahy nebezpečí. U druhů s nižším prahem škodlivosti a menším počtem např. svízel přítula je nutné použít větší vzorek, minimálně 2 x 1 m². Pro spolehlivé mapování svízele přítuly a pcháče oseta je třeba zvolit hustší síť, zejména ve směru kolmém na kolejové řádky. Vhodnost zvoleného rastru lze každopádně vyhodnotit až po provedení vlastního mapování (viz obr. č.: 2). Doposud byla uvedena pouze metodika pro přesné stanovení počtu plevelů, ale metody odhadu výskytu plevelu mohou také výrazně pomoci ušetřit čas.



Obr. č.: 2 Výsledky vyhodnocení výskytu plevelu na pozemku pomocí vzorkovacího rámce (zdroj: <https://www.agromanual.cz> 2022)

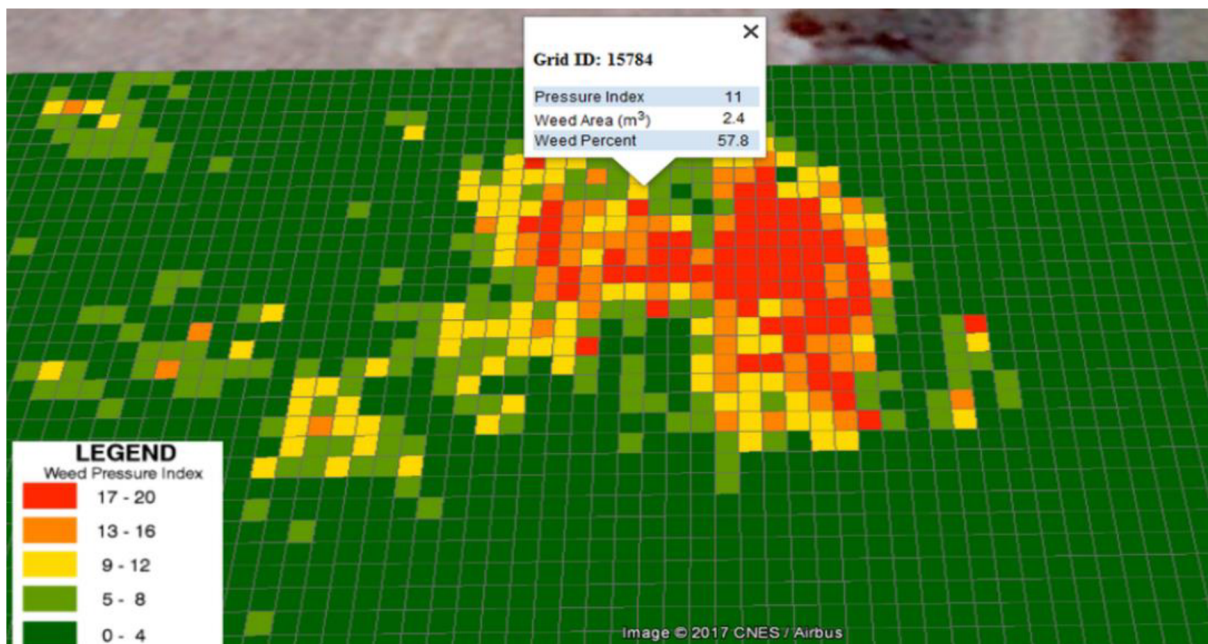
Rew et al. (2000) srovnával dvě techniky mapování, v prvním případě byly spočítány všechny rostliny ve vzorkované oblasti a ve druhém byly rozděleny do jedné z osmi kategorií pouze na základě vizuální kontroly. Použití kategorického přístupu může ušetřit velké množství času, zejména tam, kde je třeba zachytit vysoké počty rostlin, tj. vysoké hustoty plevelu a velké plochy vzorkování. Je to však spojeno s určitou ztrátou informací, kterou lze tolerovat, avšak pouze pro stanovení obecných trendů nebo pro posouzení velkých rozdílů mezi plochami (Brant & Kroulík, n.d.).

3.2 Automatizované metody

3.2.1 Dálkové průzkumné systémy

Většina metod dálkového průzkumu využívá k detekci vegetace elektromagnetické spektrum v rozsahu 400 až 2500 nm. Existují značné rozdíly ve spektrální odrazivosti vegetace a půdy, zejména v červeném a blízkém infračerveném pásmu (NIR). Zatímco půdy vykazují podobnou odrazivost v obou spektrálních pásmech, v případě rostlinné vegetace je většina červeného záření pohlcena, zatímco infračervené záření se většinou odráží (Scotford & Miller, 2005). V případě dálkového průzkumu pozemku je obvykle měřena celá plocha pozemku, čímž se eliminuje riziko nedostatečné intenzity odběru vzorků. Spektrální rozlišení závisí na počtu spektrálních pásem naskenovaných a zaznamenaných samostatně pro každý pixel obrazu. Multispektrální data pokrývají pouze několik spektrálních pásem a poskytují proto zjednodušené informace o spektrálních vlastnostech snímaného objektu. Naproti tomu hyperspektrální senzory měří odrazivost velkého počtu úzkých spektrálních pásem a poskytují tak přesnější informace o průběhu spektrální křivky objektu (Hamouz, 2014).

Pro snímkování lze použít jak letecké, tak satelitní platformy. Obecně platí, že letecké snímky poskytují vyšší prostorové rozlišení než satelitní data. Multispektrální nebo hyperspektrální zobrazování bylo mnohokrát použito k analýze plodin (Lass & Callihan, 1997; Lass et al. 2005). Jacobi a kol. (2006) použili data ze satelitního systému QuickBird k detekci výskytu plevelů v cukrové řepě, ale kvůli nízkému prostorovému rozlišení byla detekována pouze ohniska semen řepy větší než 2 m. Lamb a kol. (1999) použili k identifikaci hluchého ovsa v pěstovaném tritikale multispektrální zobrazování pomocí letadla. Prostorové rozlišení 0,5 m umožňuje detekovat ohniska s hustotou plevelu vyšší než 16 rostlin/m². Při použití vrtulníků nebo bezpilotních platforem lze díky nízké výšce letu a nízké rychlosti letu získat kvalitní snímky s výrazně vyšším prostorovým rozlišením (méně než 0,05 m) (viz obr. č.: 3).



Obr. č.: 3 Algoritmus tlaku plevelu analyzuje data z dronů s vysokým rozlišením a vytváří mapu tlaku plevelu, která farmářům poskytuje index tlaku plevelu spolu s procentem plevelu rozptýleného po celé oblasti průzkumu. (Zdroj: <https://www.precisionhawk.com> 2022)

Rozlišení satelitních snímků je nedostatečné pro zachycení plevelu v raném stádiu. Navíc málokdy mají pěstitelé při zpracování k dispozici vhodné snímky pozemků. Sledování letadlem nebo vrtulníkem je výhodnější díky vyššímu rozlišení a relativně nižší ceně. V současné době nabízejí zejména platformy UAV značný potenciál pro detekci plevelu, a to především díky nízkým provozním nákladům, nízkým letovým výškám a tím mají i možnost dosáhnout vysokého rozlišení obrazu (Hamouz, 2014).

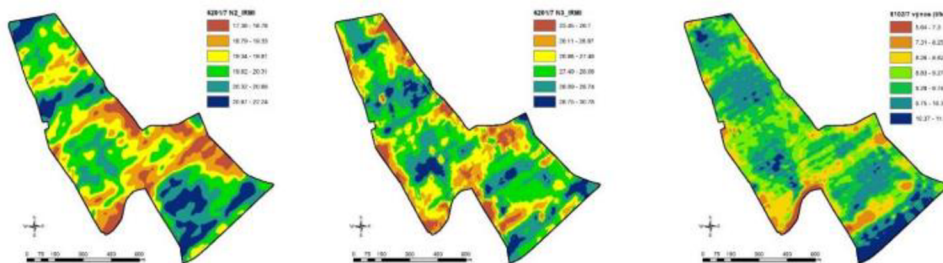
3.2.2 Pozemní senzorové systémy

Systémy detekce plevelu lze rozdělit do dvou základních skupin, které byly obsaženy v publikaci od (Biller & Ihle, 2000), kde na jedné straně existuje senzorická metoda, pomocí které lze rozlišit, zda je v určité oblasti přítomno odpovídající množství biomasy a podle toho dokáží otevřít či zavřít trysku postřikovače (viz obr. č.: 4). Tentýž systém popsali i Wartenberg & Dammer (2002). Felton & McCloy (1992) vyvinuli neselektivní systém bodového postřiku herbicidů založený na reflexních senzorech zachycující data v reálném čase. Pokud senzor detekuje procento zelené vegetace nad nastavenou prahovou hodnotou, tryska postřikovače se automaticky otevře. Tato technika funguje jednoduše a rychle, je relativně efektivní, levná a snadno použitelná v praxi. Nevýhodou však je, že plevel nelze odlišit od plodin, takže plevel lze posuzovat pouze v období bez kulturních rostlin (např. na strážích) nebo v meziřádkových kulturách. Navíc neexistuje způsob, jak rozlišit druhy plevelů, což komplikuje výběr správného herbicidu pro ošetření.



Obr. č.: 4 Použití online senzorových systému k řízení aplikace jednotlivých trysek (zdroj: <http://www.rostlinolekari.cz> 2022)

Na druhé straně jsou vyvíjeny metody využívající digitální analýzy obrazu pro aplikaci herbicidu. Takto jsou od sebe pomocí vhodných algoritmů rozlišovány druhy plevelů a kulturní rostliny (Gerhards et al. 2000); (Sökefeld et al., 2000). Tyto procesy jsou složité a pomaleji se zpracovávají, ale snímky se ukládají a georeferencují (viz obr. č.: 5), aby bylo možné provést další analýzu v dalším období. Gerhards & Oebel (2006) použili tvarové vlastnosti plevelů k jejich klasifikaci v obilninách. Přesnost klasifikace se pohybuje od 69 % do 100 % v závislosti na druhu plevelu. Jde o jeden z dosud neúspěšnějších systémů a na trhu je již jeho upravená verze. Jeho postupné uplatnění v praxi se vyplatí zejména v zemědělských službách a velkých zemědělských podnicích (Hamouz, 2014).



Obr. č.: 5 Znárodnění postupné změny aplikační dávky, dochází zde k analýze dat a jejich georeferencování (zdroj: <http://www.rostlinolekari.cz> 2022)

3.3 Alternativní způsoby mapování plevelů

Metody ručního mapování vzhledem ke své časové náročnosti neumožňují udržet dostatečnou intenzitu vzorkování na větších plochách. Součástí herbologického výzkumu je tedy hledání nových způsobů, jak usnadnit sběr dat. Rozvoj elektronické a digitální fotografie umožňuje využití analýzy dat při zpracování obrazu, ať už leteckého, satelitního nebo přímo snímání ze stojanu (Hamouz, 2006).

Pozemní metody pro automatickou detekci plevelů lze rozdělit do dvou základních skupin.

Jako metodu první skupiny využil Sökefeld (1997) analýzu obrazu k automatické identifikaci 25 plevelů v cukrové řepě. Rostliny byly fotografovány ve fázi semenáčků pomocí černobílé CCD kamery citlivé na záření NIR. Po extrakci obrysu byly rostliny přiřazeny k jednotlivým druhům na základě tvarových parametrů, jako je rozpětí listů, plocha a poměr šířky k délce rostliny. Správnou kombinací různých faktorů dosáhl 62% schopnosti určit rostlinné druhy. Po seskupení druhů podle citlivosti na herbicidy dosáhla pravděpodobnost správného výběru účinných látek 80 %.

Druhou metodou byla podle Gerhards a kol. (1998) detekce plevelů v porostech pomocí CCD kamery umístěné na mobilním zařízení. Tento fotoaparát se vyznačuje velmi krátkou dobou expozice (0,2 ms), umožňující čisté snímky i při provozních rychlostech cca 8 km/h. Doba zpracování pro 0,6 x 0,6 m je přibližně 1 s. Při výše zmíněných rychlostech systém umožňuje pořizovat nové snímky na vzdálenost 2 m.

Rozlišení satelitních snímků je v raném stádiu nedostatečné. Také pěstitelé zřídka získávají správné snímky pro práci s danou metodou. Proti tomu monitorování letadly nebo vrtulníky je výhodnější kvůli vyššímu rozlišení a relativně nižším nákladům. Stále však chybí hodnotící algoritmy pro odvození potřeby opatření k odplevelování na základě získaných dat (Kunisch, 2002).

4 Metody regulace plevelů

Metody cíleného hubení plevelů jsou založeny na principech precizního zemědělství, na znalosti místa výskytu plevele nebo znalosti souřadnic růstu kulturní plodiny. Informace o výskytu plevele na základě sledování senzorů se využívají především v oblasti chemické a mechanické ochrany rostlin. Informace o místě výskytu plevele je následně předána řídicí jednotce postřikovače, který podle této informace aplikuje postřikovou jíchou přímo na konkrétní místo výskytu plevele. Díky systému pro identifikaci druhů plevelů, je umožněn cílený zásah pouze na vybrané problematické druhy. Systém využívá znalosti o druhových profilech pro výběr vhodných herbicidů s požadovanými účinnými látkami pro hubení konkrétního druhu plevele. Pokud se jedná o mechanickou ochranu rostlin, plevelná rostlina je po přijetí dat o výskytu plevele následně mechanicky odstraněna. Lokalizaci výskytu plevele nebo přiřazení jeho souřadnic v kombinaci s určením rostlinných druhů lze provádět různými metodami a pro různá časová období spojená s aplikací (preemergentně nebo postemergentně) (Brant & Kroulík, n.d.).

Pohyb klasických postřikovačů po půdním bloku (při ošetření celého půdního bloku) závisí na způsobu aplikace ve vztahu k termínu jeho realizace. Pro aplikace mimo hlavní vegetační období plodin (regulace plevele před a po sklizni) je nutná specifikace jednotlivých pojezdových drah postřikovače ve vztahu k tvaru půdního bloku nebo budoucí trajektorii pásového kultivátoru, sazeče apod. Pro postemergentní aplikaci herbicidu včetně předsklizňového desikantu lze opět využít přesně stanovenou dráhu pohybu a určenou linii sazeče, případně použít kolejový systém. Při použití systému detekce plevele před aplikací herbicidu lze s postřikovačem pohybovat pouze po vybraných linkách, což umožní cílený zásah pouze na požadovanou část půdního bloku, kde se vyskytuje plevel. Nejprve však musí být navržen plán pro aplikování herbicidu po pozemku (Hamouz, 2014).

Při preemergentní aplikaci herbicidů je pohyb stroje většinou vázán na linii pohybu secího stroje. Je nutné linii korigovat podle šířky používaných strojů. Základem těchto systémů je požadavek na vysokou přesnost v navigačním systému. Přesnost navigačního systému při zakládání porostu zároveň ovlivňuje přesné aplikování herbicidu. V dnešní době je již navigační systém i při zakládání porostů z velké části standardem (Brant & Kroulík, n.d.).

4.1 Chemická regulace zaplevelení

Cílená regulace plevele při použití klasických postřikovačů je založena na zohlednění výskytu plevelů v konkrétních částech pozemku (viz obr. č.: 6). V přístupu k rozsahu regulace plevelů jsou systémy cílené regulace založeny na principu eliminování všech plevelů, se zohledněním na práh škodlivosti. Systémy využívající prahové parametry lze považovat za efektivnější z agronomického a ekologického hlediska. Opatření pro hubení plevelů jsou pak ukládána

pouze na pozemcích, kde výskyt plevelů překračuje práh škodlivosti (Sökefeld et al. 2000); (Gerhards et al. 2000). To může vést k významným úsporám herbicidů (Hamouz et al. 2013), snížení dopadu na životní prostředí a v některých případech i snížení poškození kulturních plodin herbicidy (Gerhards et al. 2012). Intenzita aplikačních zásahů může poté být omezena jen na problematické části pozemku. Například v případě aplikace herbicidu se dávkování obvykle upraví podle aktuální hustoty plevelu. Použití těchto metod však předpokládá, že zaplevelení půdy je zakresleno na dostatečně podrobné úrovni (Hamouz et al. 2014).

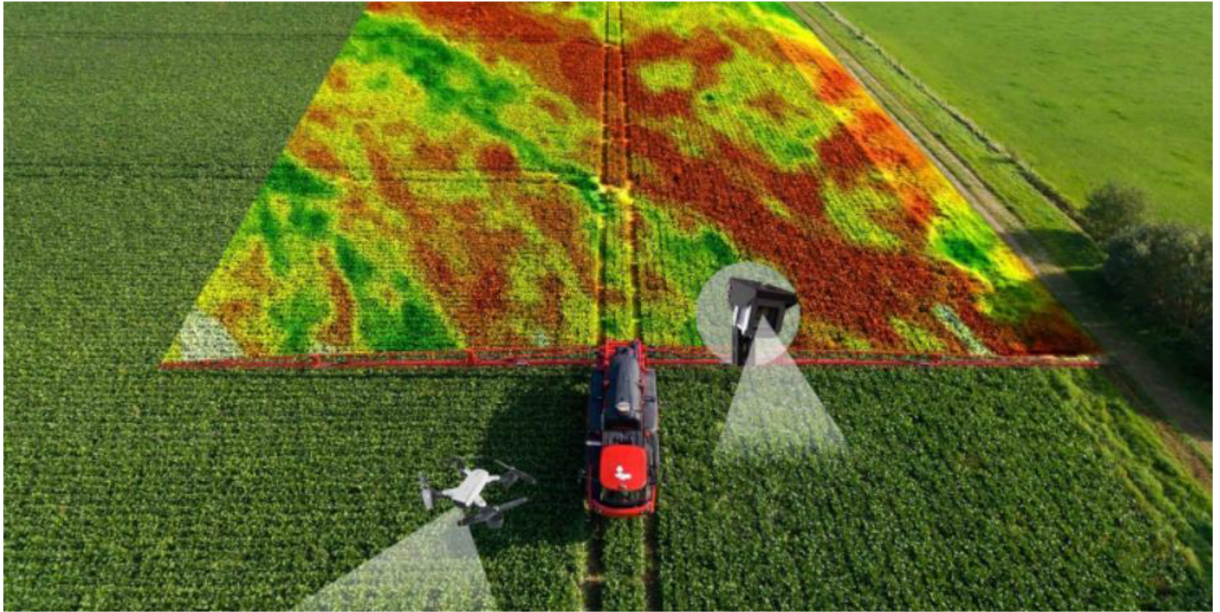


Obr. č.: 6 Cílená aplikace herbicidu pouze na plevel (zdroj: <https://www.agrifac.com>)

4.1.1 Technologie variabilního postřiku

4.1.1.1 Technologie automatického cíleného postřiku založená na snímání pomocí senzorů v reálném čase

Technologie automatické aplikace herbicidu je založena na zaznamenávání dat prostřednictvím laseru, ultrazvuku, kamery a dalších zařízení pro sběr informací. Podle stávajícího plevelného zastoupení automaticky pozměňuje dávku (viz obr. č.: 7), což může ušetřit 24-51 % ve srovnání s kontinuální aplikací herbicidu (Zeyi Wu et al. 2007). Ge Yufeng et al. (2005) vytvořil automatický a přesný systém postřiku pesticidů založený na strojovém vidění. Provedl hloubkový výzkum klíčových problémů, jako je získávání signálu, zpracování obrazu, rozhodování o aplikaci pesticidu a výměně dat, a navrhl algoritmus stromové segmentace obrazu založený na kolorovaných barevných faktorech. Ve srovnání s laserovými senzory vykazuje toto řešení jasné ekonomické výhody (Llorens et al. 2007). Yang Chunjie et al. (2003) použil umělou neuronovou síť řízení k simulaci aplikační dávky herbicidů. Polní data se shromažďují pomocí kamer a konvoluční neuronové sítě, díky kterým jsou rozlišovány plodiny a typy plevelů. Ke stanovení pokrývnosti a distribuce plevelu bylo použito zpracování obrazu. Výsledky testů ukázaly, že cílové pokrytí herbicidem bylo 80–90 %.



Obr. č.: 7 Znárodnění dat, které se analyzují v reálném čase a dochází k variabilní dávce postřiku. (zdroj: <https://www.agrifac.com>)

Tian (2002) studoval a testoval automatický postřikový systém založený na strojovém vidění v reálném čase. Systém využívá dvě kamery k získávání informací o plevelech. Rychlost radaru se používá k získání informace o rychlosti postřikovače. Poté, co počítač zpracuje data, přeneše informace o rychlosti postřiku do řídicí jednotky postřikovače, aby bylo možné realizovat variabilní postřik. Moltó et al. (2001) vyvinuli technologii, podstatou, které je použití dvou ultrazvukových senzorů k vytvoření systému detekce plevelů a přijetí třístavové strategie řízení postřiku plného, polovičního a žádného postřiku.

Yuan Xiangyue et al. (2004) použili technologii infračervené detekce a technologii automatického řízení aplikace k vývoji nového typu postřikovače. Tumbo et al. (2002) provedl experimentální studii založenou na ultrazvukové detekci tvarových vlastností plodin. Při pokusu je nutné zajistit, aby rostliny rostly v řádcích a směr stroje byl rovnoběžný s linií růstu rostlin.

4.1.1.2 Technologie automatického cíleného postřiku založená na geografické informační technologii

Mezi technologie automatického cíleného postřiku patří automatické variabilní aplikace pesticidů a hnojiv založené na GIS, GPS a inteligentních továrních systémech pro podporu rozhodování k ochraně strojů před změnami v terénu (Tumbo et al. 2002). Důležitým aspektem této technologie je možnost dynamicky měnit nastavení parametrů stroje podle potřeby.

Gerhards et al. (2002) navrhl přesný herbicidní postřikový systém založený na mapových informacích GPS. Získanou mapu výskytu plevelů na poli vložil do počítače připojeného k řídicímu systému postřiku. Systémy navigace GPS byly použity pro určení polohy postřikovače v čase a pro přenos datových signálů do řídicí jednotky prostřednictvím

systému datové sběrnice. Po čtyřech letech výzkumu bylo zjištěno, že použití této technologie by ve skutečnosti mohlo snížit používání herbicidů.

Při postřiku generuje řídicí jednotka signál s pokyny pro postřik podle polohy GPS na zařízení a informace o rychlosti přenášené radarovým senzorem. Počítač řídí celkový průtok do ramene přes servoventil. Průtokoměr se používá k určování průtoku systémem v reálném čase a jeho přivádění zpět do počítačové konzoly pro dosažení uzavřené smyčky řízení a zlepšení přesnosti systému (Zetian Fu at al. 2007).

4.1.2 Technologie variabilního řízení postřiku

4.1.2.1 Řízení tlakového průtoku

Pomocí technologie řízení tlaku je výstupní část trysky pevná a průtok je řízen úpravou tlaku kapaliny. Se zvyšujícím se tlakem se zvyšuje průtok průřezem trysky za jednotku času. Se snižováním tlaku se průtok průřezem trysky za jednotku času zmenšuje. Anglund & Ayers (2000) vyvinuli tlakově řízený nebulizér a testovali jeho odpovídající výkon v terénu. Výzkum ukázal, že povel z řídicího systému vyžaduje změnu tlaku postřiku, dokud tlak v trysce nedosáhne požadované hodnoty po dobu asi 2 vteřin. Testy ukazují, že model může dosáhnout uspokojivých výsledků (Yan Shi at al. 2004). Pro trysky s plochým ventilátorem s proměnným rozstříkem (Stone et al. 1999), doporučovali nastavit tlak v systému mezi 0,2 a 0,4 MPa s tím, že překročení tohoto rozsahu tlaku by mělo za následek špatné velikosti a nerovnoměrné rozložení kapiček a zvýšené riziko popálení listů. Baijin Qiu at al. (2015) navrhl jako součást zařízení s proměnným průtokem variabilní rozstříkovací systém s elektrickým regulačním ventilem. Podle experimentálních výsledků jsou náklady na snímač tlaku nižší než na snímač průtoku.

4.1.2.2 Průběh řízení PWM

Šířková pulzní modulace je univerzální technologie pro ovládání aplikace rychlým otevíráním a zavíráním (pulsujících) jednotlivých segmenty postřikovače. Spínací zařízení generuje impulsy, které jsou závislé na rychlosti jízdy. (Giles a kol. 1992) dále studoval vztah mezi tlakem v systému a průtokem za podmínek řízení průtoku PWM instalací solenoidového ventilu na vstupu trysky. Určili rozsah řízení průtoku a předpověděli proveditelnost komerčního variabilního postřikovače. (King B A & Kincaid D C, 1996) vyvinuli postřikovač s proměnným průtokem, který moduluje proudění trysky úpravou plochy otvorem trysky nastavením pohyblivého čepu umístěného v trysce. Wei Deng (2007) analyzoval charakteristiky postřiku variabilního postřikovače za tří podmínek PWM, kontinuálního, přerušovaného a plného tlaku a porovnal tři variabilní postřikovače u kterých zjistil, že plynule variabilní postřikovač s PWM má nejširší rozsah nastavení průtoku a je plynule nastavitelný (Wei Xinhua et al. 2007). Systém přerušovaného PWM postřiku souvisí s proměnnou rychlostí postřikovače. Jiabing Gu et al. (2012) vyvinuli nový variabilní postřikovač, který využívá PWM k řízení doby otevírání a zavírání elektromagnetického ventilu. Řízení průtoku každé kapaliny tryskou poskytuje teoretický základ pro postřikovač

s proměnnou rychlostí větru pro řízení proměnné rychlosti postřikovače. Liu Wei et al. (2012), vyvinuli systém PWM pro variabilní řízení postřiku a objemu postřiku, úhlu postřiku a objemu kapek v poměrech 40 %, 60 %, 80 % a 100 %.

Liu H et al. (2012) vyvinuli vícekanálový integrovaný PWM regulátor pro potřeby širokospektrálních postřikovačů, který může dosáhnout nezávislého PWM řízení pro každou trysku vícehlavého systému, (viz obr. č.: 8).



Obr. č.: 8 Ukázka možnosti výbavy moderních postřikovačů značky Horsch (zdroj: <https://www.agroportal24h.cz> 2022)

4.1.2.3 Míchací systém regulující koncentraci kapaliny

Aplikace pesticidu s proměnlivým koncentrátem se týká způsobu postřiku, který mění koncentraci pesticidu v reálném čase prostřednictvím mísiče pesticidů. Existují především dva typy systémů řízení vstřikování pesticidů (Wei Deng at al. 2009). Řídicí systém vstřikování využívá čerpadlo pesticidů a řídicí jednotku k určení množství chemické injekce, spíše než přímé řízení toku roztoku smíšené postřikové jíchy. Průtok vody v systému je obvykle konstantní a množství vstřikovaného materiálu se mění podle přikázaného signálu rychlosti nebo množství vstřiku. Systém se nemusí zabývat zbývající kapalinou, což snižuje riziko přímého vystavení operátora pesticidům. Jelikož tlak v systému může být udržován konstantní, může rozprašovací hlava zajistit, že se velikost kapek a způsob distribuce jíchy nezmění. Tento systém má však velké zpoždění při změně koncentrace chemického roztoku. Toto zpoždění nevyhnutelně vede k chybě mezi množstvím rozprášeného pesticidu a skutečnou potřebou, a tím ovlivňuje účinnost aplikace (Jilin Wu, 2012). Tompkins et al. (1990) naměřil zpoždění nejméně 12 sekund od změny kontrolní koncentrace ke změně koncentrace roztoku přípravku na trysku a také zjistili, že poloha vstřikování přípravku je posunuta směrem k trysce, tj. Upevnění v blízkosti trysky může účinně eliminovat časové

zpoždění, ale tento způsob je značně nákladný, a navíc ztěžuje udržení stejnoměrné koncentrace tekutiny mezi tryskami.

Borgelt (1996) testoval zpoždění variabilního postřikovače Raven SCS 700 (viz obr. č.: 9). Výsledné zpoždění 15 sekund dokazuje, že touto metodou je obtížné dosáhnout požadovaného účinku. Složení účinných látek při aplikaci touto metodou je komplikovanější (se změnou celkového množství kapaliny vstřikované do potrubí se mění i tlak v systému a tím se mění velikost kapek a kvalita nástřiku). Liu Zhizhuang a kol. (2009) navrhl sadu automatických postřikovačů pro separaci pesticidů v potrubí a testoval zařízení pro míchání kapalin a výkon systému. Výsledky ukázaly, že maximální relativní chyba mezi průtokem a cílovým průtokem byla v rozmezí $\pm 3,0$ %. Zaručuje relativně dobrý průtok a tlak stříkání, čímž zaručuje lepší účinek stříkání.



Obr. č.: 9 Řídicí modul Raven SCS 700 připevněný na rampě postřikovače (zdroj: <https://ravenprecision.com> 2022)

4.1.2.4 technologie variabilního postřiku

Variabilní postřik zahrnuje především tři fáze: fázi detekce, získávání informací o cílech postřiku; fázi rozhodování o řízení postřiku, analýzu informací o cíli a plán optimalizace; fázi stříkání podle požadovaného množství nástřiku, podle vlastnosti kapaliny a provedení variabilního postřiku (Hongjin Chen at al. 2005).

Walker & Bansal (1999) navrhli variabilní trysku využívající aktivaci povrchovým tlakem trysky. Konstrukce se vyznačuje otvorem ze dvou vnitřně sklopných tenkých plechů. Obě kovové desky se pohybují tlakem při změně velikosti otvoru trysky. Nevýhodou však je, že tato rozprašovací hlava má menší úhel rozprašování. Stark J C at all (1993) vyvinuli systém využívající modulární postřikovače se třemi konvenčními tryskami, z nichž každá je řízena mikrokontrolérem. Tento kombinovaný postřikovač má nastavení průtoku v rozmezí 25 %, 50 %, 75 % a 100 %. Tyto postřikovače jsou ale drahé, mají složitou konstrukci a velké rozměry.

Camp et al. (2000) vyvinuli řízený variabilní postřikovač, jehož principem je systém, kdy voda vstupuje do potrubí pod stálým tlakem a prochází pulzním výstupem vysokotlaké vzduchové trysky. Výkon trysky je ovlivněn objemem přiváděné vody, tlakem vzduchu a vody, dobou a frekvencí pracovního cyklu a potřebou dalších vzduchových kompresorů.

Funseth et al. (2013) vynalezli variabilní trysku pro regulační ventil průtoku v trysce, ovládanou krokovým motorem. Bui & VariTarget (2005) představila dvoustupňovou trysku s konstantním průtokem a navrhla trysku s proměnnou rychlostí se dvěma zařízeními pro unášení. Řešení Buio bylo přijato společností US Spray Target a vytvořilo produkty Var Target, Ver Jet a Var Flow.

Dále byla navržena metoda podle Needham et al. (2012) pro připojení proporcionálního solenoidového ventilu k rozprašovací hlavě, která může nezávisle řídit objem rozstříku a velikost kapek. Použití technologie solenoidového ventilu na stříkací hlavě výrazně snižuje dobu odezvy a účinnost stříkání.

4.2 Mechanická regulace zplevelení

Mechanické hubení plevelu bylo v historii zemědělství vždy používáno a je považováno za udržitelné. Mechanická kontrola plevelu je však náročná a vyžaduje kombinaci různých technologií a pěstitelských strategií k dosažení ekonomicky přijatelné úrovně kontroly plevelu (Oriade & Forcella, 1999). Mezi další výzvy ve srovnání s tradičními postřikovači patří nízká pracovní rychlost mechanických operací hubení plevelu. Vědecká literatura uvádí různé pozitivní i negativní výsledky studií mechanické kontroly plevelu. Wiltshire a kol. (2003) a Kunz a kol. (2015) zjistili, že mechanické odplevelení, samotné nebo v kombinaci s herbicidy, přineslo výnosy cukrové řepy podobné konvenčním postřikům. Rasmussen (2004) také dosáhl pozitivních výnosových výsledků při mechanickém odplevelování zrn, proti (Lötjönen & Mikkola, 2000) pozorování, že mechanické odplevelování snižuje výnosy zrna nebo nemá vůbec žádný účinek. Navzdory své složitosti by mechanické odstraňování plevelu mělo být považováno za cenný doplněk k chemické kontrole plevelu (Busi et al. 2013). Herbicidy se stávají omezeným zdrojem, protože za posledních 20 let bylo objeveno pouze několik herbicidů s novými způsoby účinku (Duke, 2012). V současnosti existuje na celém světě 262 (152 dvouděložných a 110 jednoděložných) druhů plevelů odolných vůči herbicidům (Heap, 2020).

Kromě toho je třeba mít na paměti politické trendy. Nová restriktivní legislativa EU připravuje půdu pro cíl snížit do roku 2030 používání evropských zemědělských pesticidů o 50 % (Evropská komise, 2022). Do té doby je důležité najít vhodné náhrady, které úbytek syntetických herbicidů doplní. Hledání vhodných alternativ k fungicidům a insekticidům je také velmi důležité, ale není těžištěm této práce.

Na rozdíl od postřiku zahrnuje mechanické odstraňování plevelu opakovaný přímý fyzický kontakt nástroje s půdou. Neexistuje žádná přesná odpověď na otázku, kolik průjezdů plečkou je zapotřebí pro maximalizaci kontroly plevelu a minimalizaci poškození plodin. Frekvence a intenzita ošetření závisí na několika faktorech včetně fáze růstu plodiny, fáze růstu plevelu, hustoty sadby, rozteče řádků a půdních podmínkách (Melander a kol. 2005; Van Der Weide et al. 2008; Kolb & Gallandt, 2012). Některé obecné předpoklady však lze uplatnit pro různé plodiny. Například cukrová řepa, sója a kukuřice jsou široce rozmístěny

a obvykle vyžadují 2 až 3 mechanické vstupy (Gunsolus, 1990; Kunz et al. 2018). U konkurenčních plodin, kde je rozteč řádků často malá, jako jsou obiloviny, může k dosažení adekvátní účinnosti regulace plevelu stačit 1–2 přejezdy bran (Brandsæter et al. 2012). Faktory, které je třeba vzít v úvahu pro účinnou mechanickou kontrolu plevelu, jsou doba ošetření, frekvence, typ kultivace a intenzita (agresivita). Rovněž je třeba vzít v úvahu období růstu plodin, strukturu a vlhkost půdy a podmínky před a po počasí. Zejména doba ošetření je často diskutovaným tématem mezi zemědělci, ale obecné předpoklady o načasování a frekvenci mechanického odplevelování je obtížné stanovit. (Oriade & Forcella, 1999).

Mechanické odplevelování s sebou vždy nese riziko částečného poškození plodin nebo dokonce úplné ztráty rostlin. Fyzické poškození plodin inhibuje růst rostlin a umožňuje vstup patogenů, což může vést k sekundární infekci a snížení výnosů (Findlay et al. 1996). Například červená řepa se může při mechanickém poškození nakazit *Fusarium* nebo kořenovou hnilobou (Draycott, 2008).

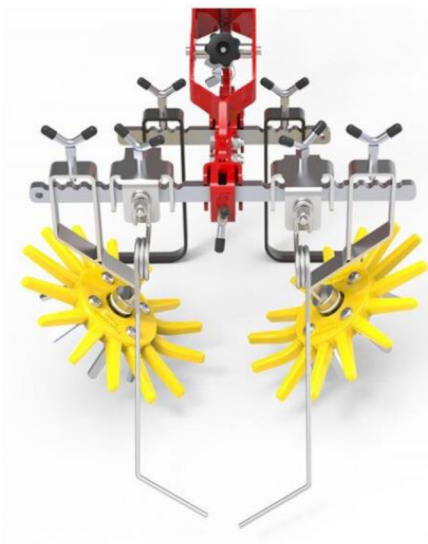
Zemědělci se obecně shodují, že čím dřívější mechanické ošetření, tím lepší kontrola plevelu a vyšší výnos. Několik studií prokázalo důležitost včasné regulace plevelu v různých růstových situacích, včetně suchých fazolí (Vangessel et al. 1998), cibule (Bond et al. 1998) a ozimé pšenice (Welsh et al. 1999; Knezevic a kol. 2002). Rasmussena a kol. (2004) nicméně provedl studii na jarním ječmeni, která ukázala, že různé doby ošetření v rámci dvoutýdenního okna neovlivnily výnos plodin, a dospěli k závěru, že úprava intenzity rýhování na základě období růstu porostu je důležitější než doba po rýhování. Všechny studie se shodují na tom, že typ pěstitelské praxe má významný vliv na účinnost regulace plevelu.

Tři kategorie postemergentního mechanického plevelu v polních plodinách jsou:

- 1) celoplošné
- 2) meziřádkové
- 3) uvnitř řady

První, celoplošné ošetření, se rozumí metodě, při které je ošetřeno celé pole, zatímco mechanické plevelu mezi řádkem a v rámci něj ponechávají plochu blízko plodiny neošetřenou. Typickými celoplošnými ošetřovacími nástroji jsou rotační plečky, kde se předpokládá a toleruje poškození určitého procenta rostlin. Je vhodné pro různé plodiny, včetně obilí, kukuřice, hrachu a sóji. Některé plodiny (např. cukrová řepa) jsou méně vhodné pro podřezávání kvůli křehkým listům, které tak mohou utrpět ztráty na výnosu (Ascard a Bellinder, 1996). Obecně je podřezávání možné, ale vyžaduje zvýšenou hustotu semen a nemělo by se provádět před skutečným stádiem 4 až 6 listů řepy (De Buck et al. 1999; Van Der Weide et al. 2008; Cioni & Maines, 2010). Z toho důvodu se dá použít jako doplněk k plečkám, ale protože řepa vyžaduje intenzivní plečkování již před fází 4 listů, samotná plečka nemusí být pro účinné hubení plevelu dostačující. Meziřádkové ošetření kultivují prostor mezi řádky plodin a vnitřádkové plečky zahrnují ošetření řádků plodin. Obvykle se kombinace meziřádkového a vnitřádkového ošetření aplikuje současně, aby se maximalizoval počet ošetřených plevelů v jedné operaci.

Pro ošetření kukuřice nebo sóji je typická sada s kartáčovým segmentem (viz obr. č.: 10) a prstovou plečkou. Prstové a torzní plečky (viz obr. č.: 11) jsou velmi účinnými specializovanými nástroji pro odstraňování plevelu mezi řádky (Riemens et al. 2007; Van Der Weide et al. 2008). Sensorový (inteligentní) kultivátor musí být schopen identifikovat strukturu řádků plodin nebo jednotlivé rostliny, aby bylo zajištěno optimální nastavení nástroje pro danou plodinu. Mechanické části stroje by měly být umístěny co nejbližší plodině, aby se zvětšila ošetřovaná plocha kolem rostliny. Je však třeba se vyhnout poškození na kulturních plodinách. Rostliny jsou snadno poškozeny chybami v řízení nebo pokynech, což může vést k vážným ztrátám na výnosech (Home et al. 2002; Melander a kol. 2006). To podtrhuje důležitost přesného vedení praxe. Čím blíže je ramenní nástroj k řadě rostlin, tím důležitější je příprava před výsadbou. (Melander & Hartwig, 1997). Vyšší digitalizaci totiž odpovídají i vyšší pořizovací náklady a využití moderních technologií je třeba skloubit s nabízenými výhodami, aby bylo ekologicky i ekonomicky výhodné.



Obr. č.: 10 Plečí segmenty (Zdroj: <https://www.farmarik.cz/>)



Obr. č.: 11 Row-master RN (zdroj: <https://www.bednar.com> 2022)

4.2.1 Autonomní roboti

Zemědělské roboty lze použít pro mnoho různých polních operací, včetně sklizně nebo hubení plevelů. Autonomní roboti se liší v mnoha vlastnostech: vzhledem, uspořádáním, mohou sahát od upravených traktorů až po malé profesionální plošiny, které mohou autonomně přejíždět pole a provádět ošetření, viz obr. č.: 12 (Emmi a kol. 2014). Robotické systémy jsou již mnoho let důležitou součástí pracovních linek průmyslového pěstování (Day, 2011). Jejich implementace v potravinářských a zemědělských systémech je však problematická kvůli složitému, nestrukturovanému a neustále se měnícímu prostředí (Nof, 2009; Day, 2011; Hiremath a kol. 2013; Bechar a Vigneault, 2017; van Henten a kol. 2017).



Obr. č.: 12 Robotická plečka od NaïoTechnologies – Dino (zdroj: <https://www.agromanual.cz> 2022)

I když zemědělské roboty nemusí být tak přesné na centimetry, jako průmyslové roboty, musí pokrývat velké plochy a často se potýkají s topografickými odchylkami a nepravidelnými velikostmi lokalit (Edan, 1995). Kromě toho je třeba přesně určit polohu a rozlišit plevel od

plevele. To je nezbytným předpokladem pro robotické systémy, které provádějí mechanické regulace plevelu (Baerveldt & Åstrand, 2002). Tento úkol je ztížen změnami vzhledu rostlin, střídavým tlakem plevelů a jejich populací a změnami během vegetačního období.

Bechar & Vigneault (2017) se dobře vypořádávají se složitostí vytváření robotů pro zemědělské aplikace. Vytvoření autonomních mobilních robotických systémů pro zemědělské aplikace se tak poprvé stalo skutečným aspektem vědeckého výzkumu.

Pokud jde o kontrolu plevelu pomocí autonomních mobilních robotů, Slaughter et al. (2008) identifikovali jako základní vlastnosti následující technické požadavky: samonavádění, detekce a identifikace plevelu, přesná vnitrořádková kontrola plevelu a mapování plevelu. Mezi těmito funkcemi jsou nejnáročnější úkoly detekce, identifikace a určení přesné polohy rostlin. Existuje mnoho kroků potřebných k lokalizaci plodin nebo plevelu a existují dva hlavní koncepty pro použití robotických systémů péče o rostliny a mechanického odstraňování plevelu.

Prvním je použití GNSS (Global Navigation Satellite System) ke georeferencování vysazených nebo zasetých rostlin a uložení jejich přesné polohy do mapy rostlin (Pérez-Ruiz & Upadhyaya, 2012). Robotický systém může později tyto informace použít k lokalizaci jednotlivých plodin. Nevýhodou však je, že chyby při setí nebo sázení mohou ovlivnit výkon odplevelovacího procesu. Pokud je odplevelování založeno pouze na informacích GNSS, neuvažuje se s nepravidelně a chybně rozmístěnými plodinami, které by tedy mohly být poškozeny. Studie mapování semen ukázaly, že umístění semen mapované plodiny může být do 34 mm (Ehsani et al. 2004) nebo 16-43 mm (Griepentrog et al. 2005) od klíčící plodiny. Tyto výsledky naznačují, že mapování semen může být proveditelné pro aktivní odstraňování plevelu. V kombinaci strojového vidění a GNSS navigace je však vidět pokročilejší koncepty. Robotický systém přijímá potřebné GNSS souřadnice pro obecnou polní navigaci, a je schopen detekovat rostliny nebo řádky plodin sám bez předchozí znalosti mapy osiva. Nástroj řízený kamerou pak může rostlinu mechanicky provést specializovaný úkon v přesném místě rostliny nebo podél řady plodin.

Výzkum mechanického hubení plevelu pomocí referenčního systému GNSS lze nalézt v Norremark et al. (2008, 2012). Jejich robotický systém byl schopen provádět mechanickou meziřádkovou kontrolu plevelu, když se pohybovali podél řádku plodiny pomocí cykloidní plečky. Bylo zjištěno, že v kombinaci s trochoidálním ošetřením plečkou lze ošetřit až 91 % plochy pole. To představuje velkou plochu, z čehož vyplývá, že tento způsob může vést k vysoké účinnosti hubení plevelu. Podobně Bakker a kol. (2010) popsali použití inteligentních automatických pleček (IAW, Wageningen University) pro meziřádkové kypření kukuřice při setí s odkazem na RTK-GPS (Real Time Kinematics Global Positioning System). Autoři poznamenali, že při rychlosti 0,5 m/s nebyly poškozeny žádné rostliny. Průměrná pracovní rychlost 0,5 m/s však není tak rychlá jako u klasického traktoru. Nízká pracovní rychlost může být kompenzována robotizovaným systémem, který pracuje ve dne i v noci. Vystává však další problém: Efektivní mechanické hubení plevelu s konvenčním traktorem obvykle vyžaduje vyšší jezdové rychlosti, minimálně 4 km/h. Některé nástroje, jako jsou

brány, dokonce vyžadují rychlost alespoň 6 až 12 km/h, aby byla zajištěna optimální účinnost regulace plevelu (Bowman & Outreach, 2002). Většinu plevelů totiž kultivátor nejen poseká nebo vytrhne, ale určitý počet malých plevelů je zasypán půdou a brání tak jejich růstu. Zejména rotační nástroje jsou velmi výkonné a dokážou odstranit i velký plevel, který by plečka nebo brány nemusely odstranit. Proto jsou rotační nástroje ideálním řešením pro kompenzaci rychlostních omezení robotizovaných systémů.

Platforma Bosch Deepfield Robotics BoniRob vyvinula nový aktivní nástroj (viz obr. č.: 13) pro mechanickou kontrolu plevelu (Langsenkamp et al. 2014). Na plevelnou rostlinu se umístí perforovaná trubice a spustí se nad rostlinu, kterou poté rychlým bodnutím mechanicky zlikviduje. To může fungovat pro lehké půdy, ale obtížné půdní podmínky a pomalé pracovní koncepty mohou být problematické. Proto, i když je trubkový rýč 94% účinný při hubení plevelu v blízkosti porostů a plodin, není jeho použití považováno za slibnou mechanickou metodu.



Obr. č.: 13 Bosch Deepfield BoniRob (zdroj: <https://www.researchgate.net> 2022)

Namísto použití referenčních dat GNSS Baerveldt & Åstrand (2002) vybavili robotický systém kamerou směřující dopředu v kombinaci se systémem šedého vidění a blízkým infračerveným filtrem. Systém je schopen lokalizovat řádky řepy a identifikovat jednotlivé rostliny této plodiny. Po určení umístění každého řádku řepy byl pneumatickým cyklovačem aktivován mechanický nástroj sestávající z rotačního kola. Kola se otáčejí kolmo k řadě plodin, čímž eliminují plevel kolem každé plodiny řepy.

Kromě polní kontroly plevelu lze roboty použít také na pastvinách k likvidaci některých plevelů, čímž je snížena potřeba lidské pracovní síly (van Evert et al. 2011). Autonomní robot byl vyvinut a testován van Evertem et al. (2011) na hledání a likvidaci šťovíku (*Rumex obtusifolius* L.) na komerčních farmách. Robot se pohybuje na předem definovaných cestách určených systémem GNSS. Kamera směřující dolů pak identifikuje rostlinu *R. obtusifolius* a umístí mechanický nástroj do středu rostliny plevelu a rotujícími noži je nežádoucí rostlina rozřezána na kusy.

Na pastvinách jsou často problémem velké plevely jako *Cirsium arvense* L. (pcháč rolní) nebo *Rumex* spp (šťovík). Odstranění těchto rostlin vyžaduje ruční práci nebo postřik herbicidy. Schopnost spoléhat se na automatizované mechanické systémy při odstraňování plevelů by mělo významné pozitivní dopady na životní prostředí a výrazně by zkrátilo pracovní dobu člověka. Na základě této myšlenky Noguchi et al. (2004) navrhli koncept robotické flotily založené na systému master-slave. V takovém systému několik samořídících vozů vykonává všechny zemědělské práce související s plodinami, od setí až po sklizeň. Hlavní robot zahrnuje funkce rozhodování a plánování, zatímco jeden nebo více podřízených robotů následuje hlavního robota a pomáhá mu s přidělenými úkoly. Projekt RHEA (Robotics for Agriculture and Related High Technology and Equipment) vzal malé traktory dostupné na trhu a dovybavil je tak, aby samy plnily zemědělské úkoly viz obr. č.: 14. Traktory byly vybaveny strojovým viděním pro detekci plevelu a řádků plodin, laserovými dálkoměry pro detekci překážek a GNSS pro obecnou navigaci v testovacím poli (Emmi et al. 2014). Perez-Ruiz a kol. (2015) vybavili jeden z projektových traktorů RHEA mechanickou a termickou plečkou. Zatímco termální nástroje likvidují řádkové plevely v kukuřici selektivně, mechanické nástroje provádějí kontinuální řádkové plení bez ohledu na pokrytí plevellem. Mechanicko-tepelná kombinace dosáhla 90% snížení plevelu a nebyly zaznamenány žádné velké ztráty na úrodě. Kromě kukuřice byl systém RHEA-fleet testován na jiných plodinách, jako je cibule a česnek (Conesa-Muñoz et al. 2015).



Obr. č.: 14 Traktory Kubota autonomně sází sójové boby (zdroj: <https://www.dtnpf.com> 2022)

AgBotII (Bawden et al. 2017) viz obr. č.: 15, je další zemědělský robot, který kombinuje mechanické a chemické nástroje na odstraňování plevelu. Jednotlivé plevely se třídí a odstraňují mechanicky nebo chemicky. Přesnost klasifikace je 90 %. Odplevelení mechanickými nástroji podle autorů úspěšně odstranilo divoký oves a svízel. Díky kombinaci mechanických a chemických operací pro hubení plevelu mohou být roboty účinnou alternativou k tradičním kontrolním technikám.



Obr. č.:15 Odplevelovací robot QUT: AgBotII (zdroj: <https://www.queenslandcountrylife.com> 2022)

Tyto systémy mohou být použity v každodenních zemědělských situacích. Aby se tak stalo, je v tomto odvětví potřeba ještě dalšího vývoje. Největším problémem je zajištění nepřetržitého chodu robota. Výrobci robotů by se proto měli zaměřit na poskytování odpovídající zákaznické podpory v případě poruchy. Podpora by měla zahrnovat vnitrořádkové řešení a také místní techniky, kteří mohou rychle jednat a provádět nezbytné opravy přímo na farmě. Traktory jsou dnes také vybaveny nejmodernější technikou, zemědělci přitom často nezvládají potřebné opravy. Během kritických období (např. při pleni, při sklizni) zemědělci potřebují maximální provozuschopnost stroje a dostupnost správného vybavení. Jakékoli poruchy musí být co nejrychleji odstraněny, což může být brzděno nedostatkem dostupného personálu a odborných znalostí (Gobor, 2013).

Navzdory překážkám, které musí roboti v zemědělském prostředí překonávat, jejich potenciál roste. (Gobor, 2013; Chen et al. 2016). Malá vozidla využívaná v zemědělských podnicích mohou být snadno poháněna solárními panely a elektřinou, což eliminuje závislost na fosilních palivech. Roboti navíc mohou pracovat 24 hodin denně a mají tak výhodu i vůči kvalifikovaným pracovníkům.

Společnosti v hojném počtu pracují na řešeních robotického odstraňování plevelu s cílem minimalizovat dopad herbicidů na životní prostředí. NAÏO (Francie) nabízí tři modely robotů ("OZ", "DINO" a "TED") pro zemědělské činnosti. Tyto modely mohou pracovat částečně autonomně (Autonomous Weeding, Agricultural Robots – Naïo Technologies, 2019) viz obr. č.: 16. Většina jejich robotické navigace je však založena na navigaci RTK-GPS s předem naplánovanými trasami, což stále vyžaduje složité nastavení (van Evert et al. 2011).



Obr. č.: 16 Robotická plečka od NaïoTechnologies – Dino (zdroj: <https://www.agromanual.cz> 2022)

Stejně jako model robota „DINO“ společnosti NAÏOs, Carré (Francie), který vyvinul robota „ANATIS“, pracuje na souvisejících konceptech. Jeho cílem je také pomoci zemědělcům pěstovat zeleninu prováděním mechanické regulace plevelu (Carré – Made for Agriculture, 2020). Menší systémy jako „Tertill“ jsou vyvíjeny pro menší zahradní plochy (Franklin at al. 2020) viz obr. č.: 17. Zatímco malý robot zvládne pouze omezené oblasti, může být také použit v mnoha rojích robotů, aby zvládl celá pole. Výhodou je rychlá výměna jednotlivých jednotek (van Evert et al. 2011).



Obr. č.: 17 Solární odplevelovací robot Tertill (zdroje: <https://www.homecru.com> 2022)

Existují i další robotické systémy, které jsou stále ve vývoji a dosud nebyly komerčně využity. Patří mezi ně PUMAgri od společnosti SITIA, který je rovněž vyvíjen za účelem snížení herbicidů v zemědělství (PUMAgri, 2020) viz obr. č.: 18.



Obr. č.: 18 Sitia – PUMAgri (zdroj: <https://www.sitia.fr/> 2022)

Pro výše uvedené robotické systémy se velikosti jednotlivých strojů mohou pohybovat od velmi malých buněk (TerTill nebo OZ) až po roboty o velikosti malých traktorů, jako je projekt RHEA. Větší roboty nejsou považovány za výhodu, protože by výrazně zvýšily zhutnění půdy. Myšlenka robotických systémů spočívá v tom, že by měly provádět opakující se úkoly 24 hodin denně, 7 dní v týdnu, aby byl stres způsobený plevelem nízký. Zemědělské roboty proto nesmí být příliš těžké. V opačném případě negativní účinky zhutnění půdy převáží výhody mechanických opatření na hubení plevelu. Kromě velikosti a hmotnosti stroje je problémem také svažité terén. Energreen vyvinul robota RoboZERO, viz obr. č.: 19. speciálně přizpůsobeného na sekání svahů až do 30° (Robozero Weeding Robot, 2020). Je však řízen dálkovým ovladačem a nemůže fungovat plně autonomně. Robot od FarmWise ovládá systém, který spojuje všechny předpoklady úspěšného mechanického senzoru. Tento robot zachycuje a analyzuje snímky rostlin, aby detekoval a eliminoval plevel (FarmWise, 2020). Zdá se, že jde o systém, který by se dal využít pro dlouhodobou práci v tomto oboru za mnoha podmínek. Podobným, ale solárně poháněným autonomním robotem je „Farmdroid FD20“, který dokáže sít a okopávat mezi řádky plodin. Kombinací setí a hubení plevelu vznikl zajímavý hybridní robot (Langsenkamp et al. 2014).



Obr. č.: 19 Robot RoboZERO mulčující golfové hřiště (zdroj: <https://www.mcconnel.com> 2022)

4.2.2 Poloautomatické nářadí tažené traktorem

4.2.2.1 Systémy strojového vidění

Výhody strojového vidění v průmyslových aplikacích také vedly k rozšíření výzkumu v různých zemědělských aplikacích, jako je monitorování řádků plodin (Åstrand & Baerveldt, 2005) a automatické navádění robotickým systémem (Baerveldt & Åstrand, 2002; Pérez-Ruiz et al. 2015; Gonzalez-De Santos a kol. 2017). Proměnné polní faktory jako jsou změny podmínek prostředí, různé velikosti a tvary rostlin a sériově chybějící rostliny však mohou nepříznivě ovlivnit proces upřesnění polohy plevy (Åstrand a Baerveldt, 2005).

Nepříznivé podmínky pro mapování a nevhodné umístění kamery vzhledem k mechanickým ramenům nástroje jsou problémy, které je do budoucna potřeba prozkoumat. Několik autorů, včetně Guyera a kol. (1986) a Reid a Searcy (1988) ve svých studiích popisují důsledky způsobené nevhodnými faktory prostředí nebo technickými problémy. Guyer a kol. (1986) navrhl, aby tato technika byla co nejjednodušší. Vedení stroje se zaměřuje na identifikaci nejzákladnějších struktur na poli, a to řádků plodin. Kombinace strojového vidění s radionavigací může dále zlepšit přesnost plečkování (Tillett, 1991). Značné problémy byly také zjištěny při instalaci kamerového systému na přední část traktoru kvůli velké vzdálenosti od zadního kultivátoru a komplikovanému vedení nářadí z důvodu velkého prodloužení (Billingsley & Schoenfisch, 1995, 1997). Se zvětšující se vzdáleností mezi kamerou a kultivátorem roste i riziko vychýlení.

Dalším problémem strojového vidění na poli je osvětlení a vizuální vzhled plodin nebo plevele. Mohou to být rozdíly v barvě mezi různými plodinami nebo mezi plodinami stejného typu (jako je červené a zelené zelí). Softwarové algoritmy by také měly být schopny rozlišovat mezi různými odstíny stejné barvy (např. zelená), aby mohly doladit výsledky pro identifikaci plodin (Gerrish et al. 1997).

V neposlední řadě je problémem, že při silném slunečním světle vrhají do zorného pole kamery stíny za traktorem. Tomu lze předejít umístěním krytu na kameru kultivátoru, který zabrání negativním účinkům přímého slunečního záření (Slaughter et al. 1999). Přidání umělých zdrojů světla zajistí nepřetržité osvětlení se stejnou intenzitou.

Základní naváděcí systém strojového vidění je zaměřen na rozpoznání řádků plodin. Nejjednodušší způsob, jak změnit zarovnání plečky vůči řádku plodin, je použít hydraulický válec pro boční nastavení k posunutí rámu plečky doleva nebo doprava vůči traktoru. (Slaughter et al. 1999). Jedná se o rychlou a přesnou aplikaci, kterou lze snadno implementovat na širokolisté plodiny, jako je cukrová řepa nebo kukuřice. Problémy však nastávají, když se vzdálenost mezi řádky zmenší. Přesnost by mohla být zlepšena instalací druhé kamery pro sledování další řady plodin.

V následném experimentu s řepou Tillet et al. (2002) vyvinuli systém, který za nepříznivých podmínek s velkými mezerami v řádcích plodin dokáže dobře identifikovat cílenou rostlinu a zlikvidovat ji. Mezery v linii dlouhé 4 m nebyly shledány pro zrakový systém problémem a kontrola pokračovala bez závad. Jejich výsledky ukázaly, že systém vidění zlepšil přesnost a rychlost mechanického odplevelování zrn. Vyvinutý systém byl uveden na veřejný trh a je prodáván jako Garford Robocrop Control System, viz obr. č.: 20.



Obr. č.: 20 „Garford InRow Weeder“ (zdroj: <https://garford.com> 2022)

Wiltshire a kol. (2003) provedli polní pokus s Garfordem Robocropem na cukrové řepě a testovali přesnost vedení řádků. Rám bočního posuvu lze posunout o ± 15 cm doleva nebo doprava, aby bylo zachováno zarovnání s řádkem plodin. Při celkovém pracovním záběru 6 m se odplevelí 12 řádků řepy najednou za konstantí rychlosti 5 km/h. Výsledky jsou slibné

a ukazují, že mechanické odstraňování plevelů je stejně dobré nebo lepší než aplikace plného herbicidu. Cukrová řepa nebyla během testu poškozena a nebyl snížen její výnos. Wiltshire a kol. (2003) také diskutovali o důležitosti tvaru nástroje pro sensorově řízenou mechanickou kontrolu plevelů. Tradiční tvary nástrojů nemusí být vhodné pro vyšší rychlosti kvůli nadměrnému rozhrázení půdy na plodiny.

Kunz a kol. (2015) provedli polní pokusy na cukrové řepě a sóji. Strojová kontrola vidění byla porovnána s kontrolou RTK-GPS, ručním ovládním a konvenční aplikací herbicidu. Pro řádkové zpracování půdy se plečky osazují zahnutými radličkami s možností doplnění o další segmenty. Automatická vedení plečky vede k 87% snížení plevelů v sójových bobech a cukrové řepě. Díky automatickému řízení je možné zvýšit rychlost jízdy ze 4 km/h na 7 km/h až 10 km/h bez negativního ovlivnění porostu. Při kombinaci mechanického ničení plevelů s kamerou ovládanými plečkami zaznamenaly po sobě jdoucí polní pokusy na cukrové řepě a sóji podobné výsledky s 82% snížením plevelů (Kunz et al., 2016).

Počátkem roku 2000 bylo úspěšně zavedeno monitorování řádků plodin. Prototyp Tillette a kol. (2008) vybavil plečkový systém nově navrženým nožem na zpracování půdy. Tyto nože jsou hroty s výřezy ve tvaru půlměsíce, viz obr. č.: 21. Po identifikaci jednotlivých rostlin se tyto segmenty otáčejí kolem svislé osy a zajišťují kontrolu plevelů v řádcích. Výsledky ukázaly až 87% snížení plevelů v řádku. Fennimore a kol. (2014) testovali hydraulicky ovládaný „Garford InRow Weeder“ pro zelí, celer, salát a endivie. Ruční odplevelování a ořez semen salátu zabralo rotačním kultivátorem o 25 % méně času. Hustota plevelů přesazených plodin byla snížena o 85 %. Kultivátory Garford "Robocrop Guided Moty" a "Robocrop InRow Weeder" jsou nyní k dispozici pro různé plodiny.



Obr. č.: 21 Půlměsíkové plečkové segmenty firmy Garford (zdroj: <https://garford.com> 2022)

Další experiment provedli Melander a spol. na komerčním vnitřádkovém okopávacím systému. Výzkum přesazené cibule a zelí ve spolupráci s Robovátorem viz obr. č.: 22 (F. Poulsen Engineering, Dánsko). Robovátor obsahuje systém strojového vidění pro identifikaci jednotlivých rostlin a pár nožů (podobajících se tvaru motyčky) pro každý řádek plodin. Nože se oddálí při setkání s rostlinou a zavře se při průchodu skrz. Plevel je tak v řadě kulturních

roślin mechanicznie usuwane. Plecí segmenty w międzyrzędki lze mĚnit podle potřeb uŹivatele a rŹstovĚ fĚze roŹlin.



Obr. ě.: 22 RobovĚtor (zdroj: <https://www.robovator.com> 2022)

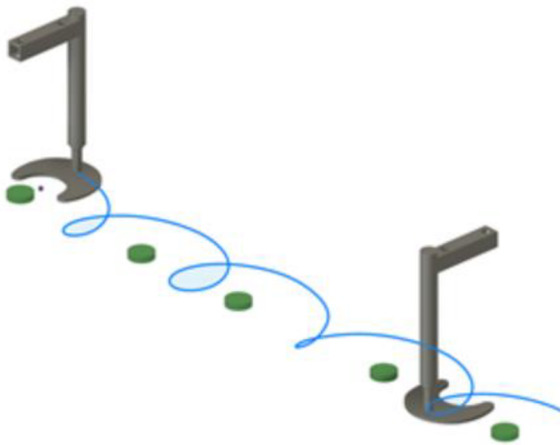
Lati et al. (2016) provĚdĚjĹ vĹzkum s Robovatorem na brokolici pro pŹmĹmĹ vĹsev a pŹesazovĚnĹ salĚtu. PŹi stŹednĹi aŹ vysokĹ hustotĚ plevele zkrĚtĹil Robovator dobu pletĹ o 45 % oprotĹ manuĚlnĹmu pletĹ. Robovatorem se odstranĹ o 18 aŹ 41 % vĹce plevele neŹ se standardnĹmi noŹi na zpracovĚnĹ pŹdĹ. Tyto studie ukazujĹ, Źe chytrĹ vnitroŹĚdkovĹ pleĹky jsou moŹnĹ a pro ekologickĹ farmĚre by bylo rozhodnĹ velmi zajĹmavĹ snĹiŹenĹ pracovnĹ doby, kterĹ trĚvĹ rućnĹm pletĹm.

4.2.2.2 SenzorovĹ systĚmy GNSS

GlobĚlnĹ navigaćnĹ družicovĹ systĚm (GNSS) je navigaćnĹ systĚm, kterĹ vyuŹivĹ signĚly z vesmĹrnĹch družic k pŹenosu ŹdajŹ o poloze a ćase do pŹijĹmaćŹ GNSS (European GNSS Agency, 2014). V současnosti existujĹ ćtyŹi globĚlnĹ systĚmy GPS (USA), GLONASS (Rusko), Galileo (EU) a BeiDou (ćĹna). MĚ mnoho aplikacĹ v mnoha oblastech vĹzkumu, jako je pŹesnĹ zemĚdĚlstvĹ, kde poskytuje georeferenćnĹ Źdaje o pŹdĚ a vĹnosu a takĹ umoŹŹuje rŹznĹ dĚvky herbicidŹ (Auernhammer a Muhr, 1991; Tyler a kol, 1993; Borgelt a kol. 1996) NicmĚnĚ, jak poukĚzali Hiremath et al. (2013), samotnĹ GNSS nemusĹ bĹt pro nĚkterĹ Źkoly dostatećnĹ pŹesnĹ a navigace mŹŹe selhat, pokud je signĚl pŹeruŹen. K pŹekonĚnĹ problĚmŹ s pŹesnostĹ vyŹaduje pŹesnĹ zemĚdĚlstvĹ pouŹitĹ pŹesnĚjŹich metod, obvykle technologie RTK-GPS, kterĹ vyuŹivĹ mĹstnĹ referenćnĹ stanici (jako je farma) k opravĚ a zpŹesnĚnĹ signĚlŹ pŹijĹmanĹch ze satelitŹ a poskytuje tak pŹesnost menŹi neŹ centimetr (Keicher a Seufert, 2000; Zhang, Wang, 2002).

Rasmussen a kol. (2012) zkoumali moŹnost mechanickĚho nićenĹ plevelŹ cukrovĹ řepy s georeferenćovanĹmi povrchy. Źpićka cykloidnĹ pleĹky je vedena pomocĹ RTK-GPS ve vztahu

k předem zaznamenané poloze řepy viz obr. č.: 23. Cykloidní plečky vedené pomocí RTK-GPS nedosahovaly výrazně odlišných výsledků při setí plevelu ve srovnání s mechanickými plečkami bez GNSS vedení. Celkové poškození porostů je navíc vysoké. Perez-Ruiz a kol. (2012) Mechanická kontrola plevelu geograficky reportujících rajčat. Na rozdíl od Rasmussen et al. (2012) použili k hubení plevelu dva nože za sebou místo otáčení nástroje. Když se objeví umístění georeferencovaných rostlin rajčat, řezačka se otevírá a zavírá mezi plodinami, obdělává půdu a ponechává bezpečnou zónu kolem každé plodiny. Koncepce hubení plevelu je tedy podobná jako u Robovatoru (F. Poulsen Engineering, Dánsko), až na to, že se nepoužívá strojové vidění. Žádná z rostlin rajčat nebyla poškozena, ale studie nezkoumala důležité parametry ochrany rostlin, jako je účinnost hubení plevelu, protože rostliny plevelu nebyly zahrnuty do hodnocení. Vzhledem ke své vysoké přesnosti by to mohla být slibná metoda pro online odstraňování plevelu.



Obr. č.: 23 Schéma vedení cykloidního pracovního segmentu plečky (zdroj:

<https://www.ingenia.org.uk> 2022)

Nová technologie výsevu GNSS také umožňuje různé strategie mechanické regulace plevelu. Byly učiněny komerční pokusy georeferencovat umístění jednotlivých semen plodin během setí. Například systém GeoSeed společnosti Kverneland (2020) se zaměřuje na setí plodin se stejnými vzdálenostmi mezi rostlinami. To umožňuje okopávání kolmo k řadě plodin. Plení v různých směrech může narušit plevel všemi možnými způsoby. Někdy se plevel při okopávání ohne jedním směrem, pokud není účinně zničen. Provedení druhé plečky kolmo k první hubí plevel, který mohl přežít první pletí (Langsenkamp et al. 2014).

4.2.2.3 Laserové a ultrazvukové senzorové systémy

Ultrazvukové senzory a senzory LiDAR (Light Detection and Ranging) viz obr. č.: 24, známé také jako „senzory vzdálenosti“, se často používají v kombinaci s jinými senzory k navigaci vozidel (např. robotů) v terénu. Ultrazvukové senzory mohou měřit vzdálenost od senzoru

k rostlině na základě zvukových vln, zatímco senzory LiDAR měří fázový rozdíl (Andújar et al. 2012).



Obr. č.: 24 Znárodnění umístění senzorů LiDAR na rampě postřikovače spolu s kombinací s navigací stroje (zdroj: <https://www.mdpi.com> 2022)

Kromě toho jsou senzory LiDAR přesnější než ultrazvukové senzory díky vyšším frekvencím měření (Fernández-Quintanilla et al. 2018). Detekce rostlin LiDAR je založena na skutečnosti, že chlorofyl odráží blízké infračervené světlo (NIR), takže zelená barva vegetace může způsobit vysoké odrazy při použití senzorů LiDAR. Jejich hlavním využitím je stanovení množství potřebného množství fungicidu nebo hnojiva na základě objemu olistění (Colaço et al. 2018). Další použití systémů založených na laserových senzorech může zahrnovat řízení hloubky půdy pomocí zemědělských nástrojů viz obr. č.: 25, jako je mechanické plení, aby se zajistila konzistentní pracovní hloubka (van der Linden et al. 2008). Reiser a kol. (2018) úspěšně použili laserový skener k ovládnání robota mezi řádky kukuřice během raných fází růstu (krčky prvního, druhého a třetího listu). Další studie detekce a klasifikace plevelů na poli byly také úspěšně provedeny pomocí systémů LiDAR (Andújar et al. 2013). Stejně tak lze ultrazvukové senzory použít k detekci oblastí orné půdy s vysokým zaplevelením (Andújar et al. 2012).



Obr. č.: 25 LiDAR senzor v kombinaci s naváděcí kamerou na řádek (zdroj: <https://www.bednar.com> 2022)

Cordill a Grift (2011) vyvinuli laserem naváděný nástroj pro charakterizaci kukuřičného stonku. Autoři předpokládali, že jedinečná geometrie kukuřičných stonků byla dostatečná k

rozlišení mezi kukuřicí, širokolistými plevely a plevely trav. Proto se plevel odstraňuje nesespecifickým způsobem mechanickými nástroji, které ošetřují celé okolí rostliny kukuřice. Pokaždé, když stéblo kukuřice přeruší laserový signál, zaznamená se jeho poloha a informace se předá ramennímu nástroji. Nebyla však poskytnuta žádná data o kontrole plevele, protože kovový hrot nástroje nepronikl do půdy. Bez ohledu na to vedlo použití laserem naváděných systémů v oblastech se širokými listy a plevellem ke smrtelným zraněním 23,7 % rostlin. Naproti tomu, když byla oblast bez plevele, utrpělo smrtelné poškození pouze 8,8 procenta rostlin kukuřice. Systém pravděpodobně potřebuje další vylepšení, aby se minimalizovaly ztráty na úrodě.

Rueda-Ayala a spol. (2015) použili ultrazvukové senzory v experimentu na ochranu kukuřice. Změnou úhlu radliček lze na poli dosáhnout různé intenzity práce. Strmé úhly mají za následek vysokou (agresivní) intenzitu, zatímco nastavení menšího sklonu má menší dopad na rostliny a plevel. Cílem jejich studie bylo upravit úhel radliček podle výskytu plevelů tak, aby nedocházelo k mechanickému namáhání plodin bez nutnosti hubení plevele. Pomocí ultrazvukového senzoru umístěného na přední části traktoru se provádí online detekce plevele a seřízení radliček v reálném čase. Oblasti s vysokou hustotou rostlin jsou považovány za vysoce zaplevelené, a proto vyžadují agresivní ochranu. Nižší hodnoty hustoty v konečném důsledku vedou k šetrnějšímu zpracování. Autoři zaznamenali průměrnou účinnost hubení plevele 51 %. Systém je navržen jako on-line systém pro nastavení bran, ale stále vyžaduje kalibraci systému v aktuální fázi plodiny.

5 Závěr

Na základě literatury vyplývá, že manuální mapování je časově náročné, a proto je tato metoda na velkých plochách, či silně zaplevelených pozemcích neúčinná a ekonomicky nerentabilní. Proto je její využití výhodné především na slabě zaplevelených pozemcích za předpokladu dodržení daných pravidel pro manuální mapování. Těmi je odpovídající hustota vzorkované sítě, dostatečná velikost vzorku na jednotlivém bodu sítě a v neposlední řadě uspořádání dílčích vzorků.

Využívání pozemní sensorové techniky bude do budoucna jistě sílit, protože tyto technologie jsou schopné rychle analyzovat digitální obraz a pomocí algoritmů správně odlišit plevel od pěstované rostliny. Některé systémy jsou natolik vyspělé, že jsou schopny rozeznat i druh plevele a následně vytvořit mapu jeho výskytu. To se však odráží na větší náročnosti použití a vyšších pořizovacích nákladech.

Metody dálkového průzkumu jsou v dnešní době často využívány díky bezpilotním letounům, které jsou schopny zmapovat pozemek s velkou přesností v krátkém čase a za nízké náklady. Díky těmto vytvořeným mapám pak máme přesná data pro další operace.

Princip variabilní aplikace herbicidů je v současnosti zaváděn do praxe, a to právě díky zdokonalenému mapování. Pokud máme k dispozici přesná data, můžeme za pomoci variabilní či cílené aplikace ušetřit na používaných herbicidních přípravcích. To má také pozitivní vliv na životní prostředí, vodní toky, organismy v přírodě a vytváření rezistence rostlin na účinné látky herbicidů.

V neposlední řadě nesmí být opomenuta ani mechanickou regulaci plevele. Ta by měla být přinejmenším doplňkem chemické ochrany. V dnešní době se technologie odstraňování plevele natolik zdokonalila, že dochází pouze k malým škodám na kulturních rostlinách, a to díky strojovému vidění, GNSS, senzorům (LiDAR, ...), laserovým a ultrazvukovým senzorům a podobně. Tento druh regulace se také rozvíjí díky vývoji nových segmentů k odstraňování plevele, které zdokonalují kvalitu procesu.

Trendem regulace plevele je také snaha o jeho robotizaci. U té se však zatím objevuje několik zásadních problémů, jako jsou překážky v prostoru, svahovitost pozemků nebo rychlost provádění operací.

Metody mechanické regulace s využitím sensorové techniky jsou velmi přínosné zejména pro ekologické pěstitele, kteří jsou díky těmto systémům schopni, snadněji a bez poškození rostlin, regulovat plevel v jejich porostech.

6 Literatura

- Andújar D, Escolí A, Rosell-Polo JR, Fernández-Quintanilla C, Dorado J. 2013. Comput: Potential of a terrestrial LiDAR-based system to characterise weed vegetation in maize crops. *Electron. Agric.* **92**:11–15.
- Andújar D, Weis M, Gerhards R. 2012. Sensors: An ultrasonic system for weed detection in cereal crops . **12**(12):17343–17357. Switzerland.
- Anglund EA, Ayers PD. 2000. Agriculture: Field evaluation of response times for a variable rate (pressure-based and injection) liquid chemical applicator **19**(3):273-282.
- Ascard J, Bellinder RRB. 1996. Mechanical in-row cultivation in row crops. *Second Int. Weed Control Congr.* **1993**: 1121–1126. Copenhagen
- Auernhammer H, Muhr T/ American Society of Agricultural Engineers 1991. 'GPS in a basic rule for environmental protection in agriculture'. Dostupný na: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9325817>
- Baerveldt A, Åstrand B. 2002. Autonom Robots: An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control **13**:21–35.
- Baijin Qiu Run Yan, Ma Jing. 2015. *Journal of agricultural machinery: Research Progress Analysis of Variable Rate Sprayer Technology* **46**(3):59-72.
- Bakker T, Van Asselt K, Bontsema J, Müller J, Van Straten G. 2010. Autonom Robots: A path following algorithm for mobile robots **29** (1):85–97.
- Bawden O, Kulk J, Russell R, McCool C, English A, Dayoub F, Lehnert C, Perez T. 2017. Field Rob: Robot for weed species plant-specific management. **34**(6):1179–1199.
- Bechar A, Vigneault C, 2017. *Biosyst. Eng: Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems.* **153**:110–128.
- Billingsley J, Schoenfisch M. 1995. *Autonomous Robots: Vision-guidance of agricultural vehicles.* Kluwer Academic Publishers. **2**(1):65–76.
- Billingsley, J, Schoenfisch M. 1997. *Comput Electron Agric.: The successful development of a vision guidance system for agriculture.***16**(2): 147–163.
- Bond W, Burston S, Bevan JR, Lennartsson ME. 1998. *Biol. Agric Hortic: Optimum weed removal timing in drilled salad onions and transplanted bulb onions grown in organic and conventional systems.* **16**(2):191–201.
- Borgelt SC, Harrison JD, Sudduth KA, Birrell SJ. 1996. *Appl. Eng. Agric.: Evaluation of GPS for applications in precision agriculture.* **12**(6):633–638.
- Bowman G, Outreach S. 2002. *Steel in the field: Sustainable Agriculture Network handbook series a farmer's guide to weed management tools.* (USA).
- Brandsaeter LO, Mangerud K, Rasmussen J. 2012 *Weed Res.: Interactions between pre – and postemergence weed harrowing in spring cereals.* **52**(4):338–347.
- Brant V, Kroulík M. (n.d.). Implementace principů precizního zemědělství do rostlinné výroby. <http://www.eagri.cz/prv>

- Bui Q, VariTarget. 2005. ASAE Meeting: A new nozzle with variable flow rate and droplet optimization. Paper: 051125.
- Busi R, Vila-Aiub MM, Beckie HJ, Gaines TA, Goggin DE, Kaundun SS, Lacoste M, Neve P, Nissen SJ, Norsworthy JK, Renton M, Shaner DL, Tranel PJ, Wright T, Yu Q, Powles SB. 2013. Herbicide-resistant weeds: From research and knowledge to future needs', Evolutionary Applications. John Wiley & Sons Ltd. **6**(8): 1218–1221.
- Camp CR, Sadler EJ, Evans DE. 2000. Transactions of the ASAE: Using variable rate, digitally controlled metering device. **16**(1):39-44.
- Carré – Made for Agriculture. 2020. Dostupný na: <http://www.carre.fr/en/crop-maintenance/weeding-robot/61-anatis.html>
- Cioni F, Maines G. 2010. Sugar Tech: Weed Control in Sugarbeet. **12**(4): 243–255.
- Colaço AF, Molin JP, Rosell-Polo JR, Escolá A. 2018. Hortic. Res.: Application of light detection and ranging and ultrasonic sensors to high-throughput phenotyping and precision horticulture: Current status and challenges. **5**(1).
- Conesa-Muñoz J, Gonzalez-de-Soto M, Gonzalez-de-Santos P, Ribeiro A. 2015. Sensors: Distributed multi-level supervision to effectively monitor the operations of a fleet of autonomous vehicles in agricultural tasks. **15** (3): 5402–5428. Switzerland
- Cordill C, Grift TE. 2011. Biosyst. Eng: Design and testing of an intra-row mechanical Weeding machine for corn. **110** (3):247–252.
- Day, W. 2011. Agric. Sci.: Engineering advances for input reduction and systems management to meet the challenges of global food and farming futures **149**(1):55–61.
- De Buck AJ, Schoorlemmer HB, Wossink GAA, Janssens SRM. 1999. Agric. Syst.: Risks of post-emergence Weed control strategies IN Sugar beet: Development and application of a bio-economic model **59**(3):283–299.
- Draycott APOD. 2008. Development of sugar beet, Sugar beet. Blackwell Publishing Ltd. Oxford, UK.
- Duke SO. 2012. Pest Manag. Sci.: Why have no new herbicide modes of action appeared in recent years? 505–512.
- Ehsani MR, Upadhyaya SK, Mattson ML. 2004. Am. Soc. Agric. Biol. Eng.: 'Seed location mapping using RTK GPS'. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. **47**(3):909–914.
- Emmi L, Gonzalez-De-Soto M, Pajares G, Gonzalez-De-Santos P. 2014. Sci. World J.: 'New trends in robotics for agriculture: Integration and assessment of a real fleet of robots'.
- Evropská komise, Ochrana rostlin v zemědělství EU, (2022) Dostupný na: https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/sustainability/environmental-sustainability/low-input-farming/pesticides_cs
- FARMWISE LABS, INC. FarmWise [online]. c2022 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://farmwise.io/>
- Fennimore SA, Smith RF, Tourte L, LeStrange M, Rachuy JS. 2014. Weed Technol: Evaluation and economics of a rotating cultivator in bok choy, celery, lettuce, and radicchio. **28**(1):176–188.

- Findlay S, Carreiro M, Kruschik V, Jones CG. 1996. *Ecol. Appl: Effects of damage to living plants on leaf litter quality.* **6** (1):269–275.
- Funseth TG, Mercer DS, Humpal RA. 2013. S 20130161413 *Sprayer pulsing nozzle flow control using rotational step positions.*
- Gerhards R, Sokefeld M, Timmermann Cetal. 2002, *Precision Agriculture: Sitespecific weed control in maize, sugar beet, winter wheat and winter barely.* **3**(1):25-35.
- Gerhards R, Gutjahr C, Weis M, Keller M, Sökefeld M, Möhring J, Piepho HP. 2012. *Weed Research: Using precision farming technology to quantify yield effects attributed to weed competition and herbicide application,* **52**:6–15.
- Gerhards R, Wyse-Pester DY, Mortensen D, Johnson GA. 1997. *Weed Science: Characterizing spatial stability of weed populations using interpolated maps.* **45**:108-119
- Gerhards R, Oebel H. 2006. *Weed Research: Practical experiences with a system for site-specific weed control in arable crops using real-time image analysis and GPS-controlled patch spraying.* **46**:85–193.
- Gerhards R, Sökefeld M, Kühbauch W. 1998. *PflKrankh. PflSchutz: Einsatz der digitalen Bildverarbeitung beider teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle.* **16**:273-278
- Gerhards R, Sökefeld M, Timmermann C, Krohmann P, Kühbauch W. 2000. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz: Precision Weed Control – more than just saving herbicides.* **17**:179–186.
- Gerrish JB, Fehr BW, Van Ee GR, Welch DP. 1997. *Appl. Eng. Agric.: Self-steering tractor guided by computer-vision* **13**(5):559–563.
- Giles DK, Ben-Salem E. 1992. *Journal of Agricultural Engineering: ResearchSpray droplet velocity and energy in intermittent flow from hydraulic nozzles* **51**(12):101-112.
- Gobor Z. (2013) *KI – Künstliche Intelligenz: Mechatronic System for Mechanical Weed Control of the Intra-row Area in Row Crops* **27**(4):379–383.
- Griepentrog HW, Norremark M, Nielsen H, Blackmore BS. 2005. *Precis. Agric.: Seed mapping of sugar beet* 157–165.
- Gunsolus JL. 1990. *Altern. Agric.: Mechanical and cultural weed control in corn and soybeans* **5**(3):114–119.
- Guyer DE, Miles GE, Schreiber MM, Mitchell OR, Vanderbilt VC. 1986. *Trans. ASAE: Machine vision and image processing for plant identification.* **29**(6):1500–1507.
- Hamouz P. 2005. *Optimalizace ochrany proti plevelům v závislosti na nerovnoměrnosti jejich výskytu na pozemku. [Disertační práce] ČZU Praha.*
- Hamouz P, Hamouzová K, Holec J, Tyšer L. 2013. *Soil and Environment: Impact of site-specific weed management on herbicide savings and winter wheat yield.* *Plant* **59**:101–107.
- Hamouz P, Soukup J, Holec J, Nováková K. 2004. *Pflkrank. und Pflsch: Field-scale variability of weed distribution on arable land.* **19**:445–452.
- Hamouz P. 2014. *Metody regulace zaplevelení pro precizní zemědělství: certifikovaná metodika. Česká zemědělská univerzita. Praha*
- Heap IM. (2020) *The International Survey of Herbicide Resistant Weeds.* Online. Internet. Dostupné: www.weedscience.org (Accessed: 4 July 2020).

- Hiremath SA, Stein A, ter Braak CJF, van der Heijden GWAM, van Evert FK. 2013. *Comput. Electron. Agric.*: Laser range finder model for autonomous navigation of a robot in a maize field using a particle filter **100**:41–50
- Home MCW, Tillett ND, Hague T, Godwin RJ. 2002. An experimental study of lateral positional accuracy achieved during inter-row cultivation', in *Proceedings of the 5th EWRS Workshop on Physical and Cultural Weed Control. studi universitari e di perfezionamento. Pisa, Italy*
- Hongjin C, Guang M, Shufang M. 2005. *Agriculture&Technology: Supporting Technology and Prospects of Application on Precision Agriculture* **25**(5):54-61.
- Chen L, Kaewkorn S, He L, Zhang Q, Karkee M. 2016. *IFAC-PapersOnLine: Design and Evaluation of a Levelling System for a Weeding Robot.* **49**(16):299–304.
- Jacobi J, Backes M, Kühbauch M, Plümer L. 2006. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz: Identifikation von Unkräutern in Zuckerrüben anhand spektraler Reflektionsunterschiede in Fernerkundungsaufnahmen* **20**:241–248,
- Jiabing G. 2012. *Atomization and air droplet flow field of an Air assisted variable rate sprayer. Nanjing agricultural university. Nanking*
- Jilin W. 2012 *Study on spray characteristics and control systém of variable spray device. jiaotong university. Shanghai*
- King B A, Kincaid DC. 1996. *ASAE Annual International Meeting: Variable flow sprinkler for site-specific water and nutrient management*
- Knezevic SZ, Evans SP, Blankenship EE, Van Acker RC, Lindquist JL. 2002. *Weed Sci.: Critical period for weed control: the concept and data analysis.* **50**(6):773–786.
- Kolb LN, Gallandt ER. 2012. *Org. Agric.: Weed management in organic cereals: Advances and opportunities* 23–42.
- Kunisch M. 2002. *PfIKrankh PflSchutz: Precision Farming in der Unkrautbekämpfung? , Sonderh. XVIII, 415-420*
- Kunz C, Weber J, Gerhards R. 2015. *Agronomy: Benefits of precision farming technologies for mechanical weed control in soybean and sugar beet – Comparison of precision hoeing with conventional mechanical weed control* **5**(2):130–142.
- Kunz C, Weber J. 2016. *Julius-Kühn-Archiv: Comparison of different mechanical weed control strategies in sugar beets* 446-452.
- Kunz C, Weber JF, Peteinatos GG, Sökefeld M, Gerhards R. 2018. *Precis. Agric: Camera steered mechanical weed control in sugar beet, maize and soybean* **19**(4):708–720.
- KVERNELAND GROUP. *Kverneland [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://uk.kverneland.com/>*
- Lamb DW, Weedon MM, Rew LJ. 1999. *Weed Research. Evaluating the accuracy of mapping weeds in seedling crops using airborne digital imaging: Avena spp. in seedling triticale* **39**:481–492.
- Langsenkamp F, Sellmann F, Kohlbrecher M, Kielhorn A, Strothmann W, Michaels A, Ruckelshausen A, Trautz D. 2014. *Weed Control. Agric.: Tube Stamp for mechanical intra-row individual Plant* 1–11.

- Lass LW, Callihan R H. 1997. Weed Technology. The effect of phenological stage on detectability of yellow starthistle (*Hieracium pratense*) and oxeye daisy (*Chrysanthemum leucanthemum*) with remote multispectral digital imagery **11**:248–256.
- Lass LW, Prather TS., Glenn NF, Weber KT, Mundt JT, Pettingill J. 2005. Weed Science. A review of remote sensing of invasive weeds and example of the early detection of spotted knapweed (*Centaurea maculosa*) and babysbreath (*Gypsophila paniculata*) with a hyperspectral sensor **53**:242–251.
- Lati RN, Siemens MC, Rachuy JS, Fennimore SA. 2016. Weed Technol. Intra-row weed removal in broccoli and transplanted lettuce with an intelligent cultivator **30(3)**:655–663.
- Liu H, Zhu H, Shen Y. 2014. Transactions of the ASABE. Development of digital flow control system for copy multi-channel variable-rate sprayers **57(1)**:273–281.
- Llorens J, Gil E, Llop J Ultrasonic. 2007. Lidar sensors for electronic canopy characterization in vineyards. Advances to improve pesticide application methods **11(2)**:2177–2194.
- Lötjönen T, Mikkola H. 2000. Agric. Food Sci. Three mechanical weed control techniques in spring cereals **9(4)**:269–278. Finland
- Melander B, Hartvig P. 1997. Crop Prot. Yield responses of weed-free seeded onions [*Allium cepa* (L.)] to hoeing close to the row **16(7)**: 687–691.
- Melander B, Rasmussen IA, Bírberi P. 2005. Weed Sci. Integrating physical and cultural methods of weed control – examples from European research **53(3)**:369–381. Cambridge University Press (CUP).
- Melander B, Rasmussen IA, Bírberi P. 2006. Weed Sci. Integrating physical and cultural methods of weed control – Examples from European research **53(3)**:369–381.
- FMoltó E, Martén B, Gutiérrez A 2001. Journal of Agricultural Engineering Research. PM-power and machinery: pesticide loss reduction by auto matic adaptation of spraying on globular trees **78(1)**:35–41.
- NAÏO TECHNOLOGIES. 2019. Autonomous weeding, agricultural robots. Online. 2022-03-05.
- Needham DL, Holtz AJ, Giles DK. 2012. Transactions of the ASABE. Actuator system for individual nozzle control of flow rate and spray droplet size **55(2)**: 379–386.
- Nof, SY. 2009. Springer handbook of automation. Noguchi N, Will J, Reid J, Zhang. 2004. Comput. Electron. Agric.: Development of a master-slave robot system for farm operations **44(1)**:1–19. Springer Berlin Heidelberg.
- Nerremark M, Griepentrog HW, Nielsen J, Seggaard HT. 2008. Biosyst. The development and assessment of the accuracy of an autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops **101(4)**: 396–410. Eng.
- Nerremark M, Griepentrog HW, Nielsen J, Seggaard, HT. 2012. Precis. Agric. Evaluation of an autonomous GPS-based system for intra-row weed control by assessing the tilled area. **13(2)**:149–162.
- Oriade C, Forcella F, J. Crop Prod. 1999. Maximizing efficacy and economics of mechanical weed control in row crops through forecasts of weed emergence **2(1)**:189–205.

- Pérez-Ruiz M, Upadhyaya S. 2012. InTech. 'GNSS in Precision Agricultural Operations', in New Approach of Indoor and Outdoor Localization Systems.
- Pfeifer N, Gorte B, Winterhalder D. 2004. ISP RS Congress: Proceedings of Commission Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data 114-119.
- Philipp I, Rath T, Nordmeyer H. 2002. Sonderheft. Computerbildanalytische Unkrautkartierung in Zuckerrübenbeständen. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz **18**:429–436.
- Platform PUMAgri. 2020. Sitia – Bancs d'Essais et Innovation Robotique. 2020. Dostupný na: <http://www.sitia.fr/en/solution-innovation-en/systems-innovative/platform-pumagri/> (Duben, 2022)
- Rasmussen IA. 2004. Weed Res. The effect of sowing date, stale seedbed, row width and mechanical weed control on weeds and yields of organic winter wheat **44(1)**:12–20.
- Reid JF, Searcy SW. 1988. Trans. ASAE. An algorithm for separating guidance information from row crop images **31(6)**: 1624–1632.
- Reiser D, Vázquez-Arellano M, Paraforos DS, Marrido-Izard M, Griepentrog HW. 2018. Comput. Iterative individual plant clustering in maize with assembled 2D LiDAR data **99**:42–52. Ind.
- Rew LJ, Alston CL, Harden S, Felton WL. 2000. Australian Journal of Experimental Agriculture. Counts versus categories: choosing the more appropriate weed scoring method **40**:1121–1129.
- Riemens MM, Van Der Weide RY, Bleeker PO, Lotz LAP. 2007. Weed Res. Effect of stale seedbed preparations and subsequent weed control in lettuce (cv. Iceboll) on weed densities. Dostupný na: <https://doi.org/10.1111/wre.2007.47.issue-210.1111/j.1365-3180.2007.00554.x>. (Duben 2022)
- Robozero Weeding Robot. 2020. Dostupný na: <http://en.energreen.it/robo-remote-controlled-machines/robozero-remote-controlled-wheeled-cutting-machines/> (Duben 2022)
- Rueda-Ayala V, Peteinatos G, Gerhards R, Andújar D. 2015. Sensors. A non-chemical system for online weed control **15(4)**:7691–7707.
- Scotford IM, Miller PCH. 2005. Applications of spectral reflectance techniques in Northern European cereal production: A Review. - Biosystems Engineering, 90: 235–25.
- Slaughter, D., Giles, D. (2008) D.D.-C. In electronics and 2008, U. Autonomous robotic weed control systems: A review. Comput. Electron. Agric. 61 (1), 63–78.
- Scotford IM, Miller PCH. 2005. Biosystems Engineering: Applications of spectral reflectance techniques in Northern European cereal production **90**:235–25.
- Slaughter, D., Giles, D. (2008). Comput. Electron. Agric.: Autonomous robotic weed control systems **61(1)**:63–78.
- Slaughter D, Chen P. 1999. Precis. Agric.: Vision Guided Precision Cultivation **1(2)**:199–216.
- Sökefeld M. 1997. Automatische Erkennung von Unkrautarten im Keimblattstadium mit digitaler Bildverarbeitung. [Dissertation]Univ. Bonn.

- Sökefeld M, Gerhards R, Kühbauch W. 2000. Teilschlagspezifische Unkrautkontrolle – von der Unkrauterfassung bis zur Herbizidapplikation: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz **17**:227–233.
- Stark JC, McCann IR, King BA. 1993. Agronomy Abstracts: A two dimensional irrigation control system for sitespecific application of water ad chemicals **85**:329.
- Stone ML, Giles DK, Dieball KJ. 1999. The 2nd European Conference on Precision Agriculture, Odense, Denmark: Distributed network system for control of spray droplet size and application rate for precision chemical application 857-866.
- Tian L. 2002. Computer and Electronics in Agriculture: Development of a sensor based precision herbicide application system **36**(2):133-149.
- Tillett N, Hague T. 2002. Comput. Electron. Agric: Inter-row vision guidance for mechanical weed control in sugar beet **33**(3):163–177.
- Tillett N, Research THJ. 1999. Agric. Eng. Res: Computer-vision-based hoe guidance for cereals **74**(3):225–236.
- Tillett ND. 1991 Agric. Eng. Res: Automatic guidance sensors for agricultural field machines **50**:167–187.
- To ru, To rill. 2000. Computer and Electronics in Agriculture: Research in autonomous agriculture vehicles in Japan **25**:133-153.
- Tompkins FD, Howard KD, Mote CR. 1990. Trans of the ASAE: Boom flow characteristics with direct chemical injection **33**(3):737-743.
- Tumbo SD, Salyani M, Whitney JD. 2002. Applied Engineering in Agriculture Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy **18**(3):367-372.
- Tyler DA, Robert PC, Rust RH, Larson WE. 1993. American Society of Agronomy: Positioning Technology (GPS) in Proceedings of Soil Specific Crop Management **23**:159–165
- van der Linden S, Mouazen AM, Anthonis J, Ramon H, Saeys W. 2008. Biosyst. Eng: Infrared laser sensor for depth measurement to improve depth control in intra-row mechanical Weeding **100**(3):309–320.
- Van Der Weide RY, Bleeker PO, Achten VTJM, Lotz LAP, Fogelberg F, Melander B. 2008. Weed Res: Innovation in mechanical weed control in crop rows **48**(3):215–224.
- van Evert FK, Samsom J, Polder G, Vijn M, Van Dooren HJ, Lamaker A, Van Der Heijden GWAM, Kempenaar C, Van Der Zalm T, Lotz LAP. 2011. Field Rob: A robot to detect and control broad-leaved dock (*Rumex obtusifolius* L.) in grassland **28**(2):264–277.
- van Henten EJ, van Dijk G, Kuypers MC, van Tuijl BAJ, van Willigenburg LG. 2017. IFAC Proc: Motion planning for a cucumber picking robot **33** (19):39–44.
- Vangessel MJ, Schweizer EE, Wilson RG, Wiles LJ, Westra P. 1998. Weed Technol: Impact of timing and frequency of in-row cultivation for weed control in dry bean (*Phaseolus vulgaris*) **12** (3):548–553.
- Walker T, Bansal RK. 1999. Annual International Meeting: Development and characterization of variable orifice nozzles for spraying agrochemicals **35**:1-9.

- Wallinga J, Groeneveld RMW, Lotz LAP. 1998. Weed Research: Measures that describe weed spatial patterns at different levels of resolution, and their applications for patch spraying of weeds. **38**:351-359
- Wartenberg G, Dammer KH. 2002. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft: Erfahrungen bei der Verfahrensentwicklung zur teilflächenspezifischen Herbizidanwendung in Echtzeit. **18**: 443–450.
- Wei D. 2007. Conference Series Earth and Environmental Science: Application of variable spray technology in agriculture **186**(5): 189-193
- Wei D, Weiming D, Xiongkui H. 2009. Journal of China Agricultural University: Technologies and evaluation methodology of variable spray **14**(3) 94-102.
- Wei L, Xiaochan W, Weimin D. 2012. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering: Design and characteristics analysis of variable spraying control system for knapsack sprayer **28**(9):16-21.
- Welsh JP, Bulson HAJ, Stopes CE, Froud-Williams RJ, Murdoch AJ. 1999. Annals of Applied Biology. Assoc. Appl. Biol.: The critical weed-free period in organically-grown winter wheat', **134** (3):315–320.
- Wiltshire JJJ, Tillett ND, Hague T. 2003. Weed Res: Agronomic evaluation of precise mechanical hoeing and chemical weed control in sugar beet. **43** (4):236–244.
- Xiangyue Y, Chundu W, Chu J. 2004. Journal of Anhui Technical Teachers College: Develop of Orchard Automatic Target Sprayer-Research on Technology of Target Spraying **18**(1) 49-52.
- Xinhua W, Shan J, Hongwei S. 2012 Journal of agricultural machinery: Design and Test of Variable Rate Application Controller of Intermittent Spray Based on PWM **43**(12):87-129.
- Yan S, Qi L, Fu Z. 2004. Transactions of the CSAE: Model development and simulation of variable rate of pressure spray **20**(5):118-121.
- Yang CC, Prasher S, Landrya JA. 2003. Agricultural Systems: Development of a herbicide application map using artificial neural networks and fuzzy logic **76**:561-574.
- Yufeng G, Hongping Z, Jiaqiang Z. 2005. Journal of agricultural machinery: Indoor Pesticide Smart Spraying System Based on Machine Vision **36**:86-89.
- Zetian F, Lijun Q, Wang J. 2007. Journal of agricultural machinery: Developmental Tendency and Strategies of Precision Pesticide Application Techniques **38**:189–192.
- Zeyi W, Xiongkui H, Jian X. 2007. Journal of An hui Agri.Sci: Application of variable spray technology in agriculture. **186**(5):7017-7018.
- Zhizhuang L, Hanhong X, Tiansheng Hong. 2009. Journal of agricultural machinery: Technology of Variable-rate Spraying System of Online Mixing Pesticide **40**:93–129.

7 Seznam použitých zkratk a symbolů

NIR – Infračervené záření

CCD – Nábojově vázaná zařízení (Charge-coupled device)

GIS – Geografický informační systém

GPS – globální polohový systém (Global Positioning System)

DSS – Systémy na podporu rozhodování (Decision Support Systems)

PWM – pulzně šířková modulace

LiDAR – světelná detekce a měření rozsahu (Light Detection and Ranging)

GNSS – globální navigační satelitní systém

RTK-GPS – globální systém určování polohy v reálném čase (real time kinematics – global positioning systém)