

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroekologie a rostlinné produkce

**Optimalizace regulace plevelů v porostech zeleniny se zaměřením na nutriční kvalitu
a omezení reziduí herbicidů ve sklizených produktech**

.....
doktorská disertační práce

Autor: **Ing. Jaroslav Šuk**

Školitel: **doc. Ing. Miroslav Jursík Ph.D.**

Praha 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou disertační práci na téma „Optimalizace regulace plevelů v porostech zeleniny se zaměřením na nutriční kvalitu a omezení reziduí herbicidů ve sklizených produktech“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího disertační 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 disertační práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne:

.....

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval mému vedoucímu disertační práce – doc. Ing. Miroslavovi Jursíkovi Ph.D. za velkou podporu, ochotu a neuvěřitelnou trpělivost. Dále děkuji Ing. Ludkovi Procházkovi za pomoc s realizací polních pokusů a Ing. Kateřině Hamouzové Ph.D. za pomoc s realizací statistiky.

V neposlední řadě děkuji také rodičům a manželce za podporu při studiích a synovi, který měl snahu mi s prací neustále pomáhat.

Ing. Jaroslav Šuk

Obsah

1. Úvod	5
2. Literární přehled.....	6
2.1. Plevelle a možnosti jejich regulace	6
2.1.1. Plevelné spektrum v zelenině.....	8
2.1.1.1. Plevelné spektrum v salátu.....	8
2.1.1.2. Plevelné spektrum košťálové zeleniny.....	9
2.1.1.3. Plevelné spektrum v mrkvi.....	11
2.1.1.4. Plevelné spektrum v cibuli	11
2.1.2. Způsoby použití herbicidů v zelenině	13
2.1.2.1. Preemergentní aplikace a aplikace před výsadbou plodiny.....	13
2.1.2.2. Aplikace postemergentní.....	13
2.1.2.2.1. Kontaktní listové herbicidy	14
2.1.2.2.2. Systemicky působící listové herbicidy	14
2.1.3. Herbicidní regulace plevelů v salátu	14
2.1.4. Herbicidní regulace plevelů v kvěťáku.....	17
2.1.5. Herbicidní regulace plevelů v kedlubnách	18
2.1.6. Herbicidní regulace plevelů v mrkvi	19
2.1.7. Herbicidní regulace plevelů v cibuli	22
2.1.8. Agrotechnická opatření ovlivňující účinnost a selektivitu herbicidního ošetření	24
2.1.8.1. Zakrývání porostu netkanou transparentní textilií	24
2.1.8.2. Závlaha.....	25
2.1.8.3. Vliv adjuvantů na účinnost a selektivitu půdních herbicidů	25
2.2. Rezidua herbicidů v zelenině	26
2.2.1. Rezidua pesticidů a jejich detekce	26
2.2.2. Rezidua v zelenině	28
2.2.3 Akční prahy a akční ochranné lhůty pro nízkoreziduální a bezreziduální produkci.....	28

2.2.4. Chování herbicidů v půdě	29
3. Cíle práce a hypotézy	32
4. Publikované práce.....	33
4.1. Vliv zakrývání netkanou textilií na účinnost a selektivitu pendimethalinu v salátu	33
4.2. Dynamika degradace herbicidů v kvěťáku	40
4.3. Vliv závlahy a půdního adjuvantu na účinnost a selektivitu pendimethalinu a metazachloru v kedlubnách	47
4.4. Vliv závlahy a adjuvantu na rezidua pendimethalinu a metazachloru v kedlubnách a půdě	56
4.5. Dynamika degradace herbicidů v kořenech mrkve	65
5. Sumární diskuse	90
5.1. Obsah reziduí herbicidů v zelenině	90
5.1.1. Půdní herbicidy	90
5.1.2. Listové herbicidy.....	93
5.2. Vliv agrotechnických opatření na účinnost a selektivitu herbicidů.....	95
5.2.1. Vliv závlahy a adjuvantu.....	95
5.2.2. Vliv zakrývání netkanou textilií.....	96
6. Závěr	98
7. Použitá literatura	100

1. Úvod

Kvalita potravin a množství látek v nich obsažených je v současné době velmi aktuální téma. V souvislosti se zeleninou je často diskutována otázka reziduí pesticidů. Herbicidy, které se aplikují v porostech polní zeleniny k regulaci plevelů, jsou nejpoužívanější skupinou přípravků na ochranu rostlin v České republice, ale i ve světovém měřítku. Z celkového podílu spotřebovaných pesticidů v zemědělství tvoří herbicidy více než polovinu. Jsou základní součástí technologie pěstování všech velkoplošně pěstovaných zelenin. V posledních letech je v EU enormní snaha výrazně snižovat používání pesticidů tak, aby tyto látky co nejméně zatěžovaly prostředí. Nejvíce problematické jsou z tohoto pohledu herbicidy s delší perzistencí v půdě. Jejich rezidua mohou následně kontaminovat podpovrchové či povrchové vody, případně se mohou vyskytovat v potravinách.

Množství reziduí herbicidů obsažených ve sklizeném produktu lze snížit jejich efektivním používáním a využíváním integrovaného přístupu v ochraně proti plevelům.

V posledních letech došlo k výraznému zpřesnění a zlevnění metod stanovujících obsah reziduí pesticidů v potravinách. Zelenina je proto pod čím dál větší kontrolou, zda nejsou překračovány maximální povolené obsahy těchto látek (tzv. hodnoty MRL) stanovené administrativou EU. Některé obchodní řetězce dokonce mají na své dodavatele zeleniny ještě přísnější požadavky (jde o tzv. nízkoreziduální produkci). Vedle toho, zelenina určená pro dětskou výživu nesmí obsahovat rezidua pesticidů prakticky vůbec (max 0,01 mg/kg).

2. Literární přehled

2.1. Plevelé a možnosti jejich regulace

Plevelé patří k nejvýznamnějším škodlivým organismům polních plodin. Plodiny a plevelé spolu vytvářejí agrofytocenózy, společenstva rostlin na orné půdě. Obě tyto složky agrofytocenózy nejen že interagují mezi sebou, ale zároveň i s členy ostatních společenstev v celém agroekosystému. Tyto interakce bývají většinou antagonistické, kdy alespoň jeden ze zúčastněných druhů následkem interakce strádá. Nejčastější antagonistickou interakcí je konkurence o zdroje, dále parazitismus, kdy parazitické plevelé přímo odebírají hostitelským plodinám živiny a vodu, popřípadě alelopatie, kdy dochází k vyměšování kořenových exsudátů, které působí inhibičně na růst rostlin jiných druhů. Tyto vztahy jsou dostatečně známé a jejich důsledkem bývá snižování výnosu a jeho kvality (Jursík et al. 2018). Plevel patřící do stejné čeledi jako plodina obvykle hostí podobné spektrum chorob a škůdců. Plevelé se tak stávají rezervoáry a přenašeči těchto škodlivých organismů. Všechny brukvovité plevelé jsou hostiteli nádorovky kapustové (*Plasmodiophora brassicae*), původce nádorovitosti košťálovin, což je jedna z nejvýznamnějších chorob brukvovitých zelenin, proti níž v současné době neexistuje spolehlivý způsob ochrany, kromě přerušení pěstování brukvovitých plodin na zamořeném pozemku po dobu osmi let. Vyskytují-li se však na daném pozemku plevelé z čeledi brukvovitých, dochází na jejich kořenovém systému k dalšímu množení patogena a časová izolace je pak naprosto neúčinná (Donald & Porter 2009; Cobb & Reade 2010).

Plevelé jsou nebezpečné zejména pro zeleniny z přímých výsevů, které dlouho vzcházejí (např. mrkev, petržel, cibule) a během vegetace špatně zapojují porost (např. cibule). Výnos těchto zelenin je zaplevelením velmi negativně ovlivněn, zejména pokud se plevelé mohou uplatňovat již od počátku vegetace. Plevelé vzešlé v druhé polovině vegetace většinou výnos nesnižují, ale znesnadňují, případně znemožňují použití sklizňové mechanizace (Janýška 1984). Proto je nutné včasné plevelé v zeleninách regulovat, v období jejich vzcházení nebo krátce po něm. Herbicidní přípravky povolené do porostů zeleniny sice významně usnadňují regulaci plevelů, avšak jejich účinnost není obvykle dostatečná na všechny plevelné druhy a často se vyskytují také problémy se selektivitou k některým zeleninám.

Herbicidy jsou nejvýznamnější skupinou pesticidů. Zpočátku se používaly pouze v porostech hospodářsky nejvýznamnějších plodin, postupně se však začaly intenzivně využívat také při velkovýrobním pěstování polní zeleniny (Sondhia 2013). Zároveň se však

jedná o synteticky vyráběné organické látky, jejichž rezidua mohou způsobovat mnoho problémů v životním prostředí a negativně ovlivňovat lidské zdraví.

Nejčastěji jsou herbicidy aplikovány postřikem. Do rostliny pronikají skrze listy (listové herbicidy). Přičemž listový příjem je ovlivňován mnoha faktory, z nichž můžeme některé částečně ovlivnit. Například aplikační technikou lze ovlivnit dávku postřikové jichy, velikost kapének, rychlost jejich letu a dopadu. Dále působí na příjem herbicidů také povětrnostní vlivy. Aby se herbicid dostal až do cytoplazmy, musí z povrchu listu projít třemi vrstvami rozdílné fyzikálně-chemické povahy (kutikulou, buněčnou stěnou a plazmalemou). Transport z povrchu listu dovnitř je difúzní proces, probíhající po celém povrchu listu. Nebo jsou herbicidy přijímány kořeny vzcházejících plevelů z půdy (půdní herbicidy). Příjem herbicidu se uskutečňuje pasivní cestou na základě koncentračního spádu mezi koncentrací herbicidu v půdním roztoku a koncentrací v rostlině. Kořen není chráněn kutikulou, avšak další překážkou příjmu jsou Caspariho proužky, tvořící souvislý pruh v buněčných stěnách endodermis, čímž vzniká bariéra pro apoplastický transport látek prostorem buněčných stěn. Rychlost příjmu půdního herbicidu je ovlivněna koncentrací herbicidu v půdním prostředí v zóně kořenového vlášení, sorpční vlastností půdy a půdní vlhkostí. Vyšší příjem herbicidu z půdního roztoku často souvisí s intenzitou transpirace, která roste se vzrůstající teplotou. Některé herbicidy mohou být přijímány listy i kořeny zároveň. Z vnějších vlivů, které ovlivňují účinnost a chování herbicidů v prostředí jsou významné především půdní vlastnosti, povětrnostní podmínky a pokryvnost plodiny a plevelů (Håkansson 2003; Jursík et al. 2011).

Použití herbicidů je podle Jursíka et al. (2011) ekonomicky méně nákladné a méně náročné na lidskou práci než ostatní možnosti regulace plevelů. Přesto s sebou použití herbicidů nese určitá rizika. Při nevhodném používání mohou herbicidy způsobovat poškození pěstované plodiny (fytotoxicitu) a zatěžovat životní prostředí. Rezidua herbicidů mohou poškozovat následné plodiny, případně přetrvávat v životním prostředí a ohrožovat necílové organismy (Tóth 2001). Soceanu et al. (2009) uvádí, že skoro 95 % aplikovaných herbicidů dosáhne jiného místa, než je jejich cílové určení. Jedná se především o zasažení necílových rostlinných druhů, vertikální a horizontální pohyb v půdě srážkovou vodou nebo odpar. Herbicidy se tak dostávají mimo agrofytocenózy a do potravin. Přes veškerá regulační opatření používání pesticidů dochází každoročně k poškození plodin rezidui herbicidů v půdě, které byly aplikovány v předchozích plodinách. Tyto škody mohou vznikat v důsledku předávkování herbicidů, nesprávnou aplikací či nedodržením časového odstavu mezi aplikací herbicidu a setím následné plodiny (Buryšková 2006). Podle Galla (2007) je nutno u půdních herbicidů počítat s delší

perzistencí v půdě, zvláště při vyšších dávkách a nevhodných půdních a povětrnostních podmínkách. Zejména studené a suché počasí může zpomalit rozklad herbicidů v půdě (Buryšková 2006). Jursík & Soukup (2006) varuje před rezidui některých herbicidů (hlavně ALS inhibitory), které mohou způsobovat fytotoxicitu brukvovitých plodin ještě několik měsíců po aplikaci. V rizikových oblastech (těžší půdy s vyšším pH) je proto vhodné používat k regulaci zaplevelení předplodiny raději herbicidy přijímané pouze listy, případně herbicidy s krátkou perzistencí v půdě. Snížení koncentrace reziduí herbicidu v půdě se dá dosáhnout hlubokou orbou, závlahou nebo zlepšením mikrobiální činnosti půdy, např. hnojením statkovými hnojivy.

Nezbytným předpokladem úspěšné regulace plevelů je schopnost diagnostikovat jednotlivé druhy v raných růstových fázích. Integrovaný přístup regulace plevelů se skládá z celého souboru preventivních metod (používání čistého osiva, střídání plodin a vytvoření příznivých podmínek pro zvyšování konkurenční schopnosti plodin) a přímých metod regulace. Herbicidní způsob regulace plevelů, v porovnání s ostatními nepřímými a přímými metodami, zasahuje do druhového složení plevelných společenstev nejradikálněji. Přesto se společenstva plevelů dokázala úspěšně vyrovnávat i s nejučinnějšími herbicidy (Tóth 2001). Janýšek (1990) proto upozorňuje, že důležité je též účelné sestavení osevních postupů, které umožní střídání přípravků tak, aby spektrum herbicidní účinnosti bylo co nejširší.

2.1.1. Plevelné spektrum v zelenině

2.1.1.1. Plevelné spektrum v salátu

V prostorech salátu se mohou uplatňovat především plevele s rychlou dynamikou růstu a vývoje. Saláty lze v polních podmínkách pěstovat po celou vegetační dobu (březen až říjen), nejčastější jsou brzké jarní výsadby v průběhu března a dubna. V těchto porostech se mohou nejlépe uplatňovat především ozimé plevele (penízek rolní, kokoška pastuší tobolka, ptačinec prostřední, starček obecný, hluchavky, rozrazilky) a časné jarní druhy plevelů (hořčice rolní, oves hluchý). Z pozdních jarních plevelů se v jarních porostech salátů nejlépe uplatňují merlík bílý či bažanka roční. Velmi dobře se v porostech salátů (zejména dubnové výsadby) prosazují také vytrvalé plevele, především pcháč rolní, rukev rolní a jiné (Jursík et al. 2016b). Nejproblematictější plevele jsou v porostech salátu podle Tei et al. (2007) kokoška pastuší tobolka, merlíkovité a laskavcovité plevele.

V porostech zakládáných od května do srpna se mohou dobře uplatňovat, mimo výše uvedených druhů, také ostatní pozdní jarní plevelé (rdesna, laskavce, pět'oury, lilky, ježatka kuří noha, durman obecný). Tyto druhy se mohou za vhodných povětrnostních podmínek (vyšší teploty), či při zakrytí porostu netkanou textilií prosazovat i u porostů zakládáných v dubnu (Jursík et al. 2015). Před ježatkou kuří nohou, jako obtížně regulovatelným později vzházejícím plevellem v salátu, varují také Tei et al. (2007).

Salát je středně citlivý ke konkurenci plevelů. Časně jarní plevelé vcházející po výsadbě raných salátů mohou způsobit snížení jeho výnosu (Lanini & Le Strange 1991). Přestože plevelé obvykle nezpůsobí dramatické snížení výnosu salátů, je velmi důležité udržet porost v bezplevelném stavu, neboť plevelé nejen konkurují a oddalují termín sklizně, ale mohou i v relativně malém množství snižovat kvalitu (kontaminace semeny plevelů) a způsobovat problémy při ruční sklizni. Zaplevelené porosty jsou obvykle také náchylnější k napadení houbovými chorobami (díky menší vzdušnosti porostu), především plísni salátovou (*Bremia lactucae*). To vše je nutné brát v úvahu při rozhodování o nutnosti zásahu proti plevelům (Knott 2002). Fennimore & Umenda (2003) ale upozorňují, že pokud by plevelé konkurovaly salátu 4 týdny, mohlo by dojít ke snížení výnosu až o 23 %. Naopak, Odera & Wright (2013) zaznamenali kritické období z hlediska zaplevelení salátu dva až tři týdny po výsadbě, přičemž následně vzešlé plevelé (kromě trvalých plevelů) již nezpůsobily ztrátu na výnosu salátu. V tomto období by proto měl být salát udržován v bezplevelném stavu, jinak by mohlo dojít ke snížení výnosu až o 60 % (Santos et al. 2004a; Giancotti et al. 2010).

2.1.1.2. Plevelné spektrum košťálové zeleniny

Konkurenční schopnost košťálové zeleniny je oproti jiným zeleninám poměrně vysoká. Především zelí a kapusta dokážou plevelům velmi efektivně konkurovat, avšak květák a brokolice jsou vůči zaplevelení citlivější a ztráty na výnose způsobené zaplevelením mohou být až 85 % (Qasem 2009). Kritické období, po které by měl porost košťálovin zůstat bez konkurence plevelů, je dva až čtyři týdny po vzejití, resp. výsadbě (Roberts et al. 1976; Miller & Hopen 1991). U kvěťáku může být toto období až sedm týdnů v závislosti na pěstebních podmínkách a odrůdě (Qasem 2009). Pokud dojde k zaplevelení pozemku, může dojít ke snížení výnosu a ke snížení počtu růžic kvěťáku (Qasem 2007).

Přestože se v porostech košťálové zeleniny mohou prosazovat téměř všechny plevelné druhy, nejčastěji bývají problémy s plevely pozdně jarními a vytrvalými. Nejrannější výsadby a

výsevy mohou být intenzivněji zaplevelovány také časnými jarními (Jursík et al. 2016b). Mezi problematické časně jarní plevele patří hlavně opletka obecná nebo hořčice rolní (Sikkema et al. 2007). Rané výsadby mohou být také zaplevelovány ozimými druhy, jako jsou heřmánkovité plevele, svízel přitula, violky, zemědělský lékařský, penízeček rolní nebo kokoška pastuší tobolka (Jursík et al. 2016b). Z pozdních jarních plevelů se v porostech objevuje zejména merlík bílý, laskavec ohnutý, rdesno blešník a bažanka roční (Altieri et al. 1985; Sikkema et al. 2006). V porostech zakládáných od druhé poloviny dubna se mohou nejlépe prosazovat teplomilnější pozdní jarní plevele, především ježatka kuří noha, béry, laskavce, pět'oury, lilky a durman obecný. V porostech zakládáných koncem června či počátkem července se nejlépe prosazují plevele, které masově vzchází během celého roku, jde především o pět'oury, laskavce, bažanku roční a durman obecný (Umeda 2000; Quasem 2007; Quasem 2009; Jursík et al. 2016b). Především rdesna a merlíky jsou značně odolné k mnoha půdním herbicidům, přičemž se tyto druhy vyznačují relativně velkou reprodukční schopností a dlouhověkostí semen, takže při nezvládnutí jejich regulace vzniká velká zásoba semen v půdě a tím narůstají problémy s druhotným zaplevelením, a to především po plečkování (Sikkema et al. 2007; Jursík et al. 2016b).

Významným problémem v porostech košťálové zeleniny bývají brukvovité plevele, které jsou také často odolné k mnoha herbicidům, především těm, které se používají preemergentně, či před výsadbou (Sikkema et al. 2006). Na pozemcích, na kterých se pěstuje košťálová zelenina, se tak často selektuje penízeček rolní, kokoška pastuší tobolka, ředkev ohnice a hořčice rolní (Jursík et al. 2016b). Tyto plevele, podobně jako řepka, jsou hostiteli mnoha chorob a škůdců košťálové zeleniny a jejich semena mají poměrně dlouhou životnost v půdě (Sikkema et al. 2006). Ozimá řepka, kde je regulace brukvovitých plevelů problematická, by proto neměla být součástí osevních sledů, v nichž je řazena košťálová zelenina. Výdrol ozimé řepky je v porostech košťálové zeleniny velmi obtížně potlačitelný (Jursík et al. 2016b).

Vytrvalé plevele se mohou uplatňovat v košťálové zelenině bez ohledu na termín založení porostu. Hospodářsky nejvýznamnějšími vytrvalými plevele jsou pcháček rolní a pýr plazivý. Lokálně však mohou způsobovat velké problémy také další druhy, především mléč rolní, přeslička rolní, čistec bahenní, rdesno obojživelné, rukev rolní, kamyšníky. Tyto druhy příznivě reagují na vyšší vlhkost půdy a vyskytují se proto především na pozemcích s vyšší hladinou podzemní vody nebo při vysoké intenzitě závlahy (Jursík et al. 2016b).

2.1.1.3. Plevelné spektrum v mrkvi

V časně vysetých porostech mrkve (do poloviny dubna) se nejlépe uplatňují ozimé a časně jarní plevely a merlík bílý. V později setých porostech je třeba od počátku vegetace počítat s ostatními pozdními jarními druhy plevelů a vytrvalými plevely. Shadbolt & Holm (1956) považují za dominantní plevely v mrkvi hlavně merlíky a rdesna. Problematické jsou zejména ty druhy, které vzchází etapovitě nebo v průběhu vegetace. Může to být ježatka kuří noha, bažanka roční, durman obecný, ptačinec prostřední, kokoška pastuší tobolka, laskavec ohnutý nebo pětoury (Gál et al. 2003; Gruszecki et al. 2015; Jursík et al. 2016a).

Z vytrvalých plevelů se může v porostech mrkve vyskytovat svlačec rolní, jitrocele, čistec bahenní, pcháč rolní nebo mléč rolní. Kvalitní a hlubší zpracování půdy omezuje a oddaluje vzcházení většiny vytrvalých plevelů (Jursík et al. 2005).

Porosty mrkve se nedoporučuje zakládat na pozemcích zaplevelených miříkovitými plevely (především tetluchou, bolehlavem a divokou mrkví) a na pozemcích, kde byly v předešlém roce pěstovány brambory. Vůči těmto plevelům nebo zaplevelující rostlině, nelze v mrkvi použít účinné herbicidy (Jursík et al. 2016b).

Konkurenční schopnost kořenové zeleniny je poměrně vysoká, na počátku vegetace je však třeba plevely důsledně potlačit. Kritické období z hlediska zaplevelení trvá u mrkve asi tři až pět týdnů po jejím vzejití. V tomto období by měla být plodina udržována v bezplevelném stavu, jinak může dojít k výraznému snížení výnosu až o 95 % (Coelho et al. 2009). Mimo přímé škodlivosti plevelů, mohou některé plevely způsobovat problémy při mechanizované sklizni (Knott 2002). Tyto problémy mohou nastat i při nižší intenzitě zaplevelení, zejména pokud se na pozemku vyskytují truskavec ptačí, lipnice roční, pýr plazivý, ale i jiné druhy (Jursík et al. 2016a).

2.1.1.4. Plevelné spektrum v cibuli

Jursík & Soukup (2004) uvádí, že cibule, pěstovaná z přímých výsevů, má pomalý počáteční růst a vývoj. Plevely vzcházejí časněji a rostou rychleji než cibule, která má velmi nízkou konkurenční schopnost prakticky po celou vegetační dobu. Konkurenční schopnost většiny plevelů v porostech cibule je proto velmi vysoká (Carlson & Kirby 2005). Půda zůstává dlouhou dobu, většinou po celou vegetaci, bez souvislého půdního pokryvu. To umožňuje plevelům vzcházet a růst během celé vegetace. Je tedy třeba počítat s tím, že i relativně malá intenzita zaplevelení (u mnoha druhů i méně než 1 plevel/m²) může způsobit výraznou

výnosovou ztrátu, ale také problémy při mechanizované sklizni. To platí především pro plevelné druhy, které dokážou vytvořit mohutné rostliny se silnou a tvrdou lodyhou (merlíky, laskavce, durman obecný, mračňák Theophrastův). Kritické období z hlediska zaplevelení cibule je velmi dlouhé, často i více než osm až deset týdnů po jejím vzejití (Jursík et al. 2016b). V tomto období by měla být plodina udržována v bezplevelném stavu, jinak může dojít k výraznému snížení výnosu, přičemž se výrazně sníží také její kvalita, především velikost cibulí (Qasem 2005a). Proto, i při relativně slabém zaplevelení, je třeba k regulaci přistoupit velmi zodpovědně. Janýška (1977) uvádí, že zaplevelení v počáteční fázi růstu cibule vede k výraznému snížení výnosů. Zaplevelení koncem vegetace již nesnižuje výnos, ale znesnadňuje, popř. zcela znemožňuje mechanizovanou sklizeň.

Jestliže se z jakéhokoliv důvodu nepodařilo vytrvalé plevele v předplodině ani v meziporostním období potlačit, je vhodné provést alespoň hlubší orbu a předset'ové zpracování půdy. Vytrvalé plevele pak vzcházejí v cibuli poněkud později (Jursík & Soukup 2004).

Cibule bývá zaplevelována téměř všemi plevele, a to jak jednoletými (jarními i ozimými), tak i vytrvalými (Jursík 2004; Herrmann et al. 2017). V porostech cibule se na počátku vegetace většinou nejvíce uplatňují ozimé plevele (heřmánkovité plevele, svízel přítula, violky, zemědým lékařský, peníze rolní, kokoška pastuší tobolka), časné jarní druhy (hořčice rolní, oves hluchý, opletka obecná) a merlík bílý (Ghosheh 2004; Uygur et al. 2010). Jursík et al. (2016b) upozorňuje, že v průběhu května je třeba počítat především s rdesny, laskavci, ježatkou a ostatními teplomilnějšími pozdními jarními druhy. Sraw et al. (2016) také varuje před zaplevelením lipnicí roční. V druhé polovině vegetace (červenec, srpen) mohou porost cibule výrazně zaplevelit druhy, které jsou schopny vzcházet po celý rok (pět'oury, laskavce, bažanka roční, durman obecný). Problematické jsou vytrvalé plevele, zejména pcháč rolní, pýr plazivý a svlačec rolní (Uygur et al. 2010). Lokálně však mohou podle Jursíka et al. (2016b) způsobovat velké problémy také další druhy, především mléč rolní, přeslička rolní, čistec bahenní, rdesno obojživelné, rukev rolní a kamyšníky. Tyto druhy příznivě reagují na vyšší vlhkost půdy a vyskytují se proto především na pozemcích s vyšší hladinou podpovrchové vody nebo na intenzivně zavlažovaných pozemcích. Velmi problematickými zaplevelujícími plodinami v cibuli jsou brambory a řepka, tyto plodiny proto nejsou pro cibuli vhodnou předplodinou.

2.1.2. Způsoby použití herbicidů v zelenině

Herbicidy se aplikují obvykle v počátečních fázích vegetace, kdy se začínají utvářet konkurenční vztahy mezi plevely a plodinou (Jursík et al. 2018).

2.1.2.1. Preemergentní aplikace a aplikace před výsadbou plodiny

Preemergentní aplikace se provádí po zasetí zeleniny, avšak ještě před jejím vzejitím. Preemergentní herbicidy jsou přijímány především kořeny, koleoptylem (trávy) nebo hypokotylem (dvouděložné). Herbicidy přijímané kořeny jsou transportovány převážně xylémem ve směru transpiračního proudu. Většina půdních herbicidů proto účinkuje na plevele pouze při klíčení a vzcházení, max. ve fázi prvních pravých listů. Pro preemergentní aplikaci by měl být herbicid aplikován s větší dávkou vody (min. 300 l/ha), aby došlo k vytvoření rovnoměrného herbicidního filmu na povrchu půdy (Jursík et al. 2018).

Nejvíce je tohoto aplikačního termínu využíváno v košťálové a kořenové zelenině, ale také v porostech salátu a plodové zelenině. Podmínkou dobré účinnosti půdních herbicidů je dostatečná půdní vlhkost (Zanatta et al. 2008). Naopak vysoké srážky po aplikaci mohou proplavit tyto herbicidy mimo zónu klíčení plevelů a způsobit poškození plodiny, případně mohou kontaminovat podzemní vody. Velmi důležité je, aby povrch půdy nebyl při aplikaci hrudovitý, protože se jednak pod nimi vytvářejí aplikační stíny a jednak se při jejich rozpadu dostávají na povrch půdy klíčivá semena. Rovněž větší množství organických zbytků, které zůstává na povrchu zejména v případě použití minimalizačních technologií zpracování půdy, snižuje účinnost takto aplikovaných herbicidů. Herbicidy určené k preemergentní, resp. předvýsadbové aplikaci jsou v půdě více či méně perzistentní (pomalejší degradace), což sice umožňuje zasáhnout několik vln vzcházení plevelů, na druhou stranu se zvyšují environmentální, ale také pěstitelská rizika (Soukup et al. 2004).

2.1.2.2. Aplikace postemergentní

Postemergentní herbicidy se aplikují po vzejití plodiny, kdy jsou obvykle vzešlé také plevele. Postemergentně se aplikují herbicidy, které jsou přijímány pouze listy, ale také mnoho herbicidů přijímaných kořeny i listy současně. Zejména v případě, když je aplikace prováděna krátce po výsadbě zeleniny, bývají často používány půdní herbicidy přijímané především kořeny plevelů (Jursík et al. 2016).

Pro konkrétní herbicid je přesný termín aplikace zpravidla vymezen růstovou fází plodiny a plevelů. Postemergentní herbicidy přijímané převážně listy plevelů se nejvíce používají

v cibuli. Velmi rozšířené jsou však také listové graminicidy inhibující enzym Acetil-CoA karboxylázu trávovitých plevelů (Coob & Reade 2010). Tyto herbicidy se používají díky vysoké selektivitě ve všech dvouděložných plodinách, včetně zelenin.

2.1.2.2.1. Kontaktní listové herbicidy

Většina listových kontaktních herbicidů porušuje buněčné membrány rostlinných pletiv. Aby byly kontaktní herbicidy dostatečně účinné, musí být aplikovány přímo na místo účinku herbicidu. Dokonalé zvlhčení povrchu plevelů je základním předpokladem vysoké účinnosti těchto herbicidů. Kontaktní herbicidy jsou obecně málo účinné při regulaci vytrvalých plevelů. Zasažené části rostliny sice po kontaktu s aplikačním roztokem poměrně rychle odumírají, ale podzemní orgány vytrvalých plevelů zůstávají nezasázeny a mohou rychle iniciovat růst nových nadzemních orgánů. Účinnost kontaktních herbicidů je obvykle vyšší na dvouděložné rostliny než na trávy. Vegetační vrchol mladých rostlin trav je na povrchu, nebo těsně pod povrchem půdy a jeho dokonalé zasažení je proto obtížné. Naproti tomu vegetační vrchol dvouděložných rostlin bývá většinou postřikem dobře zasažen (Jursík et al. 2018).

2.1.2.2.2. Systemicky působící listové herbicidy

Systemicky působící listové herbicidy mohou být v rostlině transportovány xylémem nebo floémem. Xylém je vodivé pletivo tvořené neživými buňkami, kterými je transportována voda a živiny z kořenů do nadzemních částí rostliny. Translokace pomocí xylému je tedy možná pouze z kořenů do nadzemních orgánů. Floém je vodivé pletivo tvořené živými buňkami, ve kterém může transport probíhat směrem vzhůru i dolů ke kořenům. Floém přepravuje především produkty asimilace z listů a stonku do kořenů a do vegetačních vrcholů. Systemicky působící listové herbicidy, rozváděné floémem, proto vykazují velmi dobrou účinnost i ve vyšších růstových fázích plevelů a používají se také k regulaci vytrvalých plevelů (Jursík et al. 2018).

2.1.3. Herbicidní regulace plevelů v salátu

Herbicidů použitelných v salátu je málo (Smith et al. 2007), protože salát je k většině z nich poměrně citlivý (Tickes & Kerns 1996; Jursík et al. 2015). Fennimore et al. (2011)

doporučuje používat v předplodině nižší dávky půdních herbicidů s delší perzistencí v půdě, protože salát je velmi citlivý na rezidua herbicidů v půdě. Herbicidy mohou způsobit značné poškození rostlin salátu, hlavně pokud je salát dále vystavován dalším stresovým faktorům, jako jsou extrémně nízké nebo vysoké teploty, sucho nebo vysoké srážky, popřípadě silná závlaha, silný vítr nebo zasolení. V takovýchto případech, mohou jinak selektivní herbicidy způsobovat viditelnou fytotoxicitu. Nejčastější projevy fytotoxicity u salátu jsou snížený kořenový růst, zpomalený vývoj a nižší výnos nebo pozdější sklizeň (Tickes & Kerns, 1996).

Podle Fennimora et al. (2001) používají pěstitelé salátu k regulaci plevelů nejčastěji preemergentní herbicidy, obsahující účinné látky propyzamide, pendimethalin, S-metolachlor, flufenacet, clomazone. Postemergentně se používají také některé inhibitory ACCasy (Henderson & Webber 1993; Umeda 2000; Knott 2002; Garcia-German et al. 2014). V České republice se obvykle používá před výsadbou herbicid Stomp 400 SC (pendimethalin), někdy v kombinaci s herbicidem obsahujícím úč. látku propyzamid (Jursík et al. 2016b). S tím se také shodují Frost & Hingston (2004), kteří uvádí, že v současné době je herbicid propyzamid používán převážně před výsadbou salátu v tank-mixu s pendimethalinem.

Herbicid pendimethalin se však používá pouze v porostech salátu z předpěstované sadby. Vykazuje dobrou účinnost na většinu jednoletých plevelů. Pendimethalin inhibuje stavbu mikrotubulů v kořenovém systému trávovitých i dvouděložných plevelů (Tomlin 2000) a při dostatečné půdní vlhkosti vykazuje dobrou účinnost (Jursík et al. 2015). Neuweiler & Krauss (2008) uvádí, že aplikace pendimethalinu a jeho následné zapravení 5 cm do půdy však vedlo ke snížení jeho účinnosti na plevele. Na druhou stranu je pendimethalin v půdě relativně perzistentní a jeho časté používání může vést ke kontaminaci podpovrchových či povrchových vod (Wang & Arnold 2003). Pokud je aplikace pendimethalinu provedena před výsadbou salátu, je při výsadbě třeba minimalizovat porušení herbicidního filmu na povrchu půdy, aby nedošlo ke snížení jeho účinnosti. Výsadba salátu by měla být provedena bezprostředně po aplikaci herbicidu. Po výsadbě je obvykle třeba provést závlahu (do 5 mm), protože vlhkost půdy má klíčový vliv na účinnost herbicidního ošetření (Shem-Tov et al. 2006; Odera & Shaner 2014). Mechanické zapravení před výsadbou může vést ke snížení účinnosti i selektivity (Neuweiler & Krauss 2008), přestože je jeho mobilita v půdě oproti ostatním herbicidům, používaným v salátu, poměrně malá (Yen et al. 2008). V pokusech, které prezentovali Jursík et al. (2016b), prokázal nejvyšší účinnost pendimethalin v dávce 2 l/ha. Účinnost nižší dávky tohoto herbicidu (1,5 l/ha) byla zejména v suchých letech výrazně nižší. Naopak pokud byl tento herbicid použit v kombinaci s účinnou látkou clomazone v dávce 0,15 l/ha a následně (týden po výsadbě) byla

aplikována účinná látka propyzamide (3,5 l/ha), bylo dosaženo vyšší účinnosti na většinu sledovaných plevelů (merlík bílý, lilek černý, bažanka roční, ježatka kuří noha, kokoška pastuší tobolka, penízek rolní a laskavec ohnutý).

Zandstra (2006) doporučuje k regulaci plevelů v salátu propyzamide. V letech 2005 až 2014 byl tento přípravek nejpoužívanějším herbicidem při pěstování salátu v Kalifornii (Collins 2016). Aplikace může proběhnout před nebo po výsadbě, ale před tím, než plevele vzejdou. Jursík et al. (2015) ovšem varuje, že aplikace propyzamidu po výsadbě není v ČR povolena. Propyzamid je možné využít k regulaci jednoletých trav, včetně biotypů rezistentních k inhibitorům ALS a ACCasy (Wittrock et al. 2008). Účinnost propyzamidu, kterou testovali Lati et al. (2015a) v dávce 1,3 kg/ha byla vůči plevelům uspokojivá, avšak nižší než účinnost pendimethalinu. Pro zlepšení účinnosti propyzamidu doporučují Tickes & Kerns (1996) jeho zapravení do půdy závlahou. Po takto zapraveném herbicidu zaznamenali Batts et al. (2008a) jeho zvýšenou účinnost dokonce i na dvouděložné plevele. Reuber (1980) a Petříková et al. (2004) ale upozorňují, že od použití propyzamidu by se při integrované produkci salátu mělo upustit, protože byl často diskutován jeho negativní dopad na životní prostředí. Proto Wittrock et al. (2008) doporučují používání herbicidu, u kterého je propyzamid formulován jako suspenzní koncentrát (SC formulace) a který prokazuje i mnohem lepší účinnost a vyšší selektivitu k salátu.

Fennimore et al. (2011) testovali v porostech salátu herbicid s účinnou látkou flumioxazin. Herbicid byl aplikován v dávkách 75, 105 a 211 g/ha před výsadbou salátu. Pokud byl přípravek aplikován v nižších dávkách, byl k salátu selektivní a nedošlo ke snížení výnosu. Po aplikaci nejvyšší dávky (211 g/ha) bylo poškození viditelné a byl snížen výnos. Autoři také zkoumali působení účinné látky oxyfluorfen v dávce 280 a 560 g/ha. Ani jedna z těchto dávek nezpůsobila viditelné poškození salátu a nesnížila jeho výnos.

Stajner et al. (2003) zaznamenali po aplikaci S-metolachloru snížení obsahu pigmentu v listech salátu, což se projevilo snížením výnosu a nižší kvalitou sklizených hlávek salátu. Lati et al. (2015a) testovali preemergentně S-metolachlor v dávkách v rozmezí 0,6 až 5,6 kg/ha. Při dávkách do 2,8 kg/ha zaznamenali pouze velmi malé, nebo žádné fytotoxické projevy a nedošlo ke snížení výnosu. Dobrou účinnost na plevele prokázal S-metolachlor již od dávky 0,7 kg/ha. Naopak podle Hendersona & Webbera (1993) způsobil v salátu před výsadbou aplikovaný S-metolachlor již v dávkách větších než 1,75 kg/ha zpomalení růstu a snížení množství prodejných hlávek. I ve snížené dávce (1,44 kg/ha) bylo množství prodejných hlávek sníženo

o 30 % v porovnání s pletou kontrolou. V České republice navíc není S-metolachlor do salátu registrován.

V případě, že se nepodaří potlačit jednoleté plevelné trávy půdními herbicidy, lze podle Jursík et al. (2015) postemergentně použít listové graminicidy (v ČR registrována pouze ú.l. fluazifop), které jsou k salátu poměrně selektivní. Fluazifop je systémový herbicid, který velmi dobře potlačuje také pýr plazivý a výdrol obilovin (Jursík et al. 2016b; Cielsiek et al. 2017). Avšak účinnost většiny listových graminicidů na lipnici roční je minimální (Jursík et al. 2015).

Vytrvalé dvouděložné plevele nebo zaplevelující brambory nelze v porostech salátu regulovat herbicidy. Proto je vhodné nezařazovat salát v osevním postupu na pozemky, které jsou takto zaplevelovány (Jursík et al. 2016b).

2.1.4. Herbicidní regulace plevelů v kvěťáku

Množství herbicidů použitelných v košťálové zelenině je omezené (Umeda 2000), přičemž kvěťák patří v rámci této skupiny plodin k nejcitlivějším zeleninám.

Základem regulace zaplevelení v košťálovinách je ošetření půdními herbicidy před výsadbou nebo krátce po ní (Jursík & Soukup 2006). Dávku půdních herbicidů je vhodné snížit na lehčích půdách (Jursík & Crha 2014a). Podle Whitewella (1984) a Petříkové et al. (2012) je před výsadbou kvěťáku možná aplikace herbicidů obsahujících pendimethalin nebo podle Jursíka & Soukupa (2006) také herbicidů obsahujících napropamide či nejlépe jejich kombinace. Batts et al. (2008b) uvádí, že napropamide je vhodný pro regulaci mnoha travovitých a dvouděložných jednoletých plevelů, ale podle Umeda (2000) v některých pokusech, hlavně na lehčích půdách, způsoboval výraznou fytotoxicitu, která se projevovala zpomalením růstu kvěťáku. Sikkema et al. (2007) ale varuje, že napropamide neposkytuje dostatečně dobrou účinnost na merlíky, rdesna a mračňák. Scott et al. (1995) doporučuje před výsadbou kvěťáku používat pendimethalin + clomazone. Clomazone vykazuje dobrou účinnost na ježatku kuří nohu, béry, prosa a na merlíky, svízel či mračňák, avšak může poškozovat brukvovitou zeleninu, což se projevuje albikací listů, nejčastěji za chladného a vlhkého počasí. Tyto projevy obvykle brzy odezní a nemají významný vliv na výnos, zvláště je-li kvěťák pěstován v půdách s vysokým obsahem organické hmoty (Scott & Weston 1992; Scott et al. 1995).

Po zakořenění, sedm až čtrnáct dní po výsadbě kvěťáku, lze aplikovat metazachlor (Rouchaud et al. 2008; Petříková et al. 2012). Jursík & Crha (2014a) upozorňují, že účinnost metazachloru je závislá na srážkách, resp. závlaze a spektrum působení je poměrně úzké, přičemž aplikaci je nutné provést v poměrně raných růstových fázích plevelů. Naopak Qasem (2007) pozoroval po aplikaci metazachloru po výsadbě snížení zaplevelení o 94 % oproti neošetřené variantě. Jestliže byla aplikace metazachloru provedena po důkladném zakořenění, nebylo zaznamenáno snížení kvality sklizených kvěťáků (Zinikeviciute & Baleliunas 1998). Po zakořenění kvěťáku lze také aplikovat pendimethalin, S-metolachlor nebo dimethenamid-*P*. Je však potřeba brát v úvahu odrůdové rozdíly v citlivosti k těmto herbicidům (Jursík & Soukup 2006).

Kvěťák je oproti zelí citlivější vůči listovému kontaktnímu herbicidu pyridate, který ve vyšších dávkách (nad 0,5 kg/ha) způsobuje zpomalení růstu a nekrózy listů (Petříková et al. 2012). Henderson & Cairns (2002) nezaznamenali žádné poškození setého kvěťáku, pokud byl pyridate aplikován v dávkách do 0,9 kg/ha alespoň pět týdnů po výsevu. Jursík & Soukup (2006) proto doporučují jeho dělenou aplikaci. Plná dávka způsobuje u řady odrůd silnou fytotoxicitu. Henderson & Cairns (2002) také zkoušeli v porostech kvěťáku postemergentně aplikovat clopyralid nebo jeho kombinaci s účinnou látkou picloram. Účinnost těchto herbicidů na plevele byla dostatečná, nicméně jejich aplikací nebyl negativně ovlivněn výnos kvěťáku.

Při výskytu trávovitých plevelů se aplikují graminicidy propaquizafop nebo quizalofop (Petříková et al. 2012) a podle Jursíka & Crhy (2014) jsou košťáloviny vůči těmto přípravkům poměrně tolerantní.

2.1.5. Herbicidní regulace plevelů v kedlubnách

Kedlubny se obvykle pěstují z předpěstované sadby. Vzhledem k poměrně krátké vegetační době, z níž větší část bývá porost zakryt netkanou textilií (zejména na jaře), je důležité dokonale zvládnout předvýsadbové herbicidní ošetření. Pro použití předvýsadbových herbicidů platí stejné zásady, které jsou uvedeny u kvěťáku. Postemergentní herbicidní ošetření v kedlubnách není příliš vhodné z důvodu krátké vegetační doby a tím nemožnosti dodržet ochranné lhůty (Jursík et al. 2016b).

Nejčastěji se v kedlubnách používají herbicidy metazachlor a pendimethalin. Při jejich použití v nevhodných podmínkách však dochází velmi často k poškození kedluben.

Zejména pendimethalin může způsobit výrazné omezení růstu kořenů, přestože viditelné projevy na nadzemních orgánech jsou minimální (Figuroa et al. 2016). Naopak poškození kedluben metazachlorem bývá méně časté (Al-Khatib et al. 1995). Lüning et al. (1983) ale pozoroval, že pokud byl metazachlor aplikován do kedluben na písčité půdě, docházelo k malému zpomalení jejich růstu. Bond (1993) zkoušel v kedlubnách regulovat zaplevelující bambory pomocí fluroxypyru, avšak výsledek nebyl dostačující.

2.1.6. Herbicidní regulace plevelů v mrkvi

Z hlediska zaplevelení je velmi důležité, aby v předplodině byly potlačeny vytrvalé plevele. K regulaci těchto vytrvalých plevelů lze využít také meziorostního období a neselektivní herbicidy (Stall & Dusky 2000; Kavaliauskaite et al. 2009; Sasnauskas et al. 2012). Jursík et al. (2005) dokonce doporučuje před vzejitím mrkve glyfosate v kombinaci s linuronem. Aplikace však musí být provedena minimálně pět dní před vzejitím mrkve.

Jelikož se mrkev nejčastěji pěstuje v odkameněných hrůbcích, které usnadňují sklizeň a zajišťují lepší kvalitu kořene, dochází zejména na stěnách hrůbků k nižší účinnosti herbicidů, protože vlivem větší plochy půdního povrchu bývá herbicid poddávkován (Jursík et al. 2016a). K regulaci plevelů v porostech mrkve se používají především preemergentní herbicidy (Petříková et al. 2012). S tím se shoduje i Jursík et al. (2005), kteří uvádějí, že doba od výsevu do vzejití mrkve trvá v závislosti na teplotě půdy a kvalitě osiva dva až tři týdny. V ČR jsou v tomto aplikačním termínu registrovány herbicidy obsahující úč. látky pendimethalin a aclonifen. V zahraničí se preemergentně používají také clomazone, linuron, prometryn, flufenacet, S-metolachlor, chlorpropham (Malidza et al. 1997; Knott 2002; Ogbuchiekwe et al. 2004; Morariu et al. 2017), v aridnějších oblastech také metribuzin, dimethenamid-P a mesotrione, které však mohou při intenzivních srážkách způsobovat výrazné poškození mrkve (Jursík et al. 2016b).

Petříková et al. (2012) a Chaitanya et al. (2014a) varují, že preemergentní herbicidy mohou na půdách s malou sorpční schopností poškozovat vzcházející mrkev a snižovat její výnos. Malý & Petříková (1998) navíc v takto ošetřených mrkvích zjistili nižší obsah beta-karotenu. Naopak na hlinitých strukturních půdách s vyšším obsahem humusu a sorpční kapacitou lze použít herbicidy obsahující pendimethalin ve vyšší dávce, pokud je mrkev vyseta dostatečně hluboko (Jursík et al. 2016b). Pendimethalin prokazuje dobrou účinnost na merlík bílý, kokošku pastuší tobolku, laskavec ohnutý či svlačec rolní (Morariu et al. 2017). Podle

Jursíka et al. (2005) lze ještě vyšší účinnosti pendimethalinu dosáhnout, jestliže je aplikace provedena po mírnějším dešti, případně závlaze (do 10 mm). Výrazně se tím zvyšuje účinnost zejména na trávy. Chaitanya et al. (2014a) kvůli nižší účinnosti pendimethalinu na trávovité plevely doporučují následně aplikovat listové graminicidy.

Herbicide Bandur (aclonifen) je k mrkvi vysoce selektivní, zejména na těžších půdách, kde jej lze preemergentně použít v plné dávce. Na lehčích půdách je vhodnější dávku snížit, zejména použije-li se tento přípravek v tank-mixu s jiným herbicidem (v zahraničí často s clomazonem). Aclonifen vykazuje vysokou účinnost především na merlíky a laskavce. Dobrou účinnost vykazuje také na hluchavky, bažanku roční a zemědělný lékařský a brukvovité plevely včetně řepky. Účinnost na trávovité plevely je nižší, zejména za sucha a na lilkovité plevely tento herbicide selhává zcela (Jursík et al. 2016b).

Pěstitele mrkve v USA se podle Ogbuchiekwe et al. (2004) dlouhodobě spoléhají na herbicidy s účinnými látkami trifluralin a linuron, které však již nejsou v EU v současnosti registrovány. Linuron vykazuje dobrou účinnost na běžně se vyskytující dvouděložné plevely (laskavce, merlíky, atd.). Na těžších půdách může při nedostatku srážek a závlahy dojít k výraznému snížení účinnosti. Na lehkých písčitých půdách mohou být naopak problémy se selektivitou a je proto třeba volit nižší dávky. S ohledem na úzké spektrum postemergentních herbicidů registrovaných do mrkve se obvykle tento herbicide preemergentně příliš nepoužívá a vyčkává se s jeho aplikací až po vzejití mrkve, přičemž při vzcházení je mrkev vůči herbicidům citlivá. Postemergentní aplikaci lze proto provést nejdříve ve fázi dvou až tří pravých listů v závislosti na účinné látce a zdravotnímu stavu mrkve (Jursík et al. 2016a; Morariu et al. 2017).

Po vzejití je růst a vývoj mrkve poměrně rychlý. Po zapojení porostu se již nově vzešlé plevely uplatňují jen velmi těžko a v dobře zapojených porostech již nemohou negativně ovlivnit výnos. Určitým problémem však mohou být vytrvalé plevely, jejichž regulace by proto měla být řešena především v předplodině nebo v meziorostním období (Jursík et al. 2005). Jursík et al. (2016b) doporučuje klást zvláštní důraz na regulaci pcháče osetu. Vytrvalé a přerostlé jednoleté dvouděložné plevely lze v porostu mrkve potlačovat herbicidy obsahujícími úč. látku fluroxypyr. Dávka se volí v závislosti na plevelném druhu a jeho růstové fázi. Z vytrvalých plevelů jsou relativně citlivé k této účinné látce svlačec rolní, jitrocele, mléč rolní a některé jednoleté dvouděložné plevely, například svízel přítula. Williams & Boydston (2005) sledovali v porostech mrkve vysokou účinnost fluroxypyru na zaplevelující brambory. Nicméně herbicidy s touto účinnou látkou jsou registrovány pouze do semenných porostů a do krmné mrkve. Po aplikaci fluroxypyru může docházet k deformacím listů mrkve, avšak tyto

příznaky brzy odezní a většinou nedochází ke snížení výnosu, ale u citlivých odrůd může dojít k deformaci kořene. V zahraničí byly testovány herbicidy obsahující ethofumesate, který se choval k mrkvi selektivněji, přestože ve vyšších dávkách docházelo i u tohoto herbicidu ke snížení výnosu mrkve (Jursík et al. 2016b). Williams & Boydston (2005) zkoušeli v porostech mrkve potlačovat zaplevelující brambory preemergentně i postemergentně herbicidem obsahujícím ethofumesate. Preemergentní aplikace oddálila vzcházení brambor a postemergentní aplikace způsobila zkroucení listů brambor a omezila jejich růst. Po obou termínech aplikace však sledovali lehké poškození listů mrkve a snížení výnosu oproti neošetřené kontrole.

Velmi dobrou účinnost na plevele a nízkou fytotoxicitu k mrkvi vykázal postemergentně aplikovaný metribuzin (Chaitanya et al. 2014a). Podobné výsledky byly zaznamenány i pokud byl aplikován preemergentně (Chaitanya et al. 2014b). Nicméně s aplikací je vhodné počkat až po vytvoření třetího listu mrkve, přičemž mezi odrůdami mrkve mohou existovat velké rozdíly v citlivosti k tomuto herbicidu (Jursík et al. 2016). Na variantách, ošetřených metribuzinem, pozorovali Singh & Tripathi (1988) a Muniyappa et al. (1995) statisticky významné zvýšení výnosu než na variantách ručně pletých. Předpokládá se však brzký zákaz tohoto herbicidu v EU.

Postemergentně lze regulovat jednoleté trávovité plevele v porostu mrkve listovými graminicidy s ú.l. haloxyfop, fluazifop, quizalofop a propaquizafop (Jursík et al. 2012; Petříková et al. 2012; Chaitanya et al. 2014b). Tyto herbicidy velmi dobře potlačují také výdrol obilnin a ve vyšších dávkách i pýr plazivý. Na lipnici roční vykazují tyto herbicidy nedostatečnou účinnost, snad s výjimkou herbicidů s ú.l. haloxyfop. Mrkev listové graminicidy poměrně dobře snáší, avšak je vhodné je aplikovat až po vytvoření dvou až tří listů mrkve, zejména jestliže je chceme použít v tank-mix kombinaci s jiným pesticidem. S herbicidy obsahujícími ú.l. linuron, či metribuzin se listové graminicidy nedoporučuje kombinovat z důvodů možného fytotoxického působení takovýchto směsí (Jursík et al. 2016b; Morariu et al. 2017). Naopak Chaitanya et al. (2014a) nezaznamenali po ošetření kombinací účinných látek metribuzin + quizalofop nebo propaquizalofop snížení výnosu oproti ostatním testovaným variantám.

2.1.7. Herbicidní regulace plevelů v cibuli

Podle Jursíka (2004) a Herrmanna et al. (2017) má ochrana cibule proti plevelům rozhodující vliv na výnos, jeho kvalitu a snadnost sklizně. Petříková et al. (2006) uvádí, že před vzejitím cibule je proto v zahraničí často používán neselektivní listový herbicid (glyphosát), což má význam zvláště tam, kde se objevují vytrvalé plevele. V případě, že se glyphosatové ošetření plánuje, může být výhodný delší časový odstup mezi předseťovou přípravou a setím. V takovém případě vzejdou plevele výrazně dříve než cibule a glyphosatové ošetření je pak efektivnější a bezpečnější k cibuli (Jursík et al. 2017).

Porosty cibule jsou v raných růstových fázích citlivé vůči herbicidům. Je tedy nezbytné zhodnotit před aplikací stav porostu, půdní vlastnosti a vlhkost půdy, teplotu vzduchu a intenzitu slunečního záření, aby se zabránilo vážnějšímu poškození cibule (Malý & Petříková, 2000).

Základem regulace jednoletých plevelů v cibuli bylo dříve preemergentní ošetření půdními přípravky, které se podle Petříkové et al. (2012) provádělo nejpozději do jedenácti dnů po výsevu, obvykle přípravky s účinnou látkou pendimethalin nebo aclonifen. Délku reziduálního působení těchto přípravků v půdě ovlivňuje mnoho povětrnostních a půdních faktorů, účinná látka použitého přípravku, případně pomocné látky (adjuvanty). Dobrá účinnost preemergentních herbicidů je však podmíněna dostatečnou půdní vlhkostí. Závlaha výrazně zvyšuje účinnost, zejména na jednoleté plevele. Ale podle Jursíka et al. (2016b) je možné závlahu provést až po aplikaci a její intenzita by neměla být vyšší než 10 mm. Jinak by mohlo dojít k proplavení herbicidu do zóny klíčení semen cibule (především na lehčích půdách), což by se mohlo projevit výraznou fytotoxicitou (horší vzházení). Dávku půdních preemergentních herbicidů je třeba také volit s ohledem na sorpční vlastnosti a zrnitostní složení půdy. Na lehčích půdách s nižší sorpční kapacitou je vhodné použít nižší dávky, než jsou do cibule registrovány, a to často i více než o polovinu. K lepší účinnosti přípravků vede i jejich mikroenkapsulace a pomalejší uvolňování do půdního roztoku (Herrmann et al. 2017). Přípravky s účinnou látkou S-metolachlor a dimethenamid-P lze také použít při preemergentním ošetření k rozšíření spektra působení, zejména na trávovité plevele, heřmánky a laskavce (Keeling et al. 1990; Herrmann et al. 2017). V zahraničí se preemergentně používá také propachlor, ethofumesate, oxadiazon, metribuzin nebo flufenacet (Ghosheh 2004; Qasem 2005b; Hussain et al. 2008).

Postemergentní ošetření cibule lze provádět až po vytvoření druhého listu cibule (Jursík et al. 2016). Od vzejití do fáze dvou až tří pravých listů je totiž cibule relativně citlivá vůči

většině kontaktních i půdních herbicidů. V tomto období lze doporučit ošetření porostu cibule jen v případě výrazného selhání preemergentní aplikace, když by hrozilo, že plevelé přerostou a jejich následná regulace již nebude z hlediska dostatečné účinnosti možná. Je však třeba výrazně snížit dávky herbicidu s ohledem na růstovou fázi cibule (Jursík & Soukup 2004). Obecně platí zásada, že čím nižší je růstová fáze cibule, tím nižší dávku přípravku je třeba aplikovat. Vhodnější jsou dělené aplikace, případně tank-mix kombinace (kontaktní a půdní herbicid) ve velmi nízkých dávkách herbicidů v poměrně krátkých intervalech pět až deset dní (Loken & Hatterman-Valenti 2010). Po ošetření přípravky, které vykazují vedle kontaktního účinku také kratší či delší reziduální působení v půdě a zabráňují vzcházení nových vůči herbicidu citlivých plevelů, je vhodné se vyvarovat jakékoliv kultivaci porostu, jinak dojde k porušení herbicidního filmu a na povrch půdy se dostanou nová semena plevelů, která mohou vzcházet a ošetření je pak třeba opakovat (Jursík & Soukup 2004). V žádném případě nelze ošetřovat porost cibule ve fázi prvního pravého listu. Pokud je ošetření provedeno příliš brzy nebo je použita vyšší dávka herbicidů, může dojít k poškození cibule, které může být i velmi výrazné (zbrzdění v růstu, nekrózy a deformace listů), přičemž v extrémních případech může docházet až k prořidnutí porostu (Ashton & Monaco 1991).

Kontaktními listovými herbicidy s účinnou látkou pyridate lze podle Jursíka (2004) citlivé plevelé regulovat až do fáze šesti až osmi pravých listů. Dvouděložné plevelé bývají po aplikaci pyridatu dostatečně potlačeny a nedochází k významnému poškození cibule (Kavaliauskaite 2009). Systemicky působícími listovými herbicidy (fluroxypyr) působí na plevelé dokonce ještě v pokročilejších fázích. Nicméně i u těchto přípravků klesá účinnost s růstovou fází plevelů (Jursík 2004). V případě intenzivnějšího výskytu vytrvalých plevelů se neobejdeme bez opakované aplikace fluroxypyru při horní hranici povolené do cibule, ale jak popisují Jursík & Soukup (2004), regulace vytrvalých dvouděložných plevelů by měla být řešena především v předplodině nebo v mezíporostním období. Při opakované aplikaci fluroxypyru bývají také dobře potlačeny zaplevelující brambory, ale může docházet ke snížení výnosu cibule (Boydston & Seymour 2002). Kromě již zmiňovaných herbicidů lze k postemergentní regulaci dvouděložných plevelů použít i bromoxynil (Cudney & Orloff 1988), který pravděpodobně bude v nejbližších letech v EU zakázán. Tento herbicid lze používat od druhého listu cibule (William et al. 2007). Avšak Loken & Hatterman-Valenti (2013) varují, že po jeho aplikaci dochází k retardaci cibule, v důsledku čehož zaznamenali snížení hmotnosti čerstvých cibulí. Bromoxynil je také vhodné použít k regulaci zaplevelujících brambor (Boydston & Seymour 2002). Norsworthy et al. (2007) uvádí, že postemergentně lze

také aplikovat flumioxazin, nejlépe pokud je cibule ve fázi tří až pěti listů. Na druhou stranu autoři varují, že flumioxazin může způsobit výrazné poškození cibule, hlavně pokud je aplikován v tank-mix kombinaci s jiným pesticidem. Herrmann et al. (2017) sledovali jeho vysokou fytotoxicitu zejména v takových případech, kdy byl aplikován společně s účinnými látkami dimethenamid-P, S-metolachlor nebo pendimethalin.

Trávovité plevely lze regulovat listovými graminicidy (Petříková et al. 2006). Sahoo et al. (2013) doporučují používat quizalofop a Jursík et al. (2016b) doporučují fluazifop nebo propaquizafop. Hlavně tehdy, pokud se nepodařilo potlačit jednoleté plevelné trávy půdními herbicidy. Listové graminicidy velmi dobře potlačují také pýr plazivý a výdrol obilovin. Cibule tyto přípravky relativně dobře snáší, nicméně je vhodné je aplikovat až po vytvoření třetího listu cibule a nekombinovat je s kontaktními přípravky proti dvouděložným plevelům. Účinnost většiny listových graminicidů na lipnici roční je minimální, pouze haloxyfop vykazuje částečnou účinnost i na tento plevel.

2.1.8. Agrotechnická opatření ovlivňující účinnost a selektivitu herbicidního ošetření

2.1.8.1. Zakrývání porostu netkanou transparentní textilií

Transparentní netkaná textilie se používá v zelinářství především za účelem urychlení dozrávání, ochraně proti nízkým teplotám a zvýšení celkového výnosu a kvality produkce (Gimenez et al., 2002; Lee et al., 2009), což je důležité především v chladnějších oblastech pěstování nebo na jaře, kdy jsou nižší teploty a hrozí poškození produkce mrazem (Ahn et al. 2003). Zakrytí transparentní netkanou textilií však může výrazně ovlivňovat také plevely, které pod textilií rostou společně s plodinou. Zejména teplomilné plevely (C4 metabolismus) mohou vzcházet a vyvíjet se pod textilií daleko rychleji než na nezakryté půdě. Jejich následná regulace po odkrytí porostu bývá daleko problematictější (Knott, 2002).

V důsledku zakrytí porostu netkanou textilií dochází k výrazným změnám podmínek prostředí pod textilií. Lze tedy důvodně očekávat, že půdní herbicidy, které se aplikují před zakrytím porostu, se budou chovat odlišně než v případě jejich použití na nezakrytý porost.

Zakrytím netkanou textilií může být snížena selektivita herbicidu. Herbicid se pomaleji rozkládá a odpařený herbicid může být snadněji přijímán listy zeleniny. Předpokládá-li se tedy zakrytí porostu netkanou textilií, je třeba snížit dávku půdního herbicidu o 30-50 % a to

především u velmi raných výsadeb v březnu, které jsou herbicidem nejčastěji poškozovány. Herbicid je totiž pomaleji metabolizován při nižších teplotách. Velmi důležité je toto opatření především u herbicidů obsahujících účinnou látku pendimethalin (významná degradace ultrafialovou složkou slunečního záření) a clomazone (vysoká intenzita těkání). Problémem jsou také vytrvalé plevele, na které půdní herbicidy obvykle příliš neúčinkují, mohou se tedy pod netkanou textilií nerušeně vyvíjet (Jursík et al. 2016b).

2.1.8.2. Závlaha

Závlaha velmi výrazně zvyšuje výnos i kvalitu polní zeleniny (Kosterna et al. 2011). Imtiyaz et al. (2000) potvrdili, že se zvyšujícím se množstvím závlahy se zvyšuje výnos brokolice, mrkve a zelí. Velmi výrazně však ovlivňuje také účinnost a selektivitu herbicidů používaných v zeleninách (Huang et al. 2017). Za sucha je účinnost půdních herbicidů obvykle nižší (Zhang et al. 2001, Zanatta et al. 2008). Naopak intenzivní srážky nebo závlaha krátce po aplikaci mohou způsobovat výrazné poškození plodiny (Jursík et al. 2015; Saha et al. 2019), zejména u plodin jejichž selektivita vůči herbicidu je založena pozičně a jejich schopnost metabolizovat herbicid je omezena (Sondhia 2013). U většiny preemergentních herbicidů je na etiketě doporučená mírná závlaha brzy po aplikaci (Saha et al. 2019).

Smith et al. (2016) pozoroval, že množství dodané závlahy má významný vliv na účinnost S-metolachloru a acetochloru. Účinnost S-metolachloru byla nejvyšší na pozemcích, které dostaly závlahu 6,4 a 12,7 mm a nejnižší na pozemku bez dodatkové závlahy. Účinnost acetochloru se při závlaze vyšší než 3,2 mm nelišila. Rozdíl v účinnosti byl pozorován pouze při nízké úrovni závlahy 1,6 mm. Avšak u fomesafenu a dicamby nebyl pozorován vliv závlahy na účinnost na plevele.

Khan et al. (2005) ale upozorňují, že v jejich pokusech byla více zaplevelená herbicidní varianta se závlahou. Dodaná vlaha zřejmě napomohla následnému vzcházení plevelů.

2.1.8.3. Vliv adjuvantů na účinnost a selektivitu půdních herbicidů

Adjuvanty jsou látky zvyšující účinnost herbicidu tím, že zvyšují a urychlují jeho příjem, zvyšují pokryvnost postřikové jichy a zvyšují přilnavost postřikových kapének na cílových površích (Baratella et al. 2016). V posledních letech se stále více využívá možnost

aplikace některých adjuvantů s půdními herbicidy. Půdní adjuvanty ovlivňují fyzikální vlastnosti postřikové jíchy a zlepšují kvalitu postřiku a stabilizují herbicid v půdní prostředí (Locke et al. 2002). Jejich hlavní význam však spočívá v tom, že mohou snižovat fytotoxicitu těch herbicidů, jejichž selektivita je založena pozičně. Některé adjuvanty totiž mohou omezovat proplavování herbicidu do spodních vrstev půdy (Reddy 1993), kde může herbicid působit fytotoxicky. Významné uplatnění proto nalézají především u mělčeji setých citlivých plodin, jako je řepka, mák, či některé zeleniny (Jursík et al. 2018). Jako půdní adjuvanty se uplatňují především polymerní látky, které poutají molekuly herbicidu na půdní koloidy a tím zabraňují jejich vertikálnímu pohybu v půdě (Kočárek et al. 2018).

2.2. Rezidua herbicidů v zelenině

2.2.1. Rezidua pesticidů a jejich detekce

Jako rezidua označujeme zbytek pesticidu nebo jeho rozkladných produktů, které přetrvávají na rostlině nebo v rostlině po aplikaci pesticidu (Pospíšilová & Pospíšil 1975). Podle společné definice FAO (Food and Agriculture Organization) a WHO (World Health Organization) je reziduum každá cizorodá látka přítomná v různých substrátech (půda, voda, rostliny, krmivo, potravina) v důsledku používání pesticidů (Tóth 2001).

Lozowicka et al. (2012) uvádí, že pokud je pesticid používán v souladu s jeho registrací, neměly by jeho rezidua překročit maximální limit reziduí MRL (maximum residue levels). MRL jsou stanovovány zpravidla na národní i mezinárodní úrovni. Hodnoty MRL stanovené EU jsou brány jako velmi vysoký standard, který přebírá řada zemí mimo EU. Uvažuje se zbytková koncentrace v plodinách za podmínek správné zemědělské praxe a z toho se vypočítá denní příjem. Ten musí být vždy nižší, než toxikologicky přijatelná denní dávka – ADI (Acceptable Daily Intake) a akutní referenční dávka – ARfD (Acute Reference Dose). ADI odráží chronickou toxicitu, tedy množství sloučeniny v potravine, přepočtené na kg tělesné hmotnosti, které může být konzumováno denně po celý život bez významnějších zdravotních rizik. ARfD odráží akutní toxicitu, což je odhad množství sloučeniny v potravine, přepočtené na kg tělesné hmotnosti, které může být přijato krátkodobě, zpravidla v jednom jídle nebo jednom dni, bez významnějších zdravotních rizik (Kocourek 2013).

MRL jsou podle Holého et al. (2011) zpravidla udávány v mg rezidua pesticidu na kg sklizeného produktu a mohou se lišit v závislosti na druhu plodiny nebo části sklizeného

produktu. Většina MRL se pohybuje v rozmezí od 0,01 do 50 mg/kg (Kocourek 2013). MRL v plodech a ostatních jedlých částech rostlin jsou uvedeny v nařízení Evropského parlamentu a Rady č. 396/2005 a pozdějších předpisech a jsou shodné pro všechny státy EU (Holý et al. 2011).

Rezidua pesticidů by v ideálním případě neměla být v potravině přítomna vůbec, a proto je žádoucí, aby po splnění své funkce byla rychle degradována, vytékala nebo byla omyta (Kocourek 2013). Podle Amjada et al. (2013) je bezpečnost potravin závažnou otázkou. Používání pesticidů při produkci zeleniny je velmi časté, ale zatím nebyla vytvořena žádná přesná strategie (modely), která by stanovovala optimální dávky herbicidů pro konkrétní podmínky a situace a zajišťovala minimální zatížení zeleniny i prostředí těmito látkami. Nejvíce může být lidské zdraví ohroženo v případech, kdy pěstitelé ignorují doporučené ochranné lhůty mezi aplikací herbicidu a sklizní (Baig et al. 2009; Wang et al. 2013). Jursík & Crha (2014b) doporučují používat pouze takové přípravky, které jsou v rostlině rychle degradovány. Pokud to není možné, je potřeba ošetřovat problematickými přípravky s dostatečně dlouhou dobou před sklizní. Z tohoto pohledu je rezidui herbicidů nejvíce ohrožena zelenina s krátkou vegetační dobou, především kedlubny, salát, ředkvičky.

Podle Lehotaye et al. (2010) je nejpoužívanější metodou pro extrakci reziduí pesticidů QuEChERS (quick, easy, cheap, effective, robust and safe – rychlá, jednoduchá, levná, efektivní, solidní a bezpečná). Jedná se o metodu disperzní extrakce tuhou fází. Tato technika byla původně vyvinuta pro extrakci a přečištění vzorků před reziduální analýzou pesticidů v ovoci a zelenině a má velmi dobrý a přesný limit detekce a to 0,001 mg/kg (Farkas et al. 2014). Dá se tak jednoduše a rychle určit relativně velké množství reziduí pesticidů (Frenich et al. 2012; Kováčová et al. 2014). Metoda QuEChERS bývá využívána ke stanovení reziduí pesticidů v zelenině po celém světě společně s následnou plynovou chromatografií (Abad et al. 2010). Maštovská et al. (2001) vyvinula rychlou analytickou metodu pro stanovení dvaceti pesticidů za použití nízkotlaké plynové chromatografie s hmotnostním spektrometrem (LP-GC-MS). Touto metodou bylo úspěšně analyzováno mnoho vzorků zeleniny v různých laboratořích (Donkor et al. 2015). S lehkou modifikací se s ní dají současně měřit i další podobné pesticidy a jejich degradované produkty v zelenině (Li et al. 2016).

2.2.2. Rezidua v zelenině

Pro zajištění vyšší produkce a její estetické kvality využívají pěstitelé zeleniny mnoho pesticidů po celou dobu vegetace zelenin (Baig et al. 2009). Proto Lozowicka et al. (2012) varuje, že rezidua v zelenině představují možné riziko pro spotřebitele a jeho zdraví. Naproti tomu Winter (1992) publikoval, že detekovaná rezidua pesticidů přesahující MRL málokdy představují toxikologicky významné riziko. Podle Holého et al. (2011) je v ČR nejčastěji hodnocen výskyt reziduí pesticidů ve vzorcích zeleniny od českých pěstitelů. Žádný z jimi hodnocených vzorků zeleniny, zahrnující cibuli, květák, mrkev a salát, nepřekročil hodnoty MRL. Zjištěné hodnoty reziduí pesticidů byly hluboko pod tímto limitem.

Délka degradace herbicidů v zelenině je značně rozdílná. U hodnocených látek se pohybuje v širokém rozmezí, například rezidua pendimethalinu v celeru klesla téměř za dva měsíce na polovinu, ale rezidua propyzamidu v salátu klesla už po dvou týdnech více než desetkrát (Holý et al. 2011). Některé účinné látky jsou v zelenině pravděpodobně rychle metabolizovány nebo je jejich kořenový příjem či transport v rostlině omezen (Šuk & Jursík 2016). Pomalá degradace půdních herbicidů souvisí s jejich dlouhým reziduálním účinkem na plevele a s jejich stabilitou v půdním prostředí. Také pěstovaná zelenina má velký vliv na rychlost degradace pesticidu. Například květák má z brukvovité zeleniny nejpomalejší proces degradace reziduí (Kocourek et al. 2017).

Ke snížení obsahu reziduí herbicidů mohou přispět i některá agrotechnická opatření jako je například doba pokrývání porostů netkanou textilií nebo závlaha (Amjad et al. 2013; Sondhia 2013).

2.2.3 Akční prahy a akční ochranné lhůty pro nízkoreziduální a bezreziduální produkci

Nízkoreziduální produkce je zemědělská produkce, při které je chemická ochrana proti škodlivým organismům prováděna tak, že rezidua použitých přípravků v produktech jsou pod limitem předem stanoveného a vyžadovaného akčního prahu, například pod 25 % nebo 50 % MRL (Kocourek et al. 2013; Kocourek et al. 2014; Golles et al. 2015).

Bezreziduální produkce je zemědělská produkce, při které je chemická ochrana proti škodlivým organismům prováděna tak, že rezidua použitých pesticidů ve sklizených produktech nepřesahují limit 0,01 mg/kg. Limit 0,01 mg/kg je shodný s limitem využívaným v současnosti pro produkty určené pro dětskou výživu a představuje nejvyšší přípustné,

toxikologicky přijatelné množství pesticidů v plodinách (Commission Directive 2006/141/EC; Kocourek et al. 2013; Kocourek et al. 2014; Kocourek et al. 2017).

Ochranná lhůta (OL) je doba ve dnech, která se počítá od termínu poslední aplikace pesticidu do sklizně plodiny a je vždy uváděna pro konkrétní přípravek a konkrétní plodinu. OL je stanovena úředně a je uváděna na etiketě přípravku a v Seznamu povolených přípravků na ochranu rostlin, její dodržení je závazné. Pokud je OL dodržena nemělo by za obvyklých podmínek nastat překročení hodnoty MRL (Jursík et al. 2016b).

Stanovení akčních ochranných lhůt je při používání pesticidů nezbytné pro zajištění podmínek pro nízkoreziduální nebo bezreziduální produkci potravin nebo surovin pro výrobu potravin (Kocourek et al. 2013). Akční ochranné lhůty (AOL) vyjadřují dobu ve dnech od termínu poslední možné aplikace přípravku do sklizně produktu. AOL jsou vždy uváděny pro přípravek a konkrétní plodinu a při jejich respektování je garantováno dodržení předem stanovené hodnoty reziduí herbicidů odpovídající akčnímu prahu. Například AOL₂₅ je akční ochranná lhůta, při jejímž dodržení nebude ve sklizeném produktu více než 25 % MRL konkrétního pesticidu (Kocourek et al. 2013; Kocourek et al. 2014). Akční ochranné lhůty bývají stanoveny na základě akčních prahů pro nízkoreziduální produkci nebo podle limitu pro bezreziduální produkci. Akční prahy pro nízkoreziduální produkci jsou nejvyšší přípustné limity toxikologicky přijatelného množství herbicidů v potravinách, které odpovídá předem stanovené požadované hodnotě procent MRL platných pro konkrétní plodinu. V současné době jsou tyto akční prahy využívány hlavně obchodními řetězci jako limit pro plodiny z nízkoreziduální produkce zelenin. Hodnoty akčních prahů se podle odběratelů v současnosti pohybují v širokém rozmezí od 10 % do 50 % MRL.

2.2.4. Chování herbicidů v půdě

Bez ohledu na způsob a termín aplikace se všechny herbicidy dostávají do kontaktu s půdou, ať již jsou na ni přímo aplikovány nebo jsou smyty z listů plodiny či plevelů. Z hlediska účinnosti herbicidu je důležitá především koncentrace herbicidu v půdním roztoku. Vlhkost půdy a intenzita dešťových srážek (zejména bezprostředně před a po aplikaci herbicidu) tak výrazně ovlivňuje aktivitu půdních herbicidů (Jursík et al. 2013).

Intenzita transportu účinné látky v půdě závisí na její rozpustnosti ve vodě, sorpci a perzistenci v půdě. Na chování herbicidů v půdě má hlavní vliv jejich rozpustnost ve vodě.

V případě jejich proplavení do spodních vrstev půdního profilu (kde je výrazně redukován obsah půdní organické hmoty a půdních mikroorganismů) se však jejich perzistence v půdě zvyšuje. Z vnějších faktorů, které ovlivňují transport herbicidů v půdním prostředí, má největší význam zrnitostní složení, hydraulické vlastnosti půdy a obsah půdní organické hmoty. Zatímco na lehčích půdách (které obsahují více nekapilárních pórů) dochází nejčastěji k vertikálnímu proplavení herbicidů, na půdách těžších je vertikální pohyb omezený. Na těžších půdách se pak uplatňuje především povrchový odtok (Wischmeier & Mannering 1969) a do spodních vrstev půdního profilu jsou herbicidy transportovány především preferenčními cestami (Renaud 2004).

Mobilita herbicidu v půdním prostředí je velmi důležitá jak z hlediska fytotoxicity (u herbicidů, jejichž selektivita je založena pozičně), tak z hlediska možné kontaminace povrchových a podzemních vod. Proto jsou nově účinné látky herbicidů z tohoto hlediska velmi přísně testovány, a pokud je jejich mobilita v půdě příliš vysoká, dochází k omezování jejich používání (PHO, dávkování, izolační vzdálenosti) či jejich úplnému zákazu. Pro posouzení rizika proplavení herbicidu se nejčastěji používá GUS leaching index (Gustafson 1989), který se vypočítává na základě rozpustnosti ve vodě a poločasu rozkladu herbicidů. Čím vyšší hodnoty dosahuje, tím je vyšší riziko proplavení.

V povrchových vodách ČR jsou nejčastěji nacházeny terbuthylazin, chlorotoluron, isoproturon, diuron, acetochlor, metolachlor, metazachlor a jejich metabolity. V sedimentech vodních toků bývají nejčastěji nacházeny terbuthylazin, terbutryn, diuron, linuron, alachlor.

Na degradaci herbicidu po aplikaci má vliv mnoho faktorů. Rychlost degradace pesticidů v půdě ovlivňuje především půdní vlhkost a teplota (Walker 1987). Pesticidy mohou být rozloženy jednoduchými chemickými procesy, například hydrolýzou. Daleko důležitější pro degradaci herbicidu v půdě jsou však pochody řízené mikroorganismy. Degradční procesy v půdě jsou představovány transformací molekuly, postupným odbouráváním nebo inaktivací fytotoxických částí (toxoforů) molekuly (Jursík et al. 2018). Půdní mikroorganismy mají pro degradaci herbicidů v půdě zásadní význam. Aktivita půdních mikroorganismů je ovlivněna především půdní vlhkostí, půdní teplotou, obsahem organické hmoty, pH půdy, obsahem kyslíku a zásobeností živinami (Walker et al. 1989; Sarmah et al. 2000). V suché, chladné a na živiny chudé půdě se mikrobiální aktivita velmi významně snižuje, podobně jako při nedostatku kyslíku v půdě, takže na utužených půdách nebo po vytvoření půdního škraloupu bývá degradace herbicidů pomalejší. K chemické degradaci dochází zpravidla v půdním roztoku a

na fázovém rozhraní pevná-kapalná fáze nebo v sedimentech. Hlavními degradačními procesy, které se odehrávají v půdním roztoku, jsou hydrolyza a oxidačně-redukční reakce. Chemická degradace probíhá většinou v silně kyselém nebo zásaditém prostředí. Pokud hodnota pH půdy nabývá tyto extrémní hodnoty, snižuje se výrazně mikrobiální degradace a zvyšuje se podíl chemické degradace (Jursík et al. 2018). Méně stabilní molekuly herbicidů (pendimethalin, oxyfluorfen a některé substituované močoviny) jsou náchylné ke světelnému rozkladu (fotolýze). Tyto herbicidy je vhodné (především za intenzivního slunečního svitu) ihned po aplikaci zapravit do půdy (Tagle et al. 2005).

Rychlost rozkladu herbicidu může být výrazně zpomalena, pokud dojde k jeho proplavení/zapravení do podorničí, kde je obvykle malá mikrobiální aktivita a celkově nepříznivé podmínky pro degradaci (Rice et al. 2002).

3. Cíle práce a hypotézy

Hlavním cílem disertační práce je vypracování postupu pro optimalizaci regulace plevelů v porostech vybraných druhů polní zeleniny se zaměřením na účinnost, selektivitu a omezení reziduí herbicidů ve sklizených produktech. Za tímto účelem byly stanoveny následující vědecké hypotézy:

- 1) Obsah reziduí herbicidů v zelenině lze snížit některými agrotechnickými opatřeními a prodloužením ochranných lhůt.
- 2) Dávky herbicidů používaných v zelenině lze výrazně snížit využíváním vhodných agrotechnických opatření, při zachování vysoké účinnosti a selektivity ošetření.

4. Publikované práce

4.1. Vliv zakrývání netkanou textilií na účinnost a selektivitu pendimethalinu v salátu

Jursík M, Hamouzová K, Soukup J, Šuk J. 2016. Effect of nonwoven fabric cover on the efficacy and selectivity of pendimethalin in lettuce. *Scientia Horticulturae*. **200**: 7-12.



Effect of nonwoven fabric cover on the efficacy and selectivity of pendimethalin in lettuce



M. Jursík^a, K. Hamouzová, J. Soukup, J. Šuk

^a Department of Agroecology and Biometeorology, Czech University of Life Sciences in Prague, Czech Republic

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 August 2015

Received in revised form

22 December 2015

Accepted 23 December 2015

Available online 11 January 2016

Keywords:

Herbicide efficacy

Herbicide phytotoxicity

Photosynthesis characteristics

Weeds

Vegetable crops

ABSTRACT

The objective of this study was to compare the effect of nonwoven fabrics used for growth acceleration in lettuce on the efficacy and selectivity of pendimethalin herbicide at varying application rates. Small plot experiments were conducted with head lettuce in Prague, Czech Republic during 2011–2013. Herbicide efficacy was higher in plots covered by nonwoven fabric, but selectivity was influenced negatively. Nonwoven fabric cover increased the efficacy of pendimethalin applied at rates of 600 and 1200 g ha⁻¹. The highest efficacy was recorded against *Chenopodium album* (96–100%) and *Amaranthus retroflexus* (>90%). Efficacy against *Echinochloa crus-galli* ranged between 85% and 100%, against *Solanum physalifolium* between 77% and 100%, and against *Mercurialis annua* between 72% and 99%. Selectivity of pendimethalin to lettuce was lower in 2014, when intensive precipitation was recorded during the growing season. Lettuce injury (15–27%) was recorded on plots covered by nonwoven fabric treated by pendimethalin at a rate of 1200 g ha⁻¹. The effect of pendimethalin on lettuce yield was not significant. Changes in photosynthesis rates can be assigned more to the effect of fabric coverage than to that of pendimethalin. The values obtained were affected both by the density of stomata as well as their distribution on leaves, and these vary in response to environmental conditions.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Lettuce (*Lactuca sativa* L.) is an intensively managed vegetable crop with little tolerance for weeds. Although weeds usually do not cause dramatic decrease in lettuce yield, it is very important to keep the canopy free of weeds. Not only do weeds compete with the crop and delay the date of harvest, but even in relatively small amounts they also may reduce quality and cause problems during harvest (Knott, 2002). Lettuce canopies infested by weeds are also usually more vulnerable to fungal infection.

The critical weed-free period for lettuce is relatively short (2–4 weeks) and it is affected by many environmental factors, such as phosphorus supply (Odero and Wright, 2013). The crop should be maintained without weeds during this period, as otherwise yield may be reduced by as much as 65% (Giancotti et al., 2010; Santos et al., 2004).

Mechanical weed control, mulching, or several different herbicides may be used in lettuce. Among a few others, herbicide active ingredients which may be used include propryzamide,

bensulide, pendimethalin, S-metolachlor, flufenacet, clomazone, chlorpropham, and trifluralin (Henderson and Webber, 1993; Knott, 2002; Umeda, 2000; White, 1999). Herbicides usually are applied prior to planting lettuce.

Pendimethalin is a widely used herbicide which controls several broadleaf and grass weeds and is labeled for use in many crops, including lettuce. Pendimethalin inhibits the polymerization of tubulin basic units as well as the creation of protofilaments and consequently also of microtubules and the entire spindle apparatus (Vaughn and Lehnen, 1991). According to Herbicide Resistance Action Committee classification, pendimethalin is included into the K1 mode of action group. Pendimethalin can be used only in transplanted lettuce and must be applied prior to transplantation at an application rate between 400 and 1500 g ha⁻¹ active ingredient (a.i.). Under dry conditions, pendimethalin needs to be incorporated into the soil by irrigation (Odero and Shaner, 2014). Unfortunately, mechanical incorporation of pendimethalin prior to planting lettuce leads to a decrease of efficacy, as does mechanical planting (Neuweiler and Krauss, 2008).

Lettuce is very sensitive to many abiotic stresses, including stress from herbicides. Herbicides may cause significant crop injury, especially if lettuce is exposed to other stresses such as extreme temperatures, intense rainfall or irrigation, strong winds,

^a Corresponding author at: Czech University of Life Sciences in Prague, Kamýčká 129, 165 21 Prague, Czech Republic. Fax: +420 224 382 780.
E-mail address: jursik@af.czu.cz (M. Jursík).

Table 1
Weed infestation on untreated check in experimental years.

Weed species	Weed density plants m ⁻²		
	2012	2013	2014
<i>Amaranthus retroflexus</i>	5–10	10–20	10–20
<i>Chenopodium album</i>	20–40	20–40	10–20
<i>Echinochloa crus-galli</i>	5–10	10–20	5–10
<i>Mercurialis annua</i>	10–20	10–20	5–10
<i>Solanum physalifolium</i>	5–10	10–20	10–20

and salinity. In these cases, herbicides which under normal circumstances are selective may cause phytotoxicity. The main symptoms of lettuce phytotoxicity are root growth inhibition, crop stunting, and yield reductions (Ticks and Kerns, 1996).

Transparent nonwoven fabric covers are primarily used to accelerate the development of lettuce as well as to increase yield and harvest quality (Gimenez et al., 2002; Lee et al., 2009), which aspects are particularly important during the low-temperature part of the season (Ahn et al., 2003). Fabric can also influence weeds, by accelerating their growth and development. Especially thermophilic weeds (with C4 metabolism) may germinate and grow rapidly under the fabric cover, and after removal of the fabric cover weeds could be difficult to control even mechanically (Knott, 2002).

Due to modification of environmental conditions, fabric covers may influence the efficacy and selectivity of herbicides. The objectives of this research were to compare the effects of a fabric cover on the efficacy and selectivity of pendimethalin herbicide applied to lettuce at varying rates, as well as to evaluate its effect on weeds and the influence on the photosynthetic activity of lettuce.

2. Materials and methods

Plot field trials were carried out on head lettuce (variety 'Elenas') in Prague, Czech Republic, Central Europe (300 m a.s.l., 50°7'N, 14°22'E) from 2012 to 2014. The study region is characterized by a temperate climate (annual mean air temperature around 9 °C, mean annual precipitation total near 500 mm). The experimental fields' soil was classified as Haplic Chernozem and had clay content of 19%, sand content of 25%, silt content of 56% (silt loam soil), soil pH_{KCl} of 7.2, and sorption capacity of 212 mmol⁽⁺⁾ kg⁻¹. Nutrient content was 156 µg g⁻¹ P, 275 µg g⁻¹ K, 177 µg g⁻¹ Mg, and 7984 µg g⁻¹ Ca.

Before lettuce planting, the soil was fertilized with 60, 27, and 53 kg ha⁻¹ of N, P, and K, respectively. Maize was the previous crop in all experimental years. The previous crop had been treated with tank mix combination bromoxynil (375 g ha⁻¹; Pardner 22.5 EC[®], 225 g L⁻¹) + tembotrione (66 g ha⁻¹; Laudis OD[®], 44 g L⁻¹). The trials were arranged in a split plot design with herbicide treatment as the main plot and nonwoven fabric cover as the subplot. Three replications per herbicide treatment were arranged in a randomized complete block design. The area of the main plot was 21 m² (2.1 × 10 m). The experimental field was infested by *Chenopodium album* L., *Echinochloa crus-galli* L., *Amaranthus retroflexus* L., *Mercurialis annua* L., and *Solanum physalifolium* Rusby. Weed density for individual species are given in Table 1. In the experimental year 2013, the trial was damaged by frost.

Table 2
Soil and weather condition on plots covered and not covered by nonwoven fabric.

Year	Days of growing season	Plots uncovered by fabric			Soil temperature °C			Plots covered by fabric			Soil temperature °C		
		Soil moisture m ³ m ⁻³			Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
2012	54	0.095	0.021	0.272	13.4	4.7	25.1	0.059	0.002	0.234	14.9	7.9	20.5
2013	48	0.151	0.052	0.300	13.9	8.0	20.4	0.027	0.011	0.044	15.9	10.4	22.1
2014	55	0.103	0.034	0.263	13.3	7.1	22.5	0.251	0.134	0.438	14.5	8.5	22.2

Stomp 400 SC herbicide (pendimethalin 400 g L⁻¹; manufactured by BASF SE, Ludwigshafen, Germany) was applied at two reduced rates (600 g ha⁻¹ and 1200 g ha⁻¹ a.i.) several hours before planting on the same day the lettuce was planted. The maximum registered rate of pendimethalin for lettuce is 1,600 g ha⁻¹. The experiments included untreated check (natural weed infestation without chemical and mechanical weed control) and hand-weeded check (weeds were removed by hand at two-week intervals through the entire growing season) treatments. Herbicide was applied using a small-plot sprayer with Lurmark 015F110 nozzles at a spray volume of 250 L ha⁻¹ and pressure of 0.2 MPa. Lettuce was transplanted on 28 March 2012, 9 April 2013, and 27 March 2014. Row spacing was 0.3 m and in-row plant spacing 0.3 m. After lettuce planting (same day), subplots (10 m²) were covered by a transparent (white) nonwoven fabric (Novagryl 19 g m⁻²). After planting, 10 mm of sprinkle irrigation was applied. Soil temperature and moisture (5 cm below the surface) were recorded using a Microlog V3A datalogger at 1-h intervals on the covered and non-covered plots (Table 2). The fabric was removed 3 weeks before expected harvest.

A percentage scale from 0% to 100% was used to assess herbicide efficacy and crop injury (phytotoxicity) according to the European and Mediterranean Plant Protection Organisation (EPPO) 1/2 14 guidelines. The selectivity assessment was performed 1 week before and 1 week after the fabric was removed. The efficacy assessment was performed 1 week after the fabric was removed.

Gas exchange in photosynthesis as an indirect assessment of selectivity was conducted twice, on 28 April 2012 and 30 April 2014. These dates were 5 weeks after herbicide treatment and the measurements were taken in fully expanded leaves located in the middle portion of the plant.

A portable infrared gas analyzer (CIRAS2, PPSystems, UK) was used to estimate net photosynthetic rate (P_N), transpiration rate (E), stomatal conductance (g_s), and intercellular CO₂ concentration (C_i). The number of stomata on the leaves' upper and lower epidermis was counted prior to measurement by taking an impression of the epidermis using clear nail polish. Microscope (100×) magnification was used and pictures were taken. The images were processed in Adobe Photoshop CS5 software to count the number of stomata.

Two samples of both hand-weeded control and treated plants were used for gas exchange measurements. The gas exchange analyzer was equipped with an external light source consisting of blue-red light-emitting diodes and a CO₂ control module set to 365 ppm. Measurements were recorded automatically at the CO₂ concentration set point when photosynthesis had equilibrated. The measurements were made between 9:00 and 11:00 local time. The values of the parameters were adjusted to the same reference temperature of 25 °C.

Harvest of head lettuce was carried out on 28 May 2012 and 26 May 2014. Ten lettuce heads were collected from the central area of each plot (5 m²).

Using the Statistica ver. 12 software package (StatSoft, Inc., 2013), results were tested by analysis of variance (ANOVA) followed by Tukey's post hoc comparisons to corresponding controls once the differences among mean values had been determined. ANOVA effects and differences were considered significant at p < 0.05.

Bartlett's test was used to test if obtained data did not violate the assumption of homogeneity of variance. Because in one case Bartlett's test showed that the data are heterogeneous, arcsine square root percent transformation was carried out and the multiple comparisons test was applied to the transformed data (Table 3).

3. Results

3.1. Herbicide efficacy

The efficacy of pendimethalin on *A. retroflexus* was high and ranged from 90% to 100% in all experimental years. Efficacy was not significantly ($p=0.05$) affected by nonwoven fabric cover in any of the experimental years. Any effect of pendimethalin application rate was significant only in 2013. At the application rate of 600 g ha⁻¹ in that year, efficacy was 90% on noncovered plot and 95% on plots with the fabric cover. At the 1200 g ha⁻¹ application rate, the efficacy was 99% in 2013 regardless of whether or not a fabric cover was used (Table 3).

Efficacy greater than 99% for pendimethalin on *C. album* was recorded in 2013 and 2014 without significant differences among tested treatments (Table 4). In contrast, significant differences in efficacy on *C. album* were recorded in 2012, when plots covered by fabric showed significantly higher efficacy (100%) compared to noncovered plots (96% and 98%).

Echinochloa crus-galli was fully controlled only in 2014 (Table 3). Efficacy was significantly affected by cover only in 2012 and 2013. In those years, the lowest efficacy (92% and 85%) was recorded after application of pendimethalin at application rate 600 g ha⁻¹ on plots not covered by fabric. The efficacy of the other tested treatment was 95–99% in 2012 and 99–100% in 2013. The effect of application rate on pendimethalin efficacy was significant only in 2013.

The weed species with lowest sensitivity was *M. annua*, but there were large differences among experimental years (Table 3). Efficacy did not exceed 90% in 2013. In contrast, efficacy of 98–99% was recorded in 2014. Efficacy was significantly affected by fabric cover only in 2012 and by pendimethalin application rate in 2013.

Solanum physalifolium occurred on experimental fields only in 2012 and 2014 (Table 3). No significant differences in efficacy were recorded in 2014, when efficacy was 99–100%. In contrast, efficacy was significantly affected by fabric cover and application rate in 2012, when the lowest efficacy (77%) was recorded on uncovered plots treated at the lower pendimethalin application rate and highest efficacy (97%) was on covered plots treated at the higher application rate.

Efficacy of pendimethalin on all tested weeds was significantly affected by experimental year (Table 4). The highest and the lowest efficacy was recorded in 2014 and in 2012, respectively.

3.2. Herbicide phytotoxicity

In 2012, low visual phytotoxicity (less than 4%) was recorded 5 weeks after planting on most plots treated by herbicide. Only on plots treated with the lower pendimethalin application rate (600 g ha⁻¹) were no symptoms of phytotoxicity recorded. Visual symptoms of phytotoxicity were gradually disappearing during the following 2 weeks, and at 7 weeks after planting (shortly before harvest) no phytotoxicity was recorded on any plots (Table 5).

Higher herbicide injury to lettuce was recorded in 2014. Although 5 weeks after pendimethalin application (planting) phytotoxicity level did not exceed 15%, phytotoxicity did increase in some plots during the following 2 weeks. The highest rate of lettuce injury (27%) was recorded on plots treated with pendimethalin at the application rate of 1200 g ha⁻¹ and with nonwoven fabric cover. Phytotoxicity on this treatment was significantly higher compared

Table 3
Efficacy of tested herbicide treatments on tested weeds in experimental years (mean ± standard deviation).

Treatment (g ha ⁻¹ a.i.)	<i>Amaranthus retroflexus</i>		<i>Chenopodium album</i>		<i>Echinochloa crus-galli</i>		<i>Moraria sativum</i>		<i>Solanum physalifolium</i>					
	2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2014				
600	Yes	95.0 ± 5.0 b	99.7 ± 0.6 a	99.7 ± 0.6 a	100.0 ± 0.0 a	97.3 ± 2.5 ab	98.1 ± 2.1 b	100.0 ± 0.0 a	86.7 ± 2.9 ab	71.7 ± 10.4 a	99.0 ± 0.0 b	83.3 ± 5.8 ab	99.3 ± 1.2 a	
	No	96.7 ± 1.5 a	90.0 ± 0.0 a	99.3 ± 0.6 a	96.3 ± 1.2 a	100.0 ± 0.0 a	100.0 ± 0.0 a	100.0 ± 0.0 a	100.0 ± 0.0 a	98.3 ± 2.9 ab	78.3 ± 7.6 a	98.0 ± 0.0 a	76.7 ± 5.8 a	98.7 ± 0.6 a
1200	Yes	100.0 ± 0.0 a	99.3 ± 1.2 b	99.7 ± 0.6 a	100.0 ± 0.0 a	100.0 ± 0.0 a	99.3 ± 0.6 b	99.9 ± 3.3 b	100.0 ± 0.0 a	91.7 ± 2.9 b	86.3 ± 2.9 bc	99.0 ± 0.0 b	97.3 ± 2.5 c	100.0 ± 0.0 a
	No	94.0 ± 3.8 a	99.3 ± 1.2 b	100.0 ± 0.0 a	98.3 ± 0.6 a	100.0 ± 0.0 a	95.0 ± 5.0 ab	99.1 ± 4.7 b	100.0 ± 0.0 a	85.0 ± 5.0 ab	90.0 ± 5.0 c	99.0 ± 1.0 b	87.7 ± 2.9 b	99.0 ± 1.0 a
A: Pendimethalin rate (p-value)		NS	NS	NS	NS	NS	0.001	NS	NS	NS	NS	0.002	NS	
B: Fabric cover (p-value)		NS	NS	>0.001	NS	NS	0.022	NS	0.032	NS	NS	0.010	NS	
A × B (p-value)		NS	NS	NS	NS	NS	0.004	NS	NS	NS	NS	NS	NS	

NS, not significant. Values compared by one-way ANOVA to determine the variant effect. Values followed by different letters are significantly different compared to corresponding column values, according to Tukey's test ($\alpha=0.05$).

Table 4
Effect of the experimental year on the efficacy on tested weeds (mean ± standard deviation).

Experimental year	<i>A. retroflexus</i>	<i>C. album</i>	<i>E. crus-galli</i>	<i>M. annua</i>	<i>S. physalifolium</i>
-Efficacy (%)					
2012	96.6 ± 3.6 a	98.6 ± 1.6 a	95.8 ± 4.0 a	85.4 ± 6.6 a	86.0 ± 8.7 a
2013	95.9 ± 4.6 a	99.9 ± 0.3 b	95.3 ± 6.6 a	82.1 ± 9.4 a	–
2014	99.7 ± 0.5 b	100.0 ± 0.0 b	100.0 ± 0.0 b	98.8 ± 0.6 b	99.3 ± 0.9 b
p-value	0.0235	0.0011	0.0299	0.0000	0.0000

Values compared by one-way ANOVA to determine the variant effect. Values followed by different letters are significantly different compared to corresponding column values, according to Tukey's test ($\alpha = 0.05$).

Table 5
Phytotoxicity of tested herbicide treatments in 2012 and 2014 (mean ± standard deviation).

Treatment	Phytotoxicity			
	2012		2014	
Pendimethalin rate (g ha ⁻¹ a.i.)	Fabric cover	7 WAT	5 WAT	7 WAT
600	Yes	0.0 ± 0.0	3.3 ± 2.9 a	10.0 ± 5.0 a
	No	0.0 ± 0.0	8.3 ± 7.6 ab	6.7 ± 2.9 a
1200	Yes	0.0 ± 0.0	15.0 ± 5.0 b	26.7 ± 2.9 b
	No	0.0 ± 0.0	15.0 ± 5.0 b	10.0 ± 5.0 a
A: Pendimethalin rate (p-value)		–	0.019	0.003
B: Fabric cover (p-value)		–	NS	0.003
A × B (p-value)		–	NS	0.022

NS, not significant. WAT, weeks after treatment. Values compared by one-way ANOVA to determine the variant effect. Values followed by different letters are significantly different compared to corresponding column values, according to Tukey's test ($\alpha = 0.05$).

to other tested treatments, where 7 weeks after application phytotoxicity ranged between 7% and 10% (Table 5). The main symptoms of phytotoxicity were growth retardation (in 2012 and 2014) and early necrosis on the oldest leaves of lettuce (only in 2014).

The gas-exchange greatly increased in response to the nonwoven fabric cover (Table 6) in 2012. The fabric increased P_N by approximately 30% compared with uncovered plants. Similarly, transpiration rate of leaves covered with fabric showed markedly increased values (by 40–60%) in comparison with controls regardless of herbicide treatment. This increase may have been associated with elevated temperature under the cover. The effect of herbicide on photosynthetic parameters is difficult to describe in the first year of the experiment. It seems that a stronger effect is accompanied by the presence or absence of the fabric, which increased temperature and CO₂ content and changed the light spectrum. In most cases, there were no significant differences between the respective values for plants treated and untreated by herbicide. A significant reduction in photosynthetic rate was not recorded from applying pendimethalin at the higher rate. A possible explanation for this phenomenon is the specific mode of action and recovery after herbicide application, whereas the gas-exchange measurement was conducted 5 weeks after treatment. Moreover, stomatal conductance (g_s) was significantly reduced in plants without growing fabric coverage. Stomatal density, which determines gas exchange, decreased at the elevated temperatures accompanying significantly higher CO₂ levels under the cover.

In 2014, the plants were measured 3 days after removal of the nonwoven fabrics. Because the cover shaded plants and substantially increased temperature, the data from previous measurements cannot be compared to those taken in 2014. Nevertheless, changes in stomatal density were similar in both years and varied significantly among treatments. Plants covered by the nonwoven fabric had lower numbers of stomata on the leaves and maintained a more abaxial distribution of stomata. Plants shaded for a 5-week period showed about 10% lower transpiration rates compared to those uncovered even when the fabric was removed. In this year, the measured values can be matched with the influence of the herbicide, but an effect from the fabric cannot be excluded. The higher

rates of pendimethalin likely reduced physiological processes in plants (Table 7).

3.3. Yield of head lettuce

The highest lettuce yield (mean head weight) was recorded on hand-weeded plots (without weeds) covered with nonwoven fabric in both 2012 and 2014 (439 and 371 g plant⁻¹). In 2012, no effect of fabric cover and pendimethalin application rate on lettuce head weight was recorded (Table 8), but lettuce head weight on untreated plots (natural weed infestation) was significantly lower (by 46%) compared to that on hand-weeded plots covered by fabric.

In 2014, the effect of fabric covering on lettuce yield was significant ($p = 0.016$). Lettuce head weight on uncovered plots was lower by 40% compared to that on covered plots (data not presented).

4. Discussion

Yield losses in lettuce caused by weeds were higher under nonwoven fabric covers (35–46%) than in the condition without covers (3–10%). Competition of summer weeds (which was dominant on experimental fields) was greater at the higher temperatures under nonwoven fabric than at the lower temperatures without covering. There are large differences in the literature among reported yield losses in lettuce caused by weeds (Santos et al., 2004 versus Giancotti et al., 2010). This probably relates to the interference of weed species present in the fields and different growing-season temperatures.

The efficacy of pendimethalin was affected by weather condition in the experimental year (Table 4) and by nonwoven fabric covering (Table 3). The efficacy of pendimethalin against tested weeds was greater in plots covered by nonwoven fabric, but only during the dryer seasons (2012 and 2013). The impact of nonwoven fabric cover on the efficacy of pendimethalin was stronger on weeds which produce larger seeds (*E. crus-galli* and *M. annua*) and can emerge from deeper soil layers (Abdallah, 1991; Jursík et al., 2004). The higher application rate of pendimethalin increased efficacy particularly under dry conditions, when both the intensity of volatilization and photo-degradation by UV radiation are

Table 6
Mean values of gas-exchange parameters (\pm standard deviation) of lettuce in 2012.

Pendimethalin rate (g ha ⁻¹ a.i.)	Fabric cover	Stomata upper/lower (No./0.01 mm ²)	P _N (μ mol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	g _s (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	E (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	C _i (ppm)
Hand-weeded control	Yes	54/61	7.4 \pm 0.32a	538.4 \pm 10.5b	5.9 \pm 0.01a	176.1 \pm 0.58a
	No	142/115	4.6 \pm 1.78a	257.5 \pm 5.2a	4.3 \pm 0.46b	173.0 \pm 12.7a
600	Yes	68/75	6.6 \pm 0.38a	612.0 \pm 15.9b	6.1 \pm 0.26a	181.4 \pm 2.1a
	No	134/83	4.1 \pm 2.19a	223.3 \pm 14.8a	2.6 \pm 0.16c	204.8 \pm 1.9b
1200	Yes	77/79	8.1 \pm 0.05 b	381.7 \pm 0.25a	6.5 \pm 0.23a	162.2 \pm 4.7c
	No	140/93	5.7 \pm 1.27a	254.5 \pm 38.4a	4.3 \pm 1.20b	163.5 \pm 0.6c
A: Pendimethalin rate (p-value)			>0.001	>0.001	>0.001	>0.001
B: Fabric cover (p-value)			>0.001	>0.001	0.001	>0.001
A \times B (p-value)			>0.001	>0.001	0.003	>0.001

Values compared by one-way ANOVA to determine the variant effect. Values followed by different letters are significantly different compared to corresponding column values, according to Tukey's test ($\alpha=0.05$).

Table 7
Mean values of gas-exchange parameters (\pm standard deviation) of lettuce in 2014.

Pendimethalin rate (g ha ⁻¹ a.i.)	Fabric cover	Stomata upper/lower (No./0.01 mm ²)	P _N (μ mol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	g _s (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	E (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	C _i (ppm)
Hand-weeded control	Yes	58/65	1.9 \pm 0.36a	121.6 \pm 5.1d	2.2 \pm 0.12a	154.2 \pm 3.91a
	No	130/109	2.1 \pm 0.13a	118.9 \pm 10.8c	2.2 \pm 0.15a	156.7 \pm 1.95a
600	Yes	70/82	-1.7 \pm 0.4b	162.1 \pm 2.6e	3.8 \pm 0.1d	214.8 \pm 4.6e
	No	128/90	1.8 \pm 0.2a	270.0 \pm 4.3f	4.2 \pm 0.1e	176.9 \pm 1.1c
1200	Yes	75/83	-1.3 \pm 0.4c	91.8 \pm 4.4a	2.5 \pm 0.1b	204.4 \pm 6.7d
	No	132/90	1.0 \pm 0.2d	116.2 \pm 12.2b	2.9 \pm 0.3c	171.9 \pm 3.2b
A: Pendimethalin rate (p-value)			>0.001	>0.001	>0.001	>0.001
B: Fabric cover (p-value)			>0.001	>0.001	>0.001	>0.001
A \times B (p-value)			>0.001	>0.001	>0.001	>0.001

Values compared by one-way ANOVA to determine the variant effect. Values followed by different letters are significantly different compared to corresponding column values, according to Tukey's test ($\alpha=0.05$).

Table 8
Head lettuce weight at harvest in tested treatments by experimental years (mean \pm standard deviation).

Treatment Pendimethalin rate (g ha ⁻¹ a.i.)	Fabric cover	Average weigh of lettuce head	
		2012 g	2014
Untreated control	Yes	300 \pm 83 a	274 \pm 44 ab
	No	311 \pm 54 a	258 \pm 78 ab
Hand-weeded control	Yes	439 \pm 41 b	371 \pm 5 c
	No	342 \pm 51 ab	265 \pm 40 ab
600	Yes	356 \pm 20 ab	313 \pm 62 abc
	No	339 \pm 79 ab	244 \pm 23 a
1200	Yes	389 \pm 13 ab	327 \pm 37 bc
	No	347 \pm 83 ab	251 \pm 35 ab
A: Pendimethalin rate (p-value)		NS	NS
B: Fabric cover (p-value)		NS	0.016
A \times B (p-value)		NS	NS

NS, not significant. Values compared by one-way ANOVA to determine the variant effect. Values followed by different letters are significantly different compared to corresponding column values, according to Tukey's test ($\alpha=0.05$).

usually higher (Neururer and Womastek, 1991). Moreover, *E. crus-galli* and *M. annua* were better controlled at the higher tested pendimethalin application rate (1200 g ha⁻¹ a.i.). The highest efficacy was recorded on *C. album*, which was fully controlled on all pendimethalin-treated plots in 2013 and 2014, and only in 2012 (lowest soil moisture) was the efficacy of uncovered plots lower (96–98%). Excellent efficacy of pendimethalin against *C. album* also had been shown by Alebrahim et al. (2012) in potato field experiments. Those authors recorded lower efficacy of pendimethalin on *A. retroflexus*. In our study, the efficacy of pendimethalin against *A. retroflexus* was also lower compared to *C. album*, but it was still very good (more than 90% in all experimental years). Similar results against *C. Album* and *A. retroflexus* were obtained by Pannacci et al. (2007) using pendimethalin at 921 g ha⁻¹ in sunflower field experiments. The differences in efficacy may have been caused by

different climatic and weather conditions as well as the different growing technologies used for different crops.

Selectivity of pendimethalin to lettuce was good, especially in 2012, when soil moisture was the lowest during the entire growing season. In 2014, with its intensive precipitation during the growing season, lettuce was injured especially on plots covered by nonwoven fabric and treated with the higher application rate (1200 g ha⁻¹) of pendimethalin. The effect of pendimethalin on lettuce yield was not significant. A similar result had been recorded by Henderson and Webber (1993), who tested the application of pendimethalin on transplanted lettuce in southern Queensland. Their application of pendimethalin at a rate of 1,000 g ha⁻¹ before transplanting initially reduced lettuce head weight in one of four experiments, but the lettuce recovered and yield was unaffected. The number and size of harvested heads tended to decline where >1,300 g ha⁻¹ of pendimethalin had been applied (Henderson and Webber, 1993).

Gas-exchange analysis revealed that the net photosynthetic rate (P_N), the transpiration rate (E), and stomatal conductance (g_s) produced higher values when lettuce was covered by the nonwoven fabric. Some species have significant capacity to alter either photosynthetic capacity per unit cell volume or leaf anatomy. Zhao and Oosterhuis (1998) had noted that plants could compensate for shade stress during the vegetative growth stage by producing broader, thinner leaves and increasing chlorophyll content. In this study, the lettuce compensated for decreased light and higher temperatures by changing stomatal numbers. Many researchers have demonstrated that stomatal conductance can change rapidly in response to such climatic variables as increased CO_2 and temperature (e.g., Apple et al., 2000). Reduced g_s in lettuce grown under low light for the respective period can subsequently explain the decrease in P_N as observed in 2014. The rate of g_s limitation occurred and P_N recorded negative values when leaf stomata were still partially opened, however, and that situation points to other factors, such as biochemical limitations that reduce P_N (Sassenrath-Cole and Pearcy, 1994). Furthermore, a pronounced suppression cannot be unambiguously related to the herbicide treatment. A proportional decrease related to herbicide dose was not found in the first year. In 2014, plants without the fabric cover showed a decrease to some extent related to the higher dose of pendimethalin. Nevertheless, there has been little examination of the underlying causes for such differences.

5. Conclusion

Covering lettuce with nonwoven fabric shortens the growing season, increases yield (in low-temperature seasons), and increases the efficacy of herbicide (pendimethalin). On the other hand, fabric-covered lettuce is usually more sensitive to weed competition and more sensitive to injury by herbicides. For sufficient weed control and good selectivity in lettuce, the reduced rate of pendimethalin application (600 g ha^{-1}) is suitable, especially in conditions of intensive irrigation or precipitation.

Acknowledgements

This research was supported by project QJ1210165 from the National Agency for Agriculture Research of the Czech Republic.

References

- Abdallah, M.M.F., 1991. Control of different weed species at different soil depths with soil solarization. Egypt. J. Agron., 81–88, Special Issue.
- Ahn, C.K., Choi, Y.W., Son, B.G., Kang, J.S., 2003. Effect of covering method of ventilating non-woven fabric and GA_3 treatment on the growth and yield of leaf lettuce during low temperature season. Prot. Hortic. Plant Fact. 12, 72–76 [In Korean].
- Altebram, M.T., Majd, R., Rashed Mohassel, M.H., Wilcockson, S., Baghestani, M.A., Chorbani, R., Kudsik, P., 2012. Evaluating the efficacy of pre- and post-emergence herbicides for controlling *Amaranthus retroflexus* L. and *Chenopodium album* L. in potato. Crop Prot. 42, 345–350, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2012.06.004>.
- Apple, M.E., Olszyk, D.M., Ormrod, D.P., Lewis, J., Southworth, D., Tingey, D.T., 2000. Morphology and stomatal function of Douglas fir needles exposed to climate change: Elevated CO_2 and temperature. Int. J. Plant Sci. 161, 127–132, <http://dx.doi.org/10.1089/314237>.
- Giancotti, P.R.F., Machado, M.H., Yamauti, M.S., 2010. Período total de prevenção a interferência das plantas daninhas na cultura da alface cultivar Solaris. Semi. Ciênc. Agrár. 31, 1299–1304, <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0350.2010v31n4Sup1p1299>.
- Gimenez, C., Otto, R.F., Castilla, N., 2002. Productivity of leaf and root vegetable crops under direct cover. Sci. Hortic. 94, 1–11, [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4238\(01\)00356-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4238(01)00356-9).
- Henderson, C.W.L., Webber, M.J., 1993. Phytotoxicity to transplanted lettuce (*Lactuca sativa*) of 3 pre-emergence herbicides: metolachlor, pendimethalin, and propachlor. Aust. J. Exp. Agric. 33, 373–380.
- Jursík, M., Holec, J., Hamouz, P., Soukup, J., 2004. Biologie a regulace významných plevelů cukrové řepy — *Mračka roční* (*Mercurialis annua* L.). Listy Cukrovácké a Repácké 120, 210–213.
- Knott, C.M., 2002. Weed control in other arable and field vegetable crops. In: Naylor, R.E.L. (Ed.), *Weed Management Handbook*, ninth ed. Blackwell Science, Oxford, pp. 329–366, <http://dx.doi.org/10.1002/9780470051039.ch19>.
- Lee, J.W., Lee, A.H., Seong, K.C., Um, Y.C., Park, D.K., 2009. Effects of row cover materials on the micro environment and the growth of leafy vegetables. Prot. Hortic. Plant Fact. 18, 326–331.
- Neurrer, H., Womastek, R., 1991. Über das Auftreten von Pflanzenschutzmitteln in der Luft. Bodenkult. 42, 57–70.
- Neuweiler, R., Krauss, J., 2008. Einfluss der Pflanztechnik auf die Unkrautwirkung und die Kulturverträglichkeit von Pendimethalin im Salatbau (*Lactuca sativa* L.). J. Plant Dis. Prot. 21, 575–580, Special Issue.
- Odero, D.C., Shaner, D.L., 2014. Dissipation of pendimethalin in organic soils in Florida. Weed Technol. 28, 82–88, <http://dx.doi.org/10.1614/WT-13-00006.1>.
- Odero, D.C., Wright, A., 2013. Phosphorus application influences the critical period of weed control in lettuce. Weed Sci. 61, 410–414, <http://dx.doi.org/10.1614/WS-12-00107.1>.
- Pannacci, E., Graziani, F., Covarelli, G., 2007. Use of herbicide mixtures for pre and post-emergence weed control in sunflower (*Helianthus annuus*). Crop Prot. 26, 1150–1157.
- Santos, B.M., Dusky, J.A., Stall, W.M., Gilreath, J.P., 2004. Influence of common lambsquarters (*Chenopodium album*) densities and phosphorus fertilization on lettuce. Crop Prot. 23, 173–176.
- Sassenrath-Cole, G.F., Pearcy, R.W., 1994. Regulation of photosynthetic induction state by the magnitude and duration of low light exposure. Plant Physiol. 105, 1115–1123.
- Ticles, B.R., Kerns, D.L., 1996. Lettuce injury from preplant and preemergence herbicides. IPM Series 9, Publ. No. 196007. University of Arizona, College of Agriculture and Life Sciences, Cooperative Extension, Tucson, <http://caab.arizona.edu/crops/vegetables/weeds/lettuceinjury.html>.
- Ulmeda, K., 2000. Screening new herbicides for weed control in head and leaf lettuces and broccoli, in: Byrne, D.N., Baciewicz, P. (Eds.), *Vegetable: A College of Agriculture Report for 2000*. University of Arizona College of Agriculture, Tucson, <http://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1177-4d.pdf>.
- Vaughn, K.C., Lehnen, L.P., 1991. Mitotic disrupter herbicides. Weed Sci. 39, 450–457.
- White, S., 1999. The use of Command (clomazone) and Brodal (diflufenican) herbicides in transplanted lettuce. Honours Thesis, Gatton College, University of Queensland.
- Zhao, D., Oosterhuis, D., 1998. Cotton responses to shade at different growth stages: nonstructural carbohydrate composition. Crop Sci. 38, 1196–1203.

4.2. Dynamika degradace herbicidů v kvěťáku

Šuk J, Jursík M, Suchanová M, Schusterová D, Hamouzová K. 2018. Dynamics of herbicide degradation in cauliflower. *Plant Soil Environment*. **64**: 551-556.

Dynamics of herbicide degradation in cauliflower

JAROSLAV ŠUK¹, MIROSLAV JURŠÍK¹, MARIE SUCHANOVÁ², DANA SCHUSTEROVÁ²,
KATEŘINA HAMOUZOVÁ¹

¹Department of Agroecology and Biometeorology, Czech University of Life Sciences Prague,
Prague, Czech Republic

²Department of Food Analysis and Nutrition, University of Chemistry and Technology Prague,
Prague, Czech Republic

*Corresponding author: sukj@af.czu.cz

ABSTRACT

Šuk J., Jursík M., Suchanová M., Schusterová D., Hamouzová K. (2018): Dynamics of herbicide degradation in cauliflower. *Plant Soil Environ.*, 64.

The aim of this work was to compare the dynamics of the degradation of herbicides commonly used in brassica vegetables. Series of plot field experiments were carried out in planting cauliflower in 2012–2014. The amount of herbicide residues with the maximum residue level (MRL) determined by the Regulation (EC) No. 396/2005 and with requirements of non-residue production (up to 10 µg/kg of active ingredient in harvested product) was compared. Napropamide, clomazone and dimethachlor were applied before planting and pendimethalin, S-metolachlor, pyridate, ethametsulfuron, dimethenamid, metazachlor, quinmerac, picloram, clopyralid, cycloxydim, fluazifop, propaquizafop and quizalofop were applied after planting the cauliflower. Besides fluazifop and quizalofop, all tested herbicides showed a fast degradation and can be recommended for non-residue production. The amount of fluazifop residues did not fall below the MRL even 6 weeks after application. Residues of post-emergently applied quizalofop were detected in cauliflower 10–44 days after application in most of the samples at concentration 9–73 µg/kg (below the MRL).

Keywords: pesticides residues; weed control; *Brassica oleracea* var. *botrytis*; food contaminant

Vegetables are an important group of crops and they constitute a major part of the human diet. Pesticides are widely used in most sectors of agricultural production to protect crops against pest, diseases and weeds to increase the crop yield (Abdulra'uf and Tan 2013). For better and higher quality production, farmers use a large amount of pesticides during the whole growing period of vegetables (Baig et al. 2009). However, its intensive use has caused great environmental problems due to its ability to penetrate into the tissues of vegetables and then affect the food chain (Abdulra'uf and Tan 2013). Risk to human health can occur, especially when farmers ignore the

recommended time period between the pesticide application and harvest (Baig et al. 2009, Wang et al. 2013). In order to ensure the supply of safe food, pesticides should be used only following good agricultural practices (GAP). In addition, even though pesticides might have been applied following GAP, the distribution of pesticide residues in individual crop parts might be very wide with some food items containing residue levels much higher than others (Prodhan et al. 2016).

Among the brassica vegetables, cauliflower has the lowest speed of residue degradation (Kocourek et al. 2017) and also can be a source of noxious toxic substances such as herbicides (Prodhan et al. 2016).

Supported by the Ministry of Agriculture of the Czech Republic, Project No. QJ1210165.

<https://doi.org/10.17221/312/2018-PSE>

Herbicides can remain on the soil surface due to the adsorption processes (Sondhia 2009) and potentially stable herbicides can be taken up by plant forming unwanted residues (Jaźwa et al. 2009).

Different herbicides have been registered for use in cauliflower for pre- or post-emergence weed control (Scott et al. 1995). Pendimethalin has been extensively used globally and it is a significant herbicide for the control of annual weeds in vegetable crops (Tsiropoulos and Miliadi 1998). Curvale et al. (1979) recommended napropamide for weed control. Metazachlor is highly recommended by Zinkevičiute and Baleiunas (1998) for high marketable cauliflower yield. Qasem (2007) tested the phytotoxicity of quizalofop in cauliflower. Henderson and Cairns (2002) proved that clopyralid, picloram and pyridate are able to well control weeds in cauliflower with minimal crop damage. Ethametsulfuron is the only herbicide from the group of acetolactate synthase inhibitors, to which cauliflower possessed an acceptable level of tolerance (Sikkema et al. 2006). Clomazone was used for weed management in cabbage production for over 20 years, however it may damage cauliflower (Harrison et al. 2015).

For extraction and detection of herbicide residues, Lehotay et al. (2010) recommended the most commonly used method QuEChERS (quick, easy, cheap, effective, robust and safe) with liquid chromatography and mass spectrometry. This method has detection with a practical limit of quantitation of 1 µg/kg (Farkas et al. 2014).

Non-residue production is the agricultural production, in which weed control is carried out, so that residues of used herbicides in products are below the limit of 10 µg/kg. This limit is currently set by the Czech decree No. 46/2014 Coll., which is used for products intended as infant food (Kocourek et al. 2017).

Because of specific behaviour of different pesticides in plants and environment, it can be assumed

that that amounts of their residues in harvested cauliflower samples differ. The first objective of this work was to compare differences in the dynamics of selected herbicide degradation in cauliflower. The second objective was to compare herbicide residues concentrations with the maximum residue levels (MRL), to compare results with requirements of non-residue production and to develop recommendations of their use.

MATERIAL AND METHODS

The plots experiments were carried out in Prague, Czech Republic, Central Europe (285 m a.s.l., GPS: 50°7'N, 14°22'E) in the period 2012–2014. The soil in the area was classified as Haplic Chernozem with clay content of 19%, sand content of 25%, silt content of 56%, which is specific for silt loam soil. The soil had the following chemical characteristics: pH_{KCl} 5.75; 156 mg P/kg; 275 mg K/kg; 177 mg Mg/g; and 7984 mg Ca/kg. Sorption capacity was 209 mmol_l/kg. Annual mean air temperature in this area is about 9°C and mean annual precipitation about 500 mm. An overview of weather conditions during the experiments is shown in Table 1.

Experimental design. Pre-plant cauliflowers (cv. Chamborg) with three true leaves were manually transplanted into the plots, in a spacing of 0.5 m between rows and 0.7 m between seedlings. Netto area of plot was 12 m² (2 × 6 m) spaced by 0.5 m from each other. Two central rows were considered for sampling of cauliflower. The experiment was designed in a complete randomized blocks with three replications. Cauliflowers were planted on 9. 5. 2012; 6. 5. 2013 and 5. 5. 2014.

Cultural practices commonly used in agriculture were carried out according to the requirements of the cauliflower studies. The area was irrigated by a sprinkler system depending on weather conditions. Herbicides (Table 2) were applied in two terms:

Table 1. Weather conditions during the experiments

Month	Total precipitation (mm/month)			Average monthly temperature (°C)			Long-term normal	
	2012	2013	2014	2012	2013	2014	precipitation (mm/month)	temperature (°C)
May	23.4	106.5	136.9	16	12.7	13	77.2	12.7
June	46.8	173.4	20.2	18.1	16.8	17.3	72.7	15.9
July	55.9	89.5	42.9	20	18.5	17.2	66.2	17.5

Table 2. Description of tested herbicides

Trade name	Active ingredient (a.i.)	Concentration of a.i. (g/L (g/kg))	Formulation	Manufactured
Devrinol	napropamide	450	SC	UPL Europe Ltd.
Brasan	clomazone	40	EC	Syngenta
	dimethachlor	500	EC	Syngenta
Stomp	pendimethalin	400	SC	Syngenta
Dual Gold	S-metolachlor	960	EC	Syngenta
Lentagran	pyridate	450	WP	Belchim Crop Protection
Salsa	ethametsulfuron	750	WG	DuPont
	dimethenamid	200	SL	BAFS SE
	metazachlor	200	SL	BAFS SE
Butisan Max	quinmerac	100	SL	BAFS SE
	picloram	67	SL	Dow AgroSciences
Galera	clopyralid	267	SL	Dow AgroSciences
Stratos Ultra	cycloxydim	100	EC	BAFS SE
Fusilade Forte	fluazifop	150	EC	Syngenta
Garland Forte	propaquizafop	100	EC	ADAMA
Targa Super	quizalofop	50	EC	Nissan Chemical Ind. Ltd.

SC – soluble concentrate; SL – soluble liquid; EC – emulsifiable concentrates; WP – wettable powders; WG – water dispersible granules

before planting and after planting of cauliflower. Terms of application in all experimental years are shown in Table 3. Herbicides were applied by a nonresidue sprayer Schachtner at a spray volume of 300 L/ha and pressure of 300 kPa. All tested herbicide doses are the highest registered doses for brassica vegetables. The samples of cauliflower were collected continuously during the growing season (Table 4) from the central part of each plot. A minimum of three cauliflowers were collected from one plot at each sampling. The samples were stored in the freezer at -20°C until the extraction procedure.

Analyses. Cauliflower samples were tested in the fully certified laboratory of the Department of Food Analysis and Nutrition at the University of Chemistry and Technology Prague. Extraction of pesticide residues was based on the QuEChERS method. Pesticides were extracted from a portion of the homogenized sample (10 g) by acetonitrile. After separation of aqueous and acetonitrile layers (induced by addition of anhydrous MgSO_4 and NaCl salts) an aliquot of the upper organic layer was transferred into a vial for LC-MS/MS. For the final identification and quantification of pesticides residues, the U-HPLC system coupled to a triple quadrupole mass spectrometer with electrospray

Table 3. Application rates, terms and dates

Active ingredient	Dose (g/ha)	Application term	Days after planting		
			2012	2013	2014
Napropamide	1800	BP	0	0	0
Clomazone	80	BP	0	0	0
Dimethachlor	1000	BP	0	0	0
Pendimethalin	1200	AP	6; 33	7; 37	4
S-metolachlor	1152	AP	6; 33	7; 37	4
Pyridate	450	AP	21; 33	23; 37	19; 32
Ethametsulfuron	22	AP	6; 21	7; 23	4; 19
Dimethenamid	500	AP	6; 21	7; 23	4; 19
Metazachlor	500	AP	6; 21	7; 23	4; 19
Quinmerac	250	AP	6; 21	7; 23	4; 19
Picloram	80	AP	21; 33	23; 37	19; 32
Clopyralid	20	AP	21; 33	23; 37	19; 32
Cycloxydim	200	AP	41; 49	49; 62	39; 53
Fluazifop	300	AP	41; 49	49; 62	39; 53
Propaquizafop	150	AP	41; 49	49; 62	39; 53
Quizalofop	125	AP	41; 49	49; 62	39; 53

BP – before planting; AP – after planting

<https://doi.org/10.17221/312/2018-PSE>

Table 4. Periods between herbicide application and cauliflower sampling (harvest)

Herbicide	Sampling after application (days)		
	2012	2013	2014
Napropamide	69	72	74
Clomazone	63; 69	72	
Dimethachlor	69	72	
Pendimethalin	48	35; 47; 65	32; 70
S-metolachlor	48	35; 65	32; 70
Pyridate	20; 28; 48	35; 49	32; 45
Ethametsulfuron		49; 65	50; 75
Dimethenamid	48	35; 65	32; 70
Metazachlor	48; 63	65	45; 70
Quinmerac	48	65	45; 70
Picloram	20; 28; 48	35; 49	32; 45
Clopyralid	20; 28; 48	35; 49	32; 45
Cycloxydim	20; 28; 36	10	
Fluazifop	20; 28; 36; 44	10; 22; 23; 35	11; 16; 25; 30
Propaquizafop	20; 28; 36	10	
Quizalofop	20; 28; 36; 44	10; 22; 23; 35	11; 16; 25; 30

ionization in positive ion mode (ESI+) was used. The generated data were processed by MassLynx software version 4.1 (Milford, USA).

Analysis of target herbicides was a part of a multi-residue analytical method that had been fully validated by ISO 17025 (2005). The individual samples were assayed for residues of herbicides in $\mu\text{g}/\text{kg}$. The measured values were compared with the MRL established by the Regulation (EC) No. 396/2005 and with requirements of non-residue (up to $10 \mu\text{g}/\text{kg}$ of active ingredient in harvested product) production. MRL for clomazone, ethametsulfuron, dimethenamid, picloram and fluazifop was $10 \mu\text{g}/\text{kg}$; for dimethachlor it was $20 \mu\text{g}/\text{kg}$; for metazachlor $40 \mu\text{g}/\text{kg}$; for pendimethalin, S-metolachlor and pyridate $50 \mu\text{g}/\text{kg}$; for napropamide and quinmerac $100 \mu\text{g}/\text{kg}$; for propaquizafop $300 \mu\text{g}/\text{kg}$; for quizalofop $400 \mu\text{g}/\text{kg}$; for clopyralid $3000 \mu\text{g}/\text{kg}$ and for cycloxydim it was $5000 \mu\text{g}/\text{kg}$, respectively.

Data evaluation. The obtained data were processed in the XLSTAT 2009 (New York, USA). Non-linear models of degradation of individual herbicides in cauliflower were created after the

evaluation. Models of degradation are calculated according to the equation:

$$y = a \times (\exp(-x/b))$$

Where: y – amount of active ingredient ($\mu\text{g}/\text{kg}$); x – number of days after application. Parameters of models (a ; b) were estimated as $a = 2531$; $b = 147.266$ for fluazifop and $a = 18.135$; $b = 14.15$ for quizalofop.

RESULTS AND DISCUSSION

Measured concentrations of herbicides residues confirmed that there are differences in the rate of metabolization of herbicides in cauliflower. After evaluating the data, it was found out, that the residues of herbicides applied before planting (napropamide, clomazone and dimethachlor) were not detected in samples of harvested cauliflower during the whole harvesting seasons. Post-emergently applied S-metolachlor, pyridate, ethametsulfuron, dimethenamid, metazachlor, quinmerac, picloram, clopyralid, cycloxydim and propaquizafop were not detected in any cauliflower samples, either. These active ingredients can be rapidly metabolized in cauliflower or their uptake by roots and xylem transport in cauliflower is low. As published by EFSA (2016), it is possible that residues of propaquizafop can quickly degrade in plants to other ester metabolite. Stachniuk et al. (2017) evaluated a pesticide residue contamination of brassica vegetables from Polish farmers and herbicide metazachlor, S-metolachlor, linuron or pendimethalin were not detected. Similar results were found by Łozowicka et al. (2012) who did not detect metribuzin, napropamide or propyzamide in the tested samples of brassica vegetables.

However, residues of clomazone, metazachlor, dimethenamid and quinmerac were not detected in cauliflower, if their treatment was done at least 50 days before harvest (common use of these herbicides). Pyridate, clopyralid and picloram were not detected even if their application was carried out three weeks before harvest.

Pendimethalin applied post-emergently after planting was detected only in one sample (47 days after application) in 2013 at trace level ($3 \mu\text{g}/\text{kg}$). In this year, high precipitation shortly before harvest occurred (Table 1) and pendimethalin could be leached into deeper soil layers, where it was more easily absorbed by cauliflower roots. Not

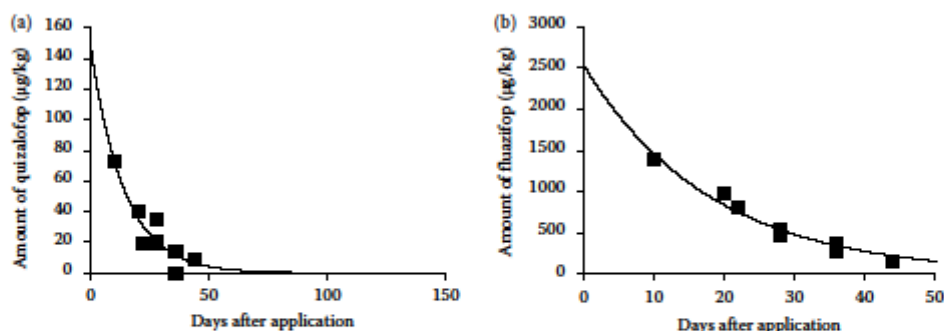


Figure 1. The course of degradation of (a) quizalofop and (b) fluazifop in cauliflower at time scale (data from 2012–2014)

just the concentration of pendimethalin residue in cauliflower but also the efficacy and phytotoxicity of pendimethalin can be affected by weather conditions in the growing season (Jursik et al. 2016). Sondhia (2013) also detected a very low concentration of pendimethalin residues (2 µg/kg) in cauliflower samples harvested 70 days after application. As published by Sondhia (2009) the most commonly detected value of pendimethalin in crop samples was on the limit of detection (1 µg/kg).

The concentration of residues of the above-mentioned herbicides in harvested product did not exceed the MRL if the recommended time between application and harvest was kept. All of these herbicides can also be recommended for non-residue production for products intended as infant food.

Residues of post-emergently applied quizalofop were detected in cauliflower after application in almost all of the samples but always below the threshold of MRL (400 µg/kg). The highest quizalofop concentration (73 µg/kg) was detected 10 days after application in 2013. However, the small residue amount (2% MRL) was still detected 6 weeks after application. It is appropriate to apply herbicide only if there is more than 50 days till harvest. Yet, the limit of non-residue production (10 µg/kg) can be easily exceeded in case of this herbicide. The course of degradation of quizalofop in cauliflower at time is shown in the Figure 1a.

The highest concentration of residues and the longest persistence were recorded in cauliflower treated by the fluazifop. Fluazifop is not even registered for cauliflower, but is registered for kale (also brassica vegetable). High fluazifop concentrations (from 490 to 2500 µg/kg) in cauliflower samples

were detected between the 10th and 30th day after application (Figure 1b). These values are several times higher than MRL (10 µg/kg). The MRL was still exceeded 6 weeks after application (153 µg/kg). For these reasons, it is not possible to recommend fluazifop for weed control in cauliflower crops, especially for non-residue production.

REFERENCES

- Abulra'uf L.B., Tan G.H. (2013): Multivariate study of parameters in the determination of pesticide residues in apple by headspace solid phase microextraction coupled to gas chromatography-mass spectrometry using experimental factorial design. *Food Chemistry*, 141: 4344–4348.
- Baig S.A., Akhtera N.A., Ashfaq M., Asi M.R. (2009): Determination of the organophosphorus pesticide in vegetables by high-performance liquid chromatography. *American-Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Science*, 6: 513–519.
- Curvale J.P., Hardy J.C., Hemery F., Bohec J.L. (1979): Weed control in cauliflower nurseries and transplanted cauliflowers in Brittany 1970–1978. In: *Proceedings of the 10th COLUMA Conference International Meeting on Weed, France*, 1011–1020.
- EFSA – European Food Safety Authority (2016): Modification of the existing maximum residue levels for propaquizafop in various crops. *EFSA Journal*, 14: 4402.
- Farkas Z., Horváth Z., Kerekes K., Ambrus Á., Hámos A., Szabó M.S. (2014): Estimation of sampling uncertainty for pesticide residues in root vegetable crops. *Journal of Environmental Science and Health. Part B – Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 49: 1–14.
- Harrison H.F., Farnham M.W., Jackson D.M. (2015): Tolerance of broccoli cultivars to pre-transplanting clomazone. *Crop Protection*, 69: 28–33.

<https://doi.org/10.17221/312/2018-PSE>

- Henderson C.W.L., Cairns R. (2002): Post emergence spraying of clopyralid, picloram or pyridate in broccoli, Chinese cabbage, cabbage, or cauliflower kills weeds, with minimal crop damage. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 42: 1113–1117.
- Jaźwa A., Szpyrka E., Sadło S. (2009): Disappearance of pendimethalin in soil and its residue in ripe fennel. *Journal of Central European Agriculture*, 10: 153–158.
- Scott J.E., Weston L.A., Jones R.T. (1995): Clomazone for weed control in transplanted cole crops (*Brassica oleracea*). *Weed Science*, 43: 121–127.
- Jursík M., Hamouzová K., Soukup J., Šuk J. (2016): Effect of nonwoven fabric cover on the efficacy and selectivity of pendimethalin in lettuce. *Scientia Horticulturae*, 200: 7–12.
- Kocourek F., Stará J., Holý K., Horská T., Kocourek V., Kováčová J., Kohoutková J., Suchanová M., Hajilová J. (2017): Evaluation of pesticide residue dynamics in Chinese cabbage, head cabbage and cauliflower. *Food Additives and Contaminants. Part A – Chemistry, Analysis, Control Exposure, and Risk Assessment*, 6: 980–989.
- Lehotay S.J., Anastassiades M., Majors R. (2010): The QuEChERS revolution. *LC GC Europe*, 23: 418.
- Łozowicka B., Jankowska M., Kaczyński P. (2012): Pesticide residues in *Brassica* vegetables and exposure assessment of consumers. *Food Control*, 25: 561–575.
- Prodhan M.D.H., Papadakis E.-N., Papadopoulou-Mourkidou E. (2016): Variability of pesticide residues in cauliflower units collected from a field trial and market places in Greece. *Journal of Environmental Science and Health. Part B – Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 51: 644–653.
- Qasem J.R. (2007): Weed control in cauliflower (*Brassica oleracea* var. *Botrytis* L.) with herbicides. *Crop Protection*, 26: 1013–1020.
- Sikkema P.H., Soltani N., McNaughton K., Robinson D.E. (2006): Broccoli, cabbage and cauliflower tolerance to sulfonylurea herbicides. *Crop Protection*, 25: 225–229.
- Sondhia S. (2009): Persistence of metsulfuron-methyl in paddy field and detection of its residues in crop produce. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 83: 799–802.
- Sondhia S. (2013): Harvest time residues of pendimethalin in tomato, cauliflower, and radish under field conditions. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 95: 254–259.
- Stachniuk A., Szmagara A., Czaczek R., Fornal E. (2017): LC-MS/MS determination of pesticide residues in fruits and vegetables. *Journal of Environmental Science and Health. Part B – Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 52: 446–457.
- Tsiropoulos N.G., Miliadis G.E. (1998): Field persistence studies on pendimethalin residues in onions and soil after herbicide postemergence application in onion cultivation. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 46: 291–295.
- Wang S., Wang Z., Zhang Y., Wang J., Guo R. (2013): Pesticide residues in market foods in Shaanxi Province of China in 2010. *Food Chemistry*, 138: 2016–2025.
- Zinikeviciute D., Baleliunas P. (1998): Efficiency of Butisan S for white head cabbage and cauliflower. *Zemdirbyste, Mokslo Darbai*, 62: 52–62.

Received on May 11, 2018

Accepted on October 3, 2018

Published online on October 19, 2018

4.3. Vliv závlahy a půdního adjuvantu na účinnost a selektivitu pendimethalinu a metazachloru v kedlubnách

Jursík M, Šuk J, Kolářová M, Soukup J. 2019. Effect of irrigation and soil adjuvant on the efficacy and selectivity of pendimethalin and metazachlor in kohlrabi. *Scientia Horticulturae* **246**: 871-878.



Effect of irrigation and soil adjuvant on the efficacy and selectivity of pendimethalin and metazachlor in kohlrabi



M. Jursík*, J. Šuk, M. Kolářová, J. Soukup

Department of Agronomy and Biometeorology, Czech University of Life Sciences in Prague, Prague, Czech Republic

ARTICLE INFO

Keywords:
Phytotoxicity
Weather condition
Yield
Weed
Vegetable crop

ABSTRACT

Precipitation and irrigation strongly affect herbicide management of vegetables, especial fast-growing vegetables as a kohlrabi. The objective of this study was to compare the effects of irrigation and paraffin oil-based soil adjuvant on the efficacy and selectivity of pendimethalin and metazachlor herbicides and their tank-mix combination in kohlrabi. Small plot experiments were carried out in Prague, Czech Republic during 2015 and 2016. Herbicide efficacy on *Chenopodium album*, *Mecurialis annua*, and *Solanum phytolobum* was significantly affected by irrigation shortly after herbicide application, but the efficacy, visual phytotoxicity, as well as both aboveground and root kohlrabi biomass were not affected by the adjuvant. Pendimethalin caused significantly greater phytotoxicity than did metazachlor. Aboveground biomass of kohlrabi plants treated with pendimethalin was about 20–50% less compared to that of plants grown on hand-weeded plots, similar as a tuber yield (tuber weight was about 30% lower). Heavy irrigation shortly after the application of pendimethalin did not affect selectivity of this herbicide treatment. On the contrary, selectivity of metazachlor was strongly affected by irrigation and natural precipitation. Weight of tubers harvested on plots treated by pendimethalin was the same or lower compared to that from plots with competition of annual weeds. The lowest yield (50% compared to hand-weeded check) was on the plots treated by herbicide mixture pendimethalin + metazachlor and irrigated shortly after the application.

1. Introduction

Kohlrabi (*Brassica oleracea* var. *gongylodes*) is a fast-growing, cool season, brassica annual vegetable crop (Biesiada, 2008). Main growing area of kohlrabi is in Europe and some cultivars are grown in USA (Welbaum, 2015). Kohlrabi should be harvested when the tuber is 5–8 cm in diameter, normally 55–65 days after seeding or 45–50 days after transplanting. Yield of tubers is around 30 t ha⁻¹ (Swaidner et al., 1992). Tubers contain mainly carbohydrates (6.2%) and proteins (1.7%). Vitamin C (62 mg per 100 g) is most important nutritional property (USDA Nutrient Database, 2018).

Use of herbicides is a common weed management strategy in brassica vegetables (Miller et al., 2003). Chlorothal-dimethyl, clomazone, dimethenamid, metazachlor, metolachlor (only on cabbage), n-propylamide, nitrofen, oxyfluorfen, pendimethalin, pethoxamid, quinmerac, and trifluralin are used before planting for controlling weeds in Brassica vegetables (Al-Khatib et al., 1998; Qasem, 2007; Sikkema et al., 2007). Some of the aforementioned herbicides can be used also after planting, but typical post-emergent herbicides used in brassica vegetables are clopyralid, picloram, pyridate, and leaf graminicides

(e.g., quizalofop, propaquizafop, cycloxydim).

Metazachlor and pendimethalin are the herbicides most used in growing kohlrabi. Pendimethalin inhibits cell division in meristematic tissues of sensitive weeds by binding with the major microtubule protein, tubulin (Vaughn and Lehnen, 1991). It only can be used in transplanted kohlrabi and can be applied either before or after planting, because its selectivity to some crop could be decreased when pendimethalin affects root or hypocotyl (position selectivity). Although pendimethalin causes minimal foliar chlorosis and necrosis on vegetables (Higueroa et al., 2016), it often damages stem bases (hypocotyle) of dicot crops, which makes them more sensitive to lodging (Jursík et al., 2015). Metazachlor is a specific inhibitor of very-long-chain fatty acids biosynthesis affecting alkyl chains longer than C₁₈, and its site of action is outside the chloroplast (Coob and Reade, 2010). Metazachlor is used in many brassica crops before and after sowing or planting, and residues of metazachlor are often detected in underground water (Mantzios et al., 2016). Therefore, restrictions on metazachlor use in the European Union are expected in the near future. Selectivity of metazachlor to Brassica crops is rather large, therefore both pre-emergent and post-emergent applications can be used (Jursík et al., 2011).

* Corresponding author at: Czech University of Life Sciences in Prague, Kamýcká 129, 165 21, Prague, Czech Republic.
E-mail address: jursik@af.czu.cz (M. Jursík).

<https://doi.org/10.1016/j.scihorti.2018.11.062>

Received 15 May 2018; Received in revised form 25 September 2018; Accepted 8 November 2018
0304-4238/© 2018 Elsevier B.V. All rights reserved.

Metazachlor can cause the phytotoxicity directly through its mode of action or indirectly through induction of oxidative stress, which results in a temporary reduction in growth (Vercamp et al., 2017). Nevertheless, its effect on plants is relatively weak (Al-Khatib et al., 1995).

Herbicide mixtures are usually more effective than a single herbicide in controlling a broad spectrum of weeds (Al-Khatib et al., 1995). Using mixtures may expand the control of more weed species, prevent shifting, delay resistance evolution in weeds, save costs of application, or can be more efficacious than single herbicides (Streibig et al., 1998; Das and Yaduraju, 2012). Two reference models are commonly used for estimation of performance of herbicide mixtures: Additive Dose model (ADM) for herbicides, with the same mode of action, which can substitute for each other at equivalent biological rates, and Multiplicative survival model (MSD) for herbicides, which elicit their effect independently of each other (Streibig et al., 1998). ADM model is frequently used for estimation of joint action of two similar herbicides considering the effect of their doses (Kudsk and Mathiasen, 2004), while the MSM model is considering only the final effect and can hardly be used for optimization.

Under the climatic conditions of Central Europe, when kohlrabi is grown without irrigation there is no assurance of high yields and good quality of harvested tubers. Irrigation has significantly increased total and marketable yields as well as tuber weight and diameter, but it did not influence nutrient content in kohlrabi tubers (Kosterna et al., 2011). In addition, irrigation affects herbicide management of vegetables (Huang et al., 2017). Under dry conditions, the efficacy of soil-active herbicides usually decreases (Zhang et al., 2001; Zanatta et al., 2008). Intensive precipitation or irrigation after application of these herbicides, however, can cause crop injury (Jursík et al., 2015). This effect is important for vegetables because metabolic degradation of most herbicides in vegetables is relatively low (Sondhia, 2013; Jursík et al., 2017).

Adjuvants are substances without biological activity of their own but that enhance the effectiveness of herbicides (Green and Beestman, 2007; Baratella et al., 2016). The behavior of herbicides in soil can be influenced by the addition of adjuvants (Swarcewicz et al., 1998; Hall et al., 1998; Locke et al., 2002) and their specific formulations (Hall et al., 1998; Keifer et al., 2008). Adjuvants can reduce leaching of soil-active herbicides (Reddy, 1993). The effects of various adjuvants on a specific herbicide can vary (Locke et al., 2002). Effect of adjuvant Grounded on pendimethalin and dimethenamid-P behavior in soil was described by Kočárek et al., 2018).

It is well known, that precipitation or irrigation strongly affect the efficacy and selectivity of soil active herbicides, but only the minimum of exact studies is available for vegetables. Moreover, there are no studies evaluating the effect of soil adjuvant on herbicide efficacy and selectivity for many vegetables. The objectives of this research were to compare the effects of irrigation and soil adjuvant on the efficacy and selectivity of pendimethalin and metazachlor herbicides and their tank-mix combination applied in kohlrabi, as well as to evaluate the effect of weeds on kohlrabi yield. Scientific hypotheses of this study were determined: a) strong irrigation/precipitation shortly after the herbicide application in kohlrabi affects the efficacy and selectivity of herbicide; b) adjuvant Grounded decreases phytotoxicity of herbicides in kohlrabi; c) herbicide mixture (pendimethalin + metazachlor) negatively affects selectivity of herbicide treatment.

2. Materials and methods

Plot field trials were carried out on kohlrabi (variety 'Lech') in Prague, Czech Republic (50° 30' m a.s.l., 50° 7' N, 14° 22' E) in 2015 and 2016. The study region is characterized by a temperate climate (annual mean air temperature around 9 °C, mean annual precipitation total near 500 mm). The experimental field's soil was classified as Haplic Chernozem (WRB classification) and had clay content of 19%, sand content of 25%, silt content of 56% (silt loam soil), soil pH_{HCl} of 7.3,

Table 1

Weed infestation on untreated check in both experimental years (mean ± standard deviation).

Weed species	Weed density plants m ⁻²	
	2015	2016
<i>Amaranthus retroflexus</i>	–	18 ± 5
<i>Chenopodium album</i>	28 ± 9	32 ± 9
<i>Echinochloa crus-galli</i>	–	13 ± 7
<i>Mercurialis annua</i>	–	11 ± 8
<i>Solanum physalifolium</i>	6 ± 4	15 ± 5
<i>Thlaspi arvense</i>	24 ± 12	–

and sorption capacity of 215 mmol⁽⁺⁾kg⁻¹. Nutrient content was 159 µg g⁻¹ P, 249 µg g⁻¹ K, 171 µg g⁻¹ Mg, and 6872 µg g⁻¹ Ca.

Before kohlrabi planting, the soil was fertilized with 60, 27, and 53 kg ha⁻¹ of N, P, and K, respectively. During the growing season, 40 kg ha⁻¹ of N was applied. Maize had been the previous crop in both experimental years. The previous crop had been treated with a tank-mix combination of bromoxynil (375 g ha⁻¹; Parnor 22.5 BC*, 225 g L⁻¹) + tembotrione (66 g ha⁻¹; Landis OD*, 44 g L⁻¹). The trials were arranged in a split plot design with herbicide and adjuvant treatment as the main plot and irrigation regime as the subplot. Three replications were used for each tested treatment and there were arranged in a randomized complete block design. The area of the main plot was 21 m² (2.1 × 10 m). Each plot had 7 rows with 33 plants. The experimental field was infested by *Chenopodium album* L., *Thlaspi arvense* L., and *Solanum physalifolium* Rusby in 2015 and *C. album*, *S. physalifolium*, *Echinochloa crus-galli* L., *Mercurialis annua* L., and *Amaranthus retroflexus* L. in 2016. Weed densities for individual species are given in Table 1.

Pendimethalin (Stomp 400 SC; 400 g L⁻¹; manufactured by BASF SE, Ludwigshafen, Germany) was applied at a rate of 1200 g ha⁻¹. Metazachlor (Butisan 400 SC; 400 g L⁻¹; manufactured by BASF SE, Ludwigshafen, Germany) was applied at a rate of 800 g ha⁻¹. Soil adjuvant Grounded (732 g L⁻¹ of refined paraffin oil, aliphatic hydrocarbons, hexahydric alcohol ethoxylates, and C18-C20 fatty acids) was applied at a rate of 0.41 ha⁻¹. Both tested herbicides were tested alone, with and without adjuvant and in tank-mix combination (both herbicides together). Herbicides and adjuvant were applied a week after kohlrabi planting. The experiments included untreated check (natural weed infestation without chemical and mechanical weed control) and hand-weeded control (weeds were removed by hand at two-week intervals through the entire growing season) treatments. Herbicide was applied using a small-plot sprayer with Lurmark 015F110 nozzles at a spray volume of 300 l ha⁻¹ and pressure of 0.25 MPa. Row spacing was 0.3 m and in-row plant spacing 0.3 m. The second day after herbicide application, 40 mm of water (during one hour) were irrigated using a special irrigation frame with micro-irrigate sprinklers on subplots (10 m²). Dose of other irrigation levels are described in Table 2. Kohlrabi was planted 14.4.2015, resp. 20.4.2016 and it was harvested 4.6.2015, resp. 11.6.2016. Weather and irrigation conditions in both experimental years are given in Table 2.

A percentage scale from 0% to 100% was used to assess herbicide efficacy and crop injury (phytotoxicity) according to the European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO) 1/214 guideline. The efficacy, selectivity assessment, and measurements of aboveground and root biomass were performed 4 weeks after herbicide application (plants from 2nd and 6th rows were collected). Kohlrabi tubers were harvested 8 weeks after planting. Ten kohlrabi plants were collected from the central area of each plot (3 middle rows; 5 m²). In the time of harvest, underground weed biomass was collected from central area of each plots (1 m²).

Using the Statistica ver. 13 software package (StatSoft, Inc., 2015), results were analyzed using analysis of variance (ANOVA) followed by

Table 2
Weather conditions and irrigation during growing seasons. Year.

	Days after planting	Mean temperature (°C)	Total natural precipitation (mm)	Total irrigation (mm)		
				Heavily irrigated plots	Lightly irrigated plots	
2015	0–10	10.8	1.2	40	10	
	11–20	11.4	25.2	0	0	
	21–30	15.2	13.5	20	20	
	31–40	12.9	9.3	20	20	
	41–50	15.6	5.2	10	10	
	total	13.3	54.4	100	60	
2016	0–10	6.8	4.5	40	10	
	11–20	13.9	11.6	20	10	
	21–30	12.7	3.0	25	25	
	31–40	17.5	39.8	0	0	
	41–50	17.4	34.4	0	0	
		total	13.7	93.3	85	45

Tukey's post hoc comparisons to corresponding controls once the differences among mean values had been determined. ANOVA effects and differences were considered significant at $p < 0.05$. Bartlett's test was used to test whether efficacy and selectivity data did not violate the assumption of homogeneity of variance. Because in one case Bartlett's test showed the data to be heterogeneous, either arcsine square root percent transformation or log transformation of $X+1$ were carried out and the multiple comparisons tests were applied to the transformed data.

3. Results

3.1. Herbicide efficacy

Herbicide efficacy on *S. physalis*, *C. album* and *M. annua*, and was significantly higher on plots that were irrigated shortly after herbicide application (efficacy 99, 98 and 79%) compared to low irrigated plots (95, 89, resp. 59%). Efficacy on other tested weeds was not affected by irrigation level. On no weed was herbicide efficacy affected by the adjuvant used. Efficacy of pendimethalin on *C. album*, *M. annua*,

and *T. arvense* was significantly higher compared to metazachlor. On the contrary, efficacy of metazachlor was significantly higher on *S. physalis* compared to pendimethalin. Both tested herbicides very well controlled *A. retroflexus* and *E. crus-galli* without significant differences (Table 3).

C. album was fully controlled only on plots treated by pendimethalin and irrigated shortly after herbicide application. Efficacy of pendimethalin in drier conditions (without irrigation shortly after application) ranged between 94% and 98%. Efficacy of metazachlor on *C. album* was significantly affected by irrigation, especially in 2016, when efficacy of metazachlor on early and strongly irrigated plots ranged between 99% and 100%, while on later and less irrigated plots efficacy of metazachlor was less than 65% (Table 4 and 5).

S. physalis was fully controlled by metazachlor in 2015, but in the next year

full control of *S. physalis* was recorded only on plots that were irrigated shortly and strongly after the herbicide application. Efficacy on other plots ranged between 87% and 96%.

T. arvense was acceptably controlled only by pendimethalin (efficacy 92–97%) and without significant effect of irrigation. Efficacy of metazachlor ranged between 33% and 50%, without effect of irrigation (Table 4).

Among those weeds tested, the least sensitive to the tested herbicides was *M. annua*. Acceptable efficacy (above 80%) was recorded only on plots treated by pendimethalin and irrigated shortly after application, especially when pendimethalin was mixed with metazachlor (efficacy 88–90%). Nevertheless, the efficacy on any of tested weeds was not significantly increased in case herbicides were tank-mixed.

Total weed biomass on plots treated by metazachlor was significantly higher compared to plots treated by pendimethalin. No significant effect was recorded for irrigation level, used adjuvant and experimental year (Table 6).

3.2. Herbicide phytotoxicity

Kohlrabi phytotoxicity was affected by herbicide used, irrigation level, and weather conditions in experimental year. Effect of adjuvant on visual phytotoxicity and aboveground or root biomass was not recorded (Table 6).

Table 3
Efficacy on weeds in dependence on herbicides, adjuvant, irrigation level, and growing season.

Factor	Efficacy (%)					
	CHEAL	SOLPH	THLAR	ECHOG	AMARE	MERAN
Effect of herbicides						
pendimethalin	98 a	95 b	94 a	98 a	99 a	79 a
metazachlor	84 b	98 a	40 b	99 a	99 a	41 b
pendimethalin + metazachlor	99 a	99 a	97 a	100 a	100 a	88 a
<i>F</i> -ratio	19.829	8.200	165.081	1.060	0.800	23.491
<i>p</i> -value	< 0.0001	0.0006	< 0.0001	NS	NS	< 0.0001
Effect of adjuvant						
with adjuvant	93	97	80	99	100	67
without adjuvant	94	97	75	99	99	71
<i>F</i> -ratio	0.091	0.040	0.206	0.350	0.800	0.274
<i>p</i> -value	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Effect of irrigation level						
low	89 b	95 b	76 a	98 a	99 a	59 b
high	98 a	99 a	79 a	100 a	100 a	79 a
<i>F</i> -ratio	12.334	18.120	0.128	3.400	2.700	5.500
<i>p</i> -value	0.0006	< 0.0001	NS	NS	NS	0.0250
Effect of growing season						
2015	95	98	–	–	–	–
2016	92	96	–	–	–	–
<i>F</i> -ratio	0.985	3.180	–	–	–	–
<i>p</i> -value	NS	NS	–	–	–	–

CHEAL, *Chenopodium album*; SOLPH, *Solanum physalis*; THLAR, *Thlaspi arvense*; ECHOG, *Echinochloa crus-galli*; AMARE, *Amaranthus retroflexus*; MERAN, *Mercurialis annua*. NS, not significant. Values followed by different letters are significantly different compared to corresponding column values, according to Tukey's test ($\alpha = 0.05$).

Table 4
Efficacy of herbicide treatments on weeds in 2015 (mean ± standard deviation).

Treatment			Weed control (%)		
Herbicide	Adjuvant	Irrigation level	CHEAL	SOLPH	THLAR
pendimethalin	Yes	Low	94 ± 3 bc	90 ± 0 b	92 ± 2 a
	No	Low	96 ± 1 abc	94 ± 3 ab	94 ± 2 a
	Yes	High	100 ± 0 a	95 ± 4 ab	97 ± 1 a
	No	High	99 ± 1 ab	96 ± 1 a	95 ± 0 a
metazachlor	Yes	Low	82 ± 6 d	100 ± 0 a	43 ± 9 b
	No	Low	88 ± 2 cd	100 ± 0 a	33 ± 12 b
	Yes	High	95 ± 3 bc	100 ± 0 a	30 ± 14 b
	No	High	89 ± 6 cd	100 ± 0 a	36 ± 12 b
pendimethalin + metazachlor	Yes	Low	99 ± 0 ab	100 ± 0 a	97 ± 1 a
	No	Low	99 ± 1 ab	100 ± 0 a	98 ± 2 a
	Yes	High	100 ± 0 a	100 ± 0 a	99 ± 1 a
	No	High	100 ± 0 a	100 ± 0 a	98 ± 2 a
A: Herbicide (p-value)			< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
B: Adjuvant (p-value)			NS	NS	NS
C: Irrigation level (p-value)			NS	NS	NS
A × B (p-value)			NS	NS	NS
A × C (p-value)			NS	0.0399	NS
B × C (p-value)			0.0258	NS	NS
A × B × C (p-value)			NS	NS	NS
Data transformation			AT	-	AT

CHEAL, *Chenopodium album*; SOLPH, *Solanum physalifolium*; THLAR, *Thlaspi arvense*. NS, not significant. Values compared by one-way ANOVA to determine the variant effect. Values followed by different letters are significantly different compared to corresponding column values, according to Tukey's test ($\alpha = 0.05$). Data transformation: AT – arcsine square root % transformation.

Table 5
Efficacy of herbicide treatments on weeds in 2016 (mean ± standard deviation).

Treatment			Weed control (%)				
Herbicide	Adjuvant	Irrigation level	CHEAL	SOLPH	ECHOG	AMARE	MERAN
pendimethalin	Yes	Low	97 ± 1 a	93 ± 2 bc	100 ± 0 a	99 ± 1 a	83 ± ab
	No	Low	98 ± 2 a	92 ± 2 bc	93 ± 5 a	99 ± 2 a	70 ± 8 bc
	Yes	High	100 ± 0 a	99 ± 0 ab	100 ± 0 a	100 ± 0 a	80 ± 0 ab
	No	High	100 ± 0 a	98 ± 1 ab	100 ± 0 a	100 ± 0 a	81 ± 2 ab
metazachlor	Yes	Low	57 ± 5 b	96 ± 4 bc	97 ± 4 a	100 ± 0 a	0 ± 0 c
	No	Low	64 ± 9 b	87 ± 5 c	100 ± 0 a	99 ± 4 a	30 ± 8 d
	Yes	High	99 ± 2 a	100 ± 0 a	100 ± 0 a	100 ± 0 a	63 ± 5 c
	No	High	100 ± 0 a	100 ± 0 a	100 ± 0 a	100 ± 0 a	70 ± 0 bc
pendimethalin + metazachlor	Yes	Low	99 ± 1 a	96 ± 1 abc	100 ± 0 a	100 ± 0 a	85 ± 4 ab
	No	Low	98 ± 2 a	97 ± 1 ab	100 ± 0 a	100 ± 0 a	87 ± 2 a
	Yes	High	100 ± 0 a	100 ± 0 a	100 ± 0 a	100 ± 0 a	88 ± 2 a
	No	High	100 ± 0 a	100 ± 0 a	100 ± 0 a	100 ± 0 a	90 ± 0 a
A: Herbicide (p-value)			0.0005	NS	NS	NS	< 0.0001
B: Adjuvant (p-value)			NS	NS	NS	NS	NS
C: Irrigation level (p-value)			0.0032	< 0.0001	NS	NS	0.0250
A × B (p-value)			NS	NS	0.0464	NS	< 0.0001
A × C (p-value)			< 0.0001	0.0205	NS	NS	< 0.0001
B × C (p-value)			NS	NS	NS	NS	NS
A × B × C (p-value)			NS	NS	0.0464	NS	0.0005
Data transformation			AT	AT	LT	AT	-

CHEAL, *Chenopodium album*; SOLPH, *Solanum physalifolium*; ECHOG, *Echinochloa crus-galli*; AMARE, *Amaranthus retroflexus*; MERAN, *Mercurialis annua*. NS, not significant. Values compared by one-way ANOVA to determine the variant effect. Values followed by different letters are significantly different compared to corresponding column values, according to Tukey's test ($\alpha = 0.05$). Data transformation: AT – arcsine square root % transformation, LT – log transformation of X + 1.

Pendimethalin caused significantly greater phytotoxicity than did metazachlor (Fig. 1). Weight of the aboveground part of plants treated by pendimethalin was about 20–50% lower compared to plants grown on hand-weeded plots. These differences were higher in 2015 (characterized by lower temperature after herbicide application) or when pendimethalin was mixed with metazachlor and strong irrigation was applied shortly and strongly after application. In these cases, visual phytotoxicity was greater than 30% and weight of aboveground biomass was around 50% (Fig. 2 and 3). Strong irrigation shortly after application of pendimethalin did not affect selectivity of the herbicide treatment. On the contrary, selectivity of metazachlor was strongly affected by irrigation and natural precipitation. On plots treated by

metazachlor and irrigated shortly and strongly after application, visual phytotoxicity was dependent on weather conditions and ranged between 13% and 25%.

Weight of kohlrabi roots was affected by herbicides only in 2015, when most of the herbicide-treated plants had significantly lower weight of roots of about 35–55% compared to plants grown on hand-weeded plots. Only the weight of roots of plants treated by metazachlor alone and not irrigated early after application was not significantly lower (Fig. 2) (Table 7 and Table 8)

Table 6
Phytotoxicity of herbicides, weed biomass and yield parameters of kohlrabi in dependence on herbicide used, adjuvant, irrigation level, and growing season.

Factor	Phytotoxicity (%)	Aboveground biomass (g plant ⁻¹)	Root biomass (g plant ⁻¹)	Yield of tubers (g plant ⁻¹)	Weed biomass (g m ⁻²)
Effect of herbicide					
Without weed control	–	66.1 a	16.7	278 a	181.6 c
Hand-weeded control	–	71.6 a	19.6	310 a	0 a
pendimethalin	24 b	44.3 b	16.5	214 b	3.2 a
metazachlor	10 c	60.6 a	16.8	273 a	29.1 b
pendimethalin + metazachlor	36 a	39.7 b	15.4	203 b	0.9 a
<i>F</i> -ratio	27.258	15.219	1.246	11.985	478.004
<i>p</i> -value	< 0.0001	< 0.0001	NS	< 0.0001	< 0.0001
Effect of adjuvant					
with adjuvant	25	48.4	16.2	225	11.16
without adjuvant	22	48.0	16.2	236	10.9
<i>F</i> -ratio	0.635	0.006	< 0.001	0.501	0.003
<i>p</i> -value	NS	NS	NS	NS	NS
Effect of irrigation level					
low	17 b	56.7	17.2	257	34.6
high	29 a	49.2	15.9	232	27.4
<i>F</i> -ratio	10.814	3.839	1.607	3.484	0.3467
<i>p</i> -value	0.0016	NS	NS	NS	NS
Effect of growing season					
2015	29 a	49.6	13.9b	245	31.1
2016	18 b	56.6	19.6a	246	30.8
<i>F</i> -ratio	10.814	3.501	45.420	0.005	0.001
<i>p</i> -value	0.0016	NS	< 0.0001	NS	NS

NS, not significant. Values compared by one-way ANOVA to determine the variant effect. Values followed by different letters are significantly different compared to corresponding column values, according to Tukey's test ($\alpha = 0.05$).

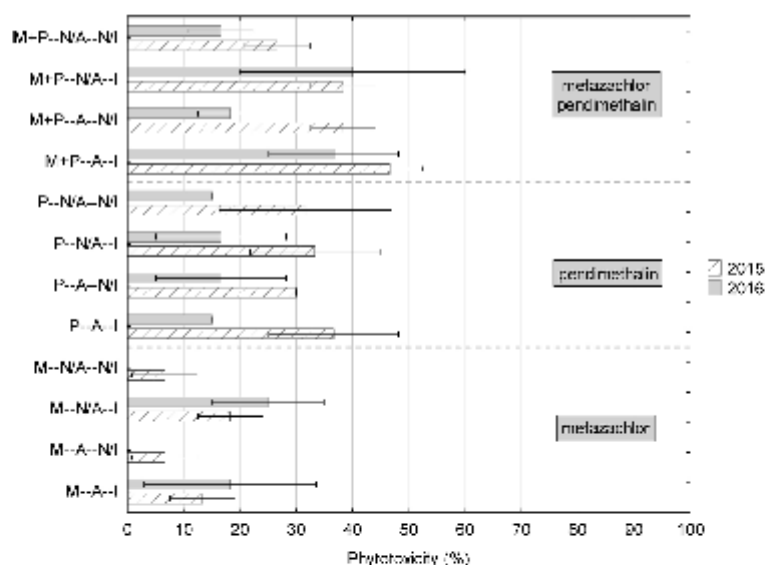


Fig. 1. Phytotoxicity of tested herbicide treatments 4 WAT (columns display mean \pm standard deviation. HW, hand weeding. N/C, no control. M, metazachlor. P, pendimethalin. M + P, metazachlor + pendimethalin. I, irrigation. N/I, no irrigation. A, adjuvant. N/A, no adjuvant).

3.3. Yield of kohlrabi tubers

Kohlrabi yield was affected only by herbicide used. The effect of irrigation level, adjuvant, and experimental year on tuber yield was not significant (Table 6). Weight of tubers on hand-weeded plots ranged between 315 and 342 g, depending on weather and irrigation conditions. In 2016, when the natural precipitation was higher, weeds did not affect tuber weight on the untreated control. In 2015, on the

contrary, tuber weight on plots without weed control and with lower level of irrigation was significantly (about 34%) lower compared to the hand-weeded control. Tuber weight harvested on plots treated by pendimethalin (166–250 g) was the same or lower compared to tubers grown in competition with annual weeds (227–301 g). Tubers with the lowest weight (146–181 g) were harvested on plots treated by the pendimethalin + metazachlor herbicide mixture and irrigated shortly and strongly after application (Fig. 2 and 3).

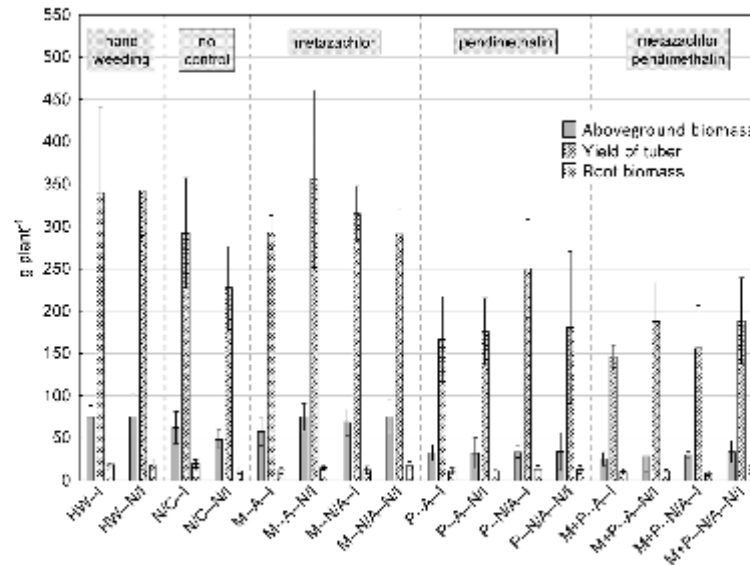


Fig. 2. Weight of aboveground and root biomass (5 WAT) and tuber yield of kohlrabi (7 WAT) in 2015 (columns display mean \pm standard deviation. HW, hand weeding. N/C, no control. M, metazachlor. P, pendimethalin. M + P, metazachlor + pendimethalin. I, irrigation. N/A, no irrigation. A, adjuvant N/A, no adjuvant).

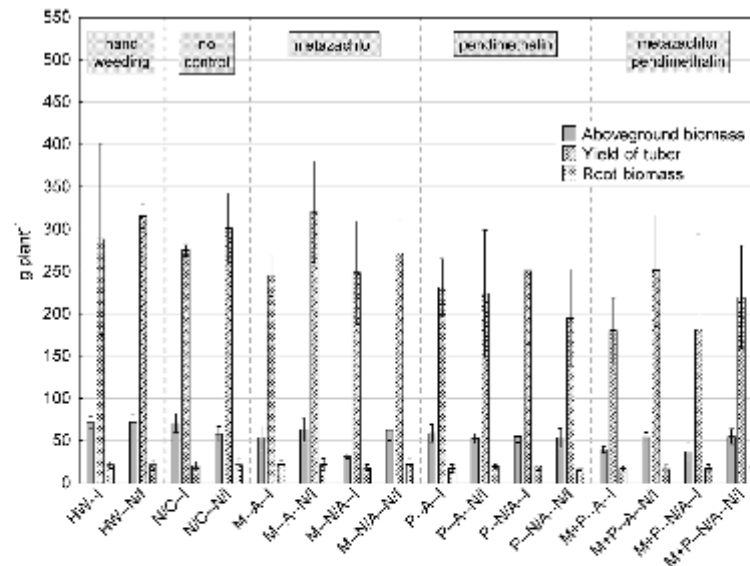


Fig. 3. Weight of aboveground and root biomass (5 WAT) and tuber yield of kohlrabi (7 WAT) in 2016 (columns display mean \pm standard deviation. HW, hand weeding. N/C, no control. M, metazachlor. P, pendimethalin. M + P, metazachlor + pendimethalin. I, irrigation. N/A, no irrigation. A, adjuvant N/A, no adjuvant).

4. Discussion

Although adjuvants are usually used for improvement of efficacy and/or selectivity of herbicides due to positive changes in delivery and distribution of spray on the leaf and/or soil surface, or changes in

environmental fate of herbicides (Green and Beestman, 2007; Cabrera et al., 2010), the adjuvant Grounded used in this study did not affect the efficacy and selectivity either of metazachlor or pendimethalin in kohlrabi. Andr et al. (2017), who tested two different adjuvants and three soil herbicides in sunflower, reported similar results.

Table 7
Effect of herbicides, adjuvant and irrigation on weight of aboveground and root biomass (5 WAT) and tuber yield of kohlrabi (7 WAT) in 2015 (ANOVA).

Treatment	Aboveground biomass (g plant ⁻¹)	Root biomass (g plant ⁻¹)	Yield of tubers (g plant ⁻¹)
A: Herbicide (p-value)	< 0.0001	0.0029	< 0.0001
B: Adjuvant (p-value)	NS	NS	NS
C: Irrigation level (p-value)	NS	NS	NS
A × B (p-value)	NS	NS	0.0245
A × C (p-value)	NS	NS	0.0177
B × C (p-value)	NS	NS	0.0040
A × B × C (p-value)	NS	NS	NS

NS, not significant. WAT, weeks after treatment. Values compared by one-way ANOVA to determine the variant effect. Values followed by different letters are significantly different compared to corresponding column values, according to Tukey's test ($\alpha = 0.05$).

Table 8
Effect of herbicides, adjuvant and irrigation on weight of aboveground and root biomass (5 WAT) and tuber yield of kohlrabi (7 WAT) in 2016 (ANOVA).

Treatment	Aboveground biomass (g plant ⁻¹)	Root biomass (g plant ⁻¹)	Yield of tubers (g plant ⁻¹)
A: Herbicide (p-value)	NS	0.0052	0.0011
B: Adjuvant (p-value)	NS	NS	NS
C: Irrigation level (p-value)	NS	NS	NS
A × B (p-value)	0.0313	NS	NS
A × C (p-value)	< 0.0001	NS	0.0043
B × C (p-value)	0.0069	NS	0.0469
A × B × C (p-value)	0.0497	NS	NS

NS, not significant. WAT, weeks after treatment. Values compared by one-way ANOVA to determine the variant effect. Values followed by different letters are significantly different compared to corresponding column values, according to Tukey's test ($\alpha = 0.05$).

On the contrary, early and massive irrigation strongly affected both efficacy and selectivity of tested herbicides. Although positive effect of irrigation on efficacy of soil herbicides is well known from experiments in different crops (Zhang et al., 2001; Zanatta et al., 2008; Jurák et al., 2013; Smith et al., 2016; Hakoomat et al., 2017), in some cases irrigation has not affected herbicide efficacy but rather even increased weed emergence (Wilson and Shatella, 2014).

Phytotoxicity of metazachlor was strongly affected by the early irrigation, while phytotoxicity of pendimethalin was not affected by the first irrigation. On the contrary, rather large differences in pendimethalin phytotoxicity were recorded between experimental years. In 2016, the pendimethalin phytotoxicity was around 15%, while in 2015, where natural precipitation was higher in the first half of growing season (Table 2), the phytotoxicity was two times higher. Miller et al. (2003) reported that an application rate of pendimethalin higher than 560 g ha⁻¹ caused severe and persistent crop injury and reduced yield of cabbage, especially when small transplants were treated by foliage application.

The herbicide combination of pendimethalin and metazachlor contained full rates of both active ingredients and was included to evaluate a widening of efficacy spectrum without possible negative effects on selectivity. Synergistic effect of these herbicides is not known from existing literature and was not expected in this study. No positive (higher efficacy) or negative (phytotoxicity) effects were recorded, if metazachlor and pendimethalin were applied as a tank-mix. The efficacy of tank-mix on individual weed species did not significantly exceed the efficacy of the better of combination partners. Kohlrabi yield loss caused by weed competition was relatively low and was significant only

if water deficiency occurred. Kosterna et al. (2011) showed that irrigation increased kohlrabi yield by 25% compared to non-irrigated plots. In our experiment, yield loss caused by pendimethalin phytotoxicity was greater than the yield loss caused by weeds. Qasem (2007) had recorded a positive effect of pendimethalin application (at the same application rate as in our study) on cauliflower yield compared to an untreated control, but the efficacy of pendimethalin was relatively low. His experiments were carried out in arid climatic conditions of Jordan, and therefore pendimethalin phytotoxicity did not occur. On the contrary, Miller et al. (2003) recorded severe damage to transplanted cabbage and reduction in its yield after foliar application of pendimethalin at rates of 1120 g ha⁻¹ and higher.

5. Conclusions

- The use of Grounded adjuvant did not affect the efficacy and selectivity of metazachlor and pendimethalin in kohlrabi at a post-transplant application.
- A higher irrigation intensity and natural precipitation positively affected the efficacy of both tested herbicides.
- A high irrigation intensity shortly after the herbicide application negatively affected the selectivity of metazachlor.
- Herbicide mixture did not positively affect the efficacy, on the contrary, visual phytotoxicity increased.
- Kohlrabi yield was more negatively affected by the pendimethalin application than by weed competition.

Acknowledgements

This research was supported by project QJ1210165 from the National Agency for Agricultural Research of the Czech Republic.

References

- Al-Khatib, K., Libbey, C., Kadir, S., 1995. Broadleaf weed control and cabbage seed yield following herbicide applications. *Horticulturae* 30, 1211–1214.
- Andr, J., Kočířek, M., Jurák, M., Pendrychová, V., Tichý, J., 2017. Effect of adjuvants on the desaturation, efficacy and selectivity of three different pre-emergent sunflower herbicides. *Plant Soil Dev.* 63, 400–415.
- Baranilla, V., Bernaghi, M., Tincheo, A., 2016. Effect of surfactant as adjuvant for irrigation/fertilization in vegetable production: preliminary results on lettuce. *Acta Hort.* 1123, 157–163.
- Bianchi, A., 2008. Effect of flat covers and plant density on yielding and quality of kohlrabi. *J. Hermetol.* 13, 167–175.
- Cabrera, D., Lopez-Piñeiro, A., Albarán, A., Pena, D., 2010. Direct and residual effect on diuron behavior and persistence following two-phase diuron waste addition to soil. *Geoderma* 157, 133–141.
- Cook, A.H., Beale, J.P.H., 2010. *Herbicide and Plant Physiology*. Wiley-Blackwell, Oxford, UK, pp. 296.
- Das, Y.K., Yadav, N.T., 2012. The effects of combining modified sowing methods with herbicide mixtures on weed interference in wheat crops. *Int. J. Pest. Manage.* 58, 310–319.
- Figueras, R., Pacheco, F., Echáiz, C., Cardenas, G., Kuhn, N., 2016. Effects of pre-emergence herbicides on bell pepper, crop injury, and weed management in irrigated Chilean fields. *Weed Technol.* 30, 587–594.
- Green, J.M., Beetsman, G.B., 2007. Recently patent of and commercialized formulation and adjuvant technology. *Crop Prot.* 26, 320–327.
- Hakoomat, A., Amoj, M., Sarwar, N., Aroob, A., Shabaz, A.N., Hussain, S., 2017. Application of pre and post emergence herbicide under improved field irrigation system proved a sustainable weed management strategy in cotton crop. *Planta Daninha* 35.
- Hall, J.K., Jansen, G.A., Hickman, M.V., Amisatá, M.K., Bogus, E.R., Munnua, R.O., Hartwig, N.L., Hoffman, L.D., 1998. Formulation and adjuvant effects on leaching of atrazine and metolachlor. *J. Environ. Qual.* 27, 1334–1347.
- Huang, J.K., Wang, S.K., Xian, Z.H., 2017. Rising herbicide use and its driving forces in China. *Int. J. Dev. Res.* 29, 614–627.
- Jurák, M., Soukup, J., Holc, J., Andr, J., 2011. Herbicide mode of action and symptoms of plant injury by herbicides: inhibition of very long chain fatty acid biosynthesis. *Litý Ochrana. Repar.* 127, 15–19.
- Jurák, M., Kočířek, M., Hanzousová, K., Soukup, J., Vozelová, V., 2013. Effect of precipitation on the desaturation, efficacy and selectivity of three chloroacetamide herbicides in sunflower. *Plant Soil Env.* 59, 175–182.
- Jurák, M., Soukup, J., Holc, J., Andr, J., Hanzousová, K., 2015. Efficacy and selectivity of pre-emergent sunflower herbicides under different soil moisture conditions. *Weed Res. Sci.* 51, 214–222.

- Jurek, M., Kosińska, J., Kosiński, M., Hanuszová, K., Soukup, J., 2017. Effect of a non-woven fabric covering on the residual activity of pendimethalin in lettuce and soil. *Post. Man. Sci.* 73, 1024–1030.
- Kelley, D.W., Dexter, R.W., Nicholson, P., Fuller, R.F., 2008. Microencapsulated cloasoxim: Formulation stability, tank mix volatility, and solvent effects. *Am. Soc. Testing Mater. Special Tech. Publ.* 1500, 17–26.
- Kosiński, M., Kosińska, R., Škarpov, U., Jurek, M., 2018. Effect of adjuvant on pendimethalin and dimethamid-P behavior in soil. *J. Hazard. Mater.* 354, 266–274.
- Kostecka, E., Zankiewicz-Bajkowska, A., Ross, R., Franczak, J., 2011. The effect of agro-hydrogel and irrigation on kohlrabi cv 'Oasis F1' yields. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* 10, 53–61.
- Kudák, P., Muthiazam, S.K., 2004. Joint action of amino acid biosynthesis-inhibiting herbicides. *Weed Res.* 44, 313–322.
- Loche, M.A., Reddy, K.N., Gaston, L.A., Zablotowicz, R.M., 2002. Adjuvant modification of herbicide interactions in aqueous soil suspension. *Soil Sci.* 167, 444–452.
- Mantova, N., Hala, D., Karakitsou, A., Antonopoulos, M., Konstantinou, I., 2016. Dissipation and run transport of metazachlor herbicide in exposed cultivated and uncultivated plots in field conditions. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23, 20517–20527.
- Miller, A.J., Bellinder, R.R., Xu, B., Rasch, B.J., Coffinet, M.C., Wolter, M.J.C., 2003. Cabbage (*Brassica oleracea*) response to pendimethalin applied posttransplant. *Weed Technol.* 17, 256–260.
- Quinn, J.R., 2007. Weed control in cauliflower (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.) with herbicides. *Crop Prot.* 26, 1013–1020.
- Reddy, K.N., 1993. Effect of acrylic polymer adjuvant on leaching of bromacil, dicamba, norflurazon and simazine in soil columns. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 50, 449–457.
- Skłama, P.H., Soltan, N., Robinson, D.E., 2007. Responses of cole crops to pre-transplant herbicides. *Crop Prot.* 26, 1173–1177.
- Sondhia, S., 2013. Harvest time residues of pendimethalin in tomato, cauliflower, and radish under field conditions. *Toxicol. Environ. Chem.* 95, 254–259.
- Smith, H.C., Fernald, J.A., Webster, T.M., Hernandez, J.V., Dittmar, P.J., Munoz, P.R., MacDonald, G.E., 2016. Impact of irrigation volume on PRE herbicide activity. *Weed Technol.* 30, 795–800.
- Steinbig, J.C., Kudák, P., Jansen, J.E., 1998. A general joint action model for herbicide mixtures. *Pestic. Sci.* 53, 21–28.
- Swalder, J.M., Ware, G.W., McCallum, J.P., 1992. *Producing Vegetable Crops*. Interstate Printers and Publishers, Danville, USA, pp. 626.
- Swarczewicz, M.K., Malinowski, Z., Złotek, I., 1998. Influence of spray adjuvants on the behavior of trifluralin in the soil. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 60, 560–576.
- USDA Nutrient Database, 2018. Available on:** <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/search/list>
- Vaughn, K.C., Lehman, L.P., 1998. Mitotic disruptor herbicides. *Weed Sci.* 36, 450–457.
- Vercamp, H., Koleva, L., Vassilev, A., Vangronsveld, J., Ouyes, A., 2017. Short-term phytotoxicity in *Brassica napus* (L.) in response to pre-emergently applied metazachlor: A microcosm study. *Environ. Toxicol. Chem.* 36, 59–70.
- Welbourn, G.E., 2015. *Vegetable Production and Practices*. CAB, Wallingford, UK, pp. 476.
- Wilson, R.G., Shattila, G.M., 2014. Integrating irrigation, tillage, and herbicides for weed control in dry bean. *Weed Technol.* 28, 479–485.
- Zanatta, J.F., Procopio, S.O., Maciel, R., Paulstra, E.A., Cargnelutti, F.A., Vargas, L., Spatzenka, D.C., Rosenthal, M.D., Pinto, J.J.O., 2008. Soil water contents and fomesafen efficacy in controlling *Amaranthus Hybridus*. *Plant Danubia* 26, 143–155.
- Zhang, W., Webster, E.P., Selim, H.M., 2005. Effect of soil moisture on efficacy of imazethapyr in greenhouse. *Weed Technol.* 19, 335–339.

4.4. Vliv závlahy a adjuvantu na rezidua pendimethalinu a metazachloru v kedlubnách a půdě

Jursík M, Kočárek M, Suchanová M, Kolářová M, Šuk J. 2019. Effect of irrigation and adjuvant on residual activity of pendimethalin and metazachlor in kohlrabi and soil. *Plant Soil Environment*. **65**: 387-394.

Effect of irrigation and adjuvant on residual activity of pendimethalin and metazachlor in kohlrabi and soil

MIROSLAV JURSIK^{1*}, MARTIN KOČÁREK², MARIE SUCHANOVÁ³,
MICHAELA KOLÁŘOVÁ¹, JAROSLAV ŠUK¹

¹Department of Agroecology and Biometeorology, Czech University of Life Sciences in Prague, Prague, Czech Republic

²Department of Soil Science and Soil Protection, Czech University of Life Sciences in Prague, Prague, Czech Republic

³Department of Food Analysis and Nutrition, University of Chemistry and Technology Prague, Prague, Czech Republic

*Corresponding author: jursik@af.czu.cz

Citation: Jursik M., Kočárek M., Suchanová M., Kolářová M., Šuk J. (2019): Effect of irrigation and adjuvant on residual activity of pendimethalin and metazachlor in kohlrabi and soil. *Plant Soil Environ.*, 65.

Abstract: Metazachlor and pendimethalin are the most used herbicides in kohlrabi. The main objectives of the present study were to evaluate the residual activity of herbicides pendimethalin and metazachlor in kohlrabi and soil under different irrigation regimes and to evaluate the effect of soil adjuvants on the residual activity of tested herbicides. Pendimethalin dissipation half-life (17.3–38.3 days) was higher than metazachlor dissipation half-life (12.1–16.8 days). The pendimethalin half-life was not affected by an adjuvant, irrigation, and an experimental year. Pendimethalin mobility in the soil was affected more by natural precipitation than by irrigation. The use of adjuvant did not affect pendimethalin leaching in dry weather conditions. In wetter natural conditions, a higher pendimethalin leaching was found at early-irrigated plots treated by an adjuvant (9.39% of the applied dose was detected in the soil layer 5–10 cm). Metazachlor dissipation half-life was not affected both by an adjuvant and by irrigation. In the soil layer 5–10 cm, metazachlor was detected only in 2016 on intensively irrigated plots without the use of adjuvant (0.072 µg/g). A concentration of pendimethalin in kohlrabi tubers ranged between 2 and 7 µg/kg. The highest concentration of pendimethalin was detected in tubers, which were intensively irrigated shortly after the application of herbicides without an adjuvant, especially when natural precipitation was high. Metazachlor was not detected in any of the tested kohlrabi samples.

Keywords: post-emergence herbicide application; low residual production; herbicide persistence and leaching

Kohlrabi (*Brassica oleracea* var. *gongylodes*) is a common brassica vegetable crop, which is grown in Europe and North America (Biesiada 2008). Use of herbicides is a common weed management strategy in brassica vegetables (Miller et al. 2003). Metazachlor and pendimethalin are the most used herbicides in kohlrabi.

Pendimethalin is a soil activated herbicide that controls many broadleaf and grass weeds and is used in many crops, including brassica vegetables. Pendimethalin belongs to dinitroaniline herbicide

group, which inhibits polymerization of tubulin basic units and the creation of protofilaments. Consequently, it also interrupts the production of microtubules and the entire spindle apparatus (Vaughn and Lehnen 1991). In brassica vegetables, pendimethalin is recommended only on the transplanted canopy, and it can be applied prior or after to planting at an application rate up to 1200 g/ha. Pendimethalin efficacy increased if irrigation occurred shortly after its application, especially under dry conditions

Supported by the Ministry of Agriculture of the Czech Republic, Project No. QJ1210165.

(Jursik et al. 2019). Persistence of pendimethalin in the soil is relatively long, and pendimethalin residues are therefore common in many soils (Saha et al. 2015, Karasali et al. 2016). Pendimethalin persistence is longer in soils with lower pH (Chen et al. 2018) and when a transparent nonwoven fabric covers the soil (Jursik et al. 2017). According to Kočárek et al. (2018), the adjuvant significantly affected pendimethalin behavior in laboratory conditions but had no effect in field conditions.

Metazachlor is a specific inhibitor of very-long-chain fatty acids biosynthesis affecting alkyl chains longer than C_{18} , and its site of action is outside the chloroplast (Boger 2003). Metazachlor is used in kohlrabi before and after sowing or planting, but residues of metazachlor are often detected in underground water (Karier et al. 2017). Therefore, restrictions on metazachlor use in the European Union are expected shortly. Alginate controlled release formulation of metazachlor reduced the vertical mobility of this herbicide in the soil in comparison with suspension concentrate (Włodarczyk 2014).

Adjuvants are substances without the biological activity of their own, but that enhance the effectiveness of herbicides (Baratella et al. 2016). The behavior of herbicides in the soil can be influenced by the addition of adjuvants (Locke et al. 2002). Adjuvants can reduce leaching of soil-active herbicides (Reddy 1993). Some adjuvants influence the concentration of herbicide residues in soil, as well as herbicide delivery, uptake, redistribution, and persistence and thus, the final biological efficacy (Cabrera et al. 2010). Oil and surfactant adjuvants decreased metazachlor decomposition in soil contaminated by heavy metals (Zajackowska and Kucharski 2017).

Leaching and persistence of herbicides in the soil are affected by precipitation or irrigation. According to Renaud et al. (2004), pesticide leaching is affected mainly by the preferential flow, soil sorption capac-

ity, pesticide half-life, and diffusion inside the soil aggregates. The risk of herbicide leaching is higher on the soils with lower sorption capacity. The concentration of herbicide in the soil solution is higher in these soils compared to soils with a higher sorption capacity. Important properties of pendimethalin and metazachlor in the environment are shown in Table 1.

Pendimethalin is a common contaminant of vegetables (Baša et al. 2012). Esturk et al. (2014) detected pendimethalin residues in parsley (95% of samples) and lettuce (93% of samples). Metazachlor residues in the vegetable are less frequent, but González-Martín et al. (2017) detected metazachlor in a few samples of propolis. The maximum residue level (MRL) established by Regulation (EC) No. 396/2005 for kohlrabi tubers is 300 $\mu\text{g}/\text{kg}$ of pendimethalin and metazachlor (including relevant metabolites). Degradation of pesticide residues in brassica vegetables (especially in head cabbage) relatively speeds – the half-life of tested pesticide residues ranged between 1 and 8 days (Kocourek et al. 2017).

The main objectives of the present work were to evaluate the residual activity of herbicides pendimethalin and metazachlor in kohlrabi and soil under different irrigation regimes and to evaluate the effect of a soil adjuvant on the residual activity of tested herbicides in same experiments. This study completes the study of Jursik et al. (2019), who assessed the biological efficacy and selectivity of pendimethalin and metazachlor in the same experiments.

MATERIAL AND METHODS

Site description. Kohlrabi (cv. Lech) was planted in plot trials in Prague, the Czech Republic, Central Europe (300 m a.s.l., GPS: 50°7'N, 14°22'E), in 2015 and 2016. This region is characterized by a temperate climate (annual average air temperature around 9°C,

Table 1. Important properties of tested herbicides in the environment (source: Footprint Database 2018)

	Pendimethalin	Metazachlor
Solubility in water at 20°C (mg/L)	0.33	450
GUS leaching potential index	-0.32	2.17
Soil degradation (aerobic)	field DT_{50} (days)	100.6
	lab at 20°C DT_{50} (days)	182.3
Adsorption strength by Freundlich	K_f	220.1
	K_{DOC}	13 792

GUS – groundwater ubiquity score; DT_{50} – pesticide half-life; K_f – Freundlich adsorption coefficient; K_{DOC} – Freundlich organic carbon adsorption coefficient

<https://doi.org/10.17221/171/2019-PSE>

total average annual precipitation nearly 500 mm). The soil of experimental fields was classified as a Haplic Chernozem consisting of 19% clay, 26% sand, and 55% silt (silt loam soil) with the sorption capacity of 210 mmol_c/kg and soil pH_{KCl} of 7.3. Nutrient content (Mehlich 3) in the top layer (0–25 cm) was as follows: 2.7 mg N/kg, 136 mg P/kg, 289 mg K/kg, 142 mg Mg/kg and 6858 mg Ca/kg. C_{ox} (oxidizable carbon) 2.0%.

Experimental setup. Before kohlrabi planting, the soil was fertilized with 60, 27, and 53 kg/ha of N, P, and K, respectively. During the growing season, 40 kg N/ha was applied. Maize was the previous crop in both experimental years and was treated with tank mix combination of bromoxynil (375 g/ha; Pardner 22.5 EC[®], 225 g/L) + tembotrione (66 g/ha; Laudis OD[®], 44 g/L). The trials were arranged in a split plot design with herbicide and adjuvant treatment as the main plot and irrigation regime as the subplot. Three replications per herbicide/adjuvant treatment were organized in a randomized complete block design. The area of the main plot was 21 m² (2.1 × 10 m).

Pendimethalin (Stomp 400 SC; 400 g/L; manufactured by BASF SE, Ludwigshafen, Germany) was applied at a rate of 1200 g/ha. Metazachlor (Butisan 400 SC; 400 g/L; manufactured by BASF SE, Ludwigshafen, Germany) was applied at a rate of 800 g/ha. Soil adjuvant Grounded (732 g/L of refined paraffin oil, aliphatic hydrocarbons, hexahydric alcohol ethoxylates, and C₁₈–C₂₀ fatty acids; manufactured by Helena Chemical Company, Collierville, USA) was applied at a rate of 0.4 L/ha. Herbicides and adjuvants were applied one week after kohlrabi planting, i.e., 21.04. in 2015 and 28.04. in 2016. Herbicides were applied using a small-plot sprayer with Lurmark 015F110 nozzles at a spray volume of 300 L/ha and pressure of 0.25 MPa. Row spacing was 30 cm and in-row plant spacing 30 cm. The second day after the herbicide application, 40 mm of water were irrigated by a special irrigation frame with micro-irrigate sprinklers on subplots (10 m²). Terms of kohlrabi planting, harvesting, weather, and irrigation conditions in both experimental years are given in Table 2.

Samples collection. Soil samples for determination of pendimethalin and metazachlor concentration were collected from two soil layers (0–5 cm and 5–10 cm) using soil cylinders (immediately after the herbicide application and then 5, 14, and 35 days after the herbicide application in 2015; and 7, 15, 25 and 46 days after application in 2016). Three kohlrabi tubers were collected from the central part of each plot (2.5 m²) for a determination of the pendimethalin and metazachlor concentration at harvest (4.6. 2015, resp. 11.6. 2016).

Herbicide determination in soil. The pendimethalin and metazachlor concentration in methanol extracts were determined using high-performance liquid chromatography (HPLC) whose parts were in details described in the previous study (Kočárek et al. 2016). The wavelengths for detection of metazachlor and pendimethalin were 225 nm and 240 nm, respectively. The retention time was 2.4 and 9.3 min. for metazachlor and pendimethalin. Limit of a detection (LOD = 3 × σ/slope) and limit of a quantification (LOQ = 10σ/slope) of metazachlor was 0.0250 and 0.0833 μg/cm³. LOD and LOQ of pendimethalin were 0.0056 and 0.0189 μg/cm³.

Concentrations of pendimethalin and metazachlor in both soil layers (0–5 cm and 5–10 cm) during the experiment were used to calculate their dissipation rate constant (*k*) using the first order equation:

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (1)$$

The herbicide half-life (DT₅₀) was then calculated using the equation of:

$$DT_{50} = \frac{0.6932}{k} \quad (2)$$

Herbicide residues determination in kohlrabi. Kohlrabi samples were tested in the certified laboratory of the Department of Food Analysis and Nutrition at the University of Chemistry and Technology Prague. Analysis of target herbicides was a part of a multiresidue analytical method that had been fully validated by ISO 17025, 2016. Extraction of pesticide residues was based on QuEChERS method. Pesticides were

Table 2. Weather conditions and irrigation during growing seasons

Year	Date of planting	Date of harvest	Mean temperature (°C)	Total natural precipitation (mm)	Total irrigation (mm)	
					heavily irrigated plots	low irrigated plots
2015	14.04.	04.06.	13.28	54.4	100	60
2016	20.04.	11.06.	13.69	93.3	85	45

extracted from a portion of the homogenized sample (5 g) after water addition by acetonitrile. After separation of aqueous and acetonitrile layers (induced by addition of anhydrous $MgSO_4$ and NaCl salts) an aliquot of the upper organic layer was transferred into a vial for LC-MS/MS. For the final identification and quantification of pesticides residues, the U-HPLC system coupled to a triple quadrupole mass spectrometer with electrospray ionization in positive ion mode (ESI+) was used. The generated data were processed by MassLynx software version 4.1 (Milford, USA).

Pendimethalin and metazachlor certified standard and triphenyl phosphate (TPP, internal standard) were purchased from Fluka (Seelze, Germany). Working standard solutions were diluted with acetonitrile to prepare matrix-matched calibration standards. Organic solvents for pesticide residue analysis were of the highest purity grade: acetonitrile from Sigma-Aldrich (St. Louis, USA) and methanol from Merck (Darmstadt, Germany). Ammonium formate, formic acid, and anhydrous magnesium sulfate were obtained from Sigma-Aldrich (St. Louis, USA). Sodium chloride was from Penta (Prague, Czech Republic). Milli-Q water (Millipore, USA) was used for preparing mobile phases.

Recovery was evaluated using blank sample homogenate spiked with a pendimethalin and metazachlor standard (concentrations of 40 and 4 $\mu\text{g}/\text{kg}$) and then processed as described above. The performance characteristics of the analytical method employed were as follow recovery 81–90%, relative standard deviation (six replicates) 1–6%, limit of quantitation was 2 $\mu\text{g}/\text{kg}$.

Statistical analyses. Using Statistica version 12 (StatSoft, Tulsa, USA), results were tested by analysis of variance (ANOVA) followed by Tukey's post hoc comparisons to corresponding controls once the differences among mean values had been determined. ANOVA effects and differences were considered significant at $P < 0.05$.

Calculated herbicide half-live values (using Eq. 2) for both pendimethalin and metazachlor showed a normal distribution. *T*-test was used for a comparison of pendimethalin and metazachlor half-life. The effect of irrigation and adjuvant on pendimethalin and metazachlor half-lives was studied using multifactor ANOVA.

The pendimethalin occurrence in both tested soil layers (0–5 cm and 5–10 cm) showed a normal distribution after a logarithmic transformation. Metazachlor half-life showed a normal distribution. Multifactor ANOVA was used to evaluate the effect of irrigation, adjuvant, and year of application both metazachlor and pendimethalin half-life at the end of vegetation. *T*-test was used to compare pendimethalin and metazachlor half-lives. A simple regression was used to compare the concentration of pendimethalin in the soil layers (0–5, 5–10 and 0–10 cm) and the pendimethalin half-life and its concentration in kohlrabi.

RESULTS AND DISCUSSION

Herbicide dissipation half-life. Pendimethalin dissipation half-life in the soil layer 0–10 cm ranged from 17.3 to 38.3 days (Figure 1). Jursík et al. (2017) observed a similar pendimethalin half-life in the same

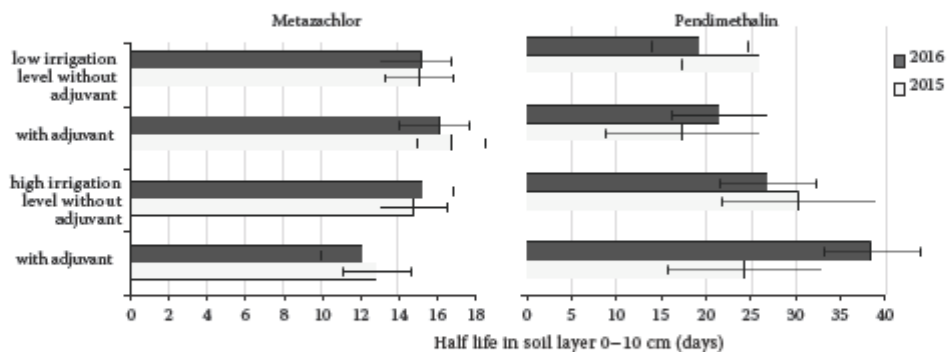


Figure 1. Half-lives of pendimethalin and metazachlor in the soil layer 0–10 cm in dependence on an irrigation level and use of adjuvant Grounded (the error bars indicate standard deviation of pendimethalin and metazachlor half-lives in 2015 and 2016)

<https://doi.org/10.17221/171/2019-PSE>

soil ranging between 23.0–85.3 days in treatments covered by non-woven fabric and 17.7–51.0 days in no covered treatments. Tandon (2015) determined a half-life of pendimethalin in the soil between 11.7 and 34.1 days for a recommended application rate and between 9.2 and 46.8 for a double rate. In our study, the pendimethalin half-life was not affected by an irrigation ($P = 0.1028$), an adjuvant ($P = 0.9615$) and an experimental year ($P = 0.6613$). No effect of an adjuvant and irrigation on a pendimethalin half-life (ranging from 43.0 to 44.6 days) in Haplic Chernozem under field condition was documented by Kočárek et al. (2018). On another hand, a dimethenamid half-life (ranging from 8.8 days to 12.9 days) was significantly prolonged by the use of an adjuvant and by dry conditions. Walker and Bond (1977) studied the pendimethalin half-life in different soil moistures in laboratory conditions. They found a longer pendimethalin half-life under dry soil conditions than in wet soil. A similar effect was described by Otero and Shaner (2014). These results don't match with results of our study because, at treatments irrigated shortly after the pendimethalin application, a longer pendimethalin half-life was detected compared to treatments irrigated later. The longer pendimethalin half-life at early irrigated treatments can be caused by the pendimethalin incorporation from the soil surface into the soil profile (in our case not deeper than 5 cm) which reduces its photodecomposition and evaporation. The reduction of the pendimethalin half-life due to its incorporation into the soil was also reported by Otero and Shaner (2014).

The calculated dissipation half-life of metazachlor in the soil layer 0–10 cm ranged from 12.1 to 16.8 days (Figure 1) and was significantly lower ($P < 0.001$) than the pendimethalin half-life. Metazachlor half-life was neither affected by an irrigation ($P = 0.1154$) and

an adjuvant ($P = 0.6080$) nor by an experimental year ($P = 0.8518$). Kucharski and Sadowski (2011) reported a shorter metazachlor half-life. These authors also observed that the addition of oil and surfactant adjuvants slowed down the degradation of metazachlor in soils. The half-life for a mixture of metazachlor + oil and surfactant adjuvants was about 8–16 days longer in comparison with the metazachlor, half-life applied solo (26 days). Sadowski et al. (2012) detected the metazachlor half-life in three different soils ranging from 22 to 35 days. The high concentration of a clay fraction in the soil texture and the high organic carbon content increased the metazachlor degradation. Mantzos et al. (2017) reported a metazachlor half-life in three soil types in the range of 13–18 days under sunlight and 39–78 days under dark conditions. Authors noted that the organic carbon content and the transition metals concentration were the major soil constituents affecting indirect photolysis of metazachlor rates under sunlight conditions.

Herbicide distribution in soil layers. Herbicides mobility in the soil was evaluated on the base of its concentration in the soil layer 5–10 cm and as the percentage of its concentration from an applied dose in the soil layer 5–10 cm at the end of the experiment shortly before kohlrabi harvest (Figure 2). Pendimethalin concentration in the soil layer 5–10 cm was 12–30 times (2015), resp. 3–8 times (2016) lower compared to the pendimethalin concentration in the soil layer 0–5 cm (Table 3). Higher mobility of pendimethalin was observed in 2016 (higher natural precipitation) on plots, which were irrigated shortly after the application (pendimethalin leaching was 6.73% from an applied dose without adjuvant and 9.39% from an applied dose with adjuvant). The pendimethalin mobility in this study was lower than we reported

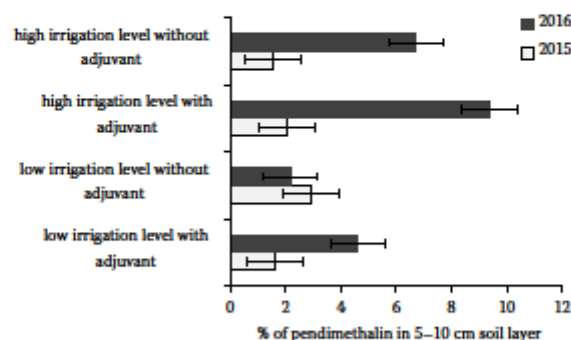


Figure 2. Ratio (% from the applied dose) of pendimethalin concentration in the soil layer 5–10 cm at the end of the experiment to the concentration of pendimethalin immediately after the application in the soil layer 0–5 cm. The error bars indicate standard deviations in 2015 and 2016

Table 3. Pendimethalin concentration in soil ($\mu\text{g/g}$) layers 0–5 cm and 5–10 cm at the end of the experiment (mean \pm standard deviation)

Adjuvant	Irrigation level	2015		2016	
		0–5 cm	5–10 cm	0–5 cm	5–10 cm
No	low	1.050 \pm 0.198 ^a	0.087 \pm 0.029 ^a	0.366 \pm 0.101 ^a	0.045 \pm 0.154 ^a
	high	1.363 \pm 0.200 ^a	0.047 \pm 0.031 ^a	0.456 \pm 0.059 ^a	0.141 \pm 0.152 ^a
Yes	low	0.674 \pm 0.550 ^a	0.046 \pm 0.051 ^a	0.396 \pm 0.166 ^a	0.099 \pm 0.032 ^a
	high	1.005 \pm 0.125 ^a	0.058 \pm 0.020 ^a	0.867 \pm 0.099 ^b	0.203 \pm 0.045 ^a
A: Adjuvant (<i>P</i> -value)		0.0514	0.4943	0.0351	0.9722
B: Irrigation level (<i>P</i> -value)		0.5315	0.5077	0.0116	0.4065
A \times B		0.2178	0.4669	0.002	0.6701

Values within a column with the same letter are not significantly different at the 5% *HSD* (honestly significant difference) ($P = 0.05$) level

in our previous study conducted in lettuce (Jursík et al. 2017). In this study, the highest concentration of pendimethalin in the soil layer 5–10 cm (0.141, resp. 0.203 $\mu\text{g/g}$) was detected at the end of the growing season in 2016 on plots which were irrigated shortly after the pendimethalin application. Kočárek et al. (2018) documented no effect of an adjuvant and irrigation on a pendimethalin soil mobility in field conditions.

The mobility of metazachlor was relatively low. In the soil layer 5–10 cm, metazachlor was detected only in 2016 (4.74% of its concentration from applied dose, Table 4) on plots which were irrigated shortly after the application and adjuvant was not used (0.072 $\mu\text{g/g}$). On another hand, the lower incidence of metazachlor in the soil layer 5–10 cm at the end of a growing season can also be attributed to its faster degradation. Similar results were presented by Jursík et al. (2013) in case of acetochlor in the same soil.

A higher metazachlor mobility and the significant effect of irrigation on metazachlor mobility was documented by Włodarczyk (2014).

Herbicide residues in kohlrabi. The concentration of pendimethalin in kohlrabi tubers ranged between 2 and 7 $\mu\text{g/kg}$ in both experimental years. The MRL of pendimethalin stated for kohlrabi (300 $\mu\text{g/kg}$) was not exceeded in any of the samples tested. Similar results were shown by Sondhia (2013), who detected low levels of pendimethalin residues in cauliflower and radish crops after a pre-emergence application, and by Tsiropoulos and Miliadis (1998), who detected pendimethalin residue levels below the MRL after a post-emergence application in onion. On the contrary, Kaur and Bhullar (2015) did not detect any residues of pendimethalin in harvested cabbage.

In 2015, the concentration of pendimethalin in kohlrabi was significantly affected neither by an irrigation level nor by a used adjuvant (Table 5). In

Table 4. Metazachlor concentration in soil ($\mu\text{g/g}$) layers 0–5 cm and 5–10 cm at the end of the experiment (mean \pm standard deviation)

Adjuvant	Irrigation level	2015		2016	
		0–5 cm	5–10 cm	0–5 cm	5–10 cm
No	low	0.357 \pm 0.094 ^a	nd	0.146 \pm 0.019 ^a	nd
	high	0.350 \pm 0.123 ^a	nd	0.198 \pm 0.002 ^a	0.072 \pm 0.110
Yes	low	0.540 \pm 0.077 ^a	nd	0.184 \pm 0.031 ^a	nd
	high	0.402 \pm 0.026 ^a	nd	0.124 \pm 0.122 ^a	nd
A: Adjuvant (<i>P</i> -value)		0.0513		0.5876	
B: Irrigation level (<i>P</i> -value)		0.1996		0.2697	
A \times B		0.0925		0.5017	

nd – not detected. Values within a column with the same letter are not significantly different at the 5% *HSD* (honestly significant difference) ($P = 0.05$) level

<https://doi.org/10.17221/171/2019-PSE>

Table 5. Pendimethalin residue concentrations in tubers ($\mu\text{g}/\text{kg}$) at kohlrabi harvest in experimental years

Adjuvant	Irrigation level	2015	2016
No	low	4.5 ^a	3.47 ^a
	high	3.38 ^a	6.63 ^b
Yes	low	4.17 ^a	2.38 ^a
	high	3.17 ^a	3.48 ^a
A: Adjuvant (<i>P</i> -value)		0.5932	0.0158
B: Irrigation level (<i>P</i> -value)		0.0307	0.0148
A \times B		0.9038	0.1345

Values within a column with the same letter are not significantly different at the 5% *HSD* (honestly significant difference) ($P = 0.05$) level

2016, a significantly higher concentration of pendimethalin (6.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$) was detected in tubers which were intensively irrigated shortly after the application of herbicides without the adjuvant. Grounded compared to other tested pendimethalin treatments (2.4–3.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$). Irrigation level significantly affected the concentration of pendimethalin in kohlrabi tubers in both experimental years. Adjuvant significantly decreased the concentration of pendimethalin only in 2016 (Table 5).

Residues of metazachlor were not detected in any of the tested kohlrabi samples. Koleva-Valkova et al. (2016) detected residues of metazachlor in plants of oil-seed rape 28–68 days after the pre-emergence application. In the case of post-emergence foliar application, metazachlor residues were detected only 8–28 days after the application. In our study, kohlrabi was harvested (metazachlor was analyzed) 45 days after a post-emergence application. No significant relationship (data not shown) was found between pendimethalin concentration in kohlrabi and its half-life in the soil layer 0–10 cm (and its concentrations in soil layers 0–5 cm and 5–10 cm), though significantly negative relationship between pendimethalin half-life and its concentration in lettuce was found in the previous study (Jursík et al. 2017).

REFERENCES

- Baratella V., Renzaglia M., Trinchera A. (2016): Effect of surfactant as an adjuvant for irrigation/fertigation in vegetable production: Preliminary results on lettuce. *ISHS Acta Horticulturae*, 1123: 157–163.
- Baša Česník H., Velikonja Bolta Š., Gregorič A. (2012): Pesticide residues in samples of apples, lettuce and potatoes from integrated pest management in Slovenia from 2005–2009. *Acta Agriculturae Slovenica*, 99: 49–56.
- Biesiada A. (2008): Effect of flat covers and plant density on yielding and quality of kohlrabi. *Journal of Elementology*, 13: 167–173.
- Boger P. (2003): Mode of action for chloracetamides and functionally related compounds. *Journal of Pesticide Science*, 28: 324–329.
- Cabrera D., López-Piteiro A., Albarrán Á., Peña D. (2010): Direct and residual effects on diuron behaviour and persistence following two-phase olive mill waste addition to soil: Field and laboratory experiments. *Geoderma*, 157: 133–141.
- Chen W.C., Hsu F.Y., Yen J.H. (2018): Effect of green manure amendment on herbicide pendimethalin on soil. *Journal of Environmental Science and Health. Part B, Pesticide Food Contaminant, and Agricultural Wastes*, 53: 87–94.
- Esturk O., Yakar Y., Ayhan Z. (2014): Pesticide residue analysis in parsley, lettuce and spinach by LC-MS/MS. *Journal of Food Science and Technology*, 51: 458–466.
- Footprint Database (2018): Available at: <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/en/> (accessed on 10.12.2018).
- González-Martín M.L., Revilla L., Vivar-Quintana A.M., Betances Seledo E.V. (2017): Pesticide residues in propolis from Spain and Chile. An approach using near infrared spectroscopy. *Talanta*, 165: 533–539.
- Jursík M., Kočárek M., Hamouzová K., Soukup J., Venclová V. (2013): Effect of precipitation on the dissipation, efficacy and selectivity of three chloroacetamide herbicides in sunflower. *Plant, Soil and Environment*, 59: 175–182.
- Jursík M., Kovičová J., Kočárek M., Hamouzová K., Soukup J. (2017): Effect of a non-woven fabric covering on the residual activity of pendimethalin in lettuce and soil. *Pest Management Science*, 73: 1024–1030.
- Jursík M., Šuk J., Kolářová M., Soukup J. (2019): Effect of irrigation and soil adjuvant on the efficacy and selectivity of pendimethalin and metazachlor in kohlrabi. *Scientia Horticulturae*, 246: 871–878.
- Karasali H., Marousopoulou A., Macheri K. (2016): Pesticide residue concentration in soil following conventional and low-input crop management in a Mediterranean agro-ecosystem, in Central Greece. *Science of the Total Environment*, 541: 130–142.
- Karier P., Kraus G., Kolber I. (2017): Metazachlor traces in the main drinking water reservoir in Luxembourg: A scientific and political discussion. *Environmental Sciences Europe*, 29: 25.
- Kaur N., Bhullar M.S. (2015): Harvest time residues of pendimethalin and oxyfluorfen in vegetables and soil in sugarcane-based intercropping systems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187: 221.
- Kucharski M., Sadowski J. (2011): Behaviour of metazachlor applied with additives in soil: Laboratory and field studies. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 9: 723–726.
- Kocourek F., Stará J., Holý K., Horská T., Kocourek V., Kovičová J., Kohoutková J., Suchanová M., Hajšlová J. (2017): Evaluation of pesticide residue dynamics in Chinese cabbage, head cab-

- bage and esuliflower. Food Additives and Contaminants. Part A, Chemistry Analysis Control Exposure and Risk Assessment, 34: 980–989.
- Kočárek M., Artíkov H., Voříšek K., Borůvka L. (2016): Pendimethalin degradation in soil and its interaction with soil microorganisms. Soil and Water Research, 11: 213–219.
- Kočárek M., Kodešová R., Sharipov U., Jursík M. (2018): Effect of adjuvant on pendimethalin and dimethenamid-P behaviour in soil. Journal of Hazardous Materials, 15: 266–274.
- Koleva-Valkova L., Vasilev A., Dimitrova M., Stoychev D. (2016): Determination of metazachlor residues in winter oilseed rape (*Brassica napus* var. Xenon) by HPLC. Emirates Journal of Food and Agriculture, 28: 813–817.
- Locke M.A., Reddy K.N., Gaston L.A., Zablotowicz R.M. (2002): Adjuvant modification of herbicide interactions in aqueous soil suspensions. Soil Science, 167: 444–452.
- Mantzou N., Antonopoulou M., Katsoulakou S., Hela D., Konstantinou I. (2017): Soil degradation of metazachlor and quizalofop-p-ethyl herbicides on TLC plates under natural solar light and dark conditions. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 97: 606–622.
- Miller A.J., Bellinder R.R., Xu B., Rauch B.J., Goffinet M.C., Welser M.J.C. (2003): Cabbage (*Brassica oleracea*) response to pendimethalin applied posttransplant. Weed Technology, 17: 256–260.
- Odero D.C., Shaner D.L. (2014): Dissipation of pendimethalin in organic soils in Florida. Weed Technology, 28: 82–88.
- Reddy K.N. (1993): Effect of acrylic polymer adjuvant on leaching of bromacil, diuron, norflurazon and simazine in soil columns. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 50: 449–457.
- Renaud E.G., Brown C.D., Fryer C.J., Walker A. (2004): A lysimeter experiment to investigate temporal changes in the availability of pesticide residues for leaching. Environmental Pollution, 131: 81–91.
- Sadowski J., Kucharski M., Wujek B. (2012): Influence of soil type on metazachlor decay. Progress in Plant Protection, 52: 437–440.
- Saha A., Bhaduri D., Pipariya A., Jain N.K., Basak B.B. (2015): Behavior of pendimethalin and oxyfluorfen in peanut field soil: Effects on soil biological and biochemical activities. Chemistry and Ecology, 31: 550–566.
- Sondhia S. (2013): Harvest time residues of pendimethalin in tomato, esuliflower, and radish under field conditions. Toxicological and Environmental Chemistry, 95: 254–259.
- Tandon S. (2015): Dissipation kinetics and residues analysis of pendimethalin in soil and maize under field conditions. Plant, Soil and Environment, 61: 496–500.
- Tsiropoulos N.G., Miliadis G.E. (1998): Field persistence studies on pendimethalin residues in onions and soil after herbicide post-emergence application in onion cultivation. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 46: 291–295.
- Vaughn K.C., Lehnen L.P.Jr. (1991): Mitotic disrupter herbicides. Weed Science, 39: 450–457.
- Walker A., Bond W. (1977): Persistence of the herbicide AC 92,553, N-(1-ethylpropyl)-2,6-dinitro-3,4-xylidine, in soils. Pest Management Science, 8: 359–365.
- Włodarczyk M. (2014): Influence of formulation on mobility of metazachlor in soil. Environmental Monitoring and Assessment, 186: 3509–3509.
- Zajęczkowska O., Kucharski M. (2017): Adjuvants as a factor limiting the metazachlor degradation in soil contaminated with heavy metals. Przemysł Chemiczny, 96: 1515–1517.

Received on March 26, 2019

Accepted on July 2, 2019

Published online on August 14, 2019

4.5. Dynamika degradace herbicidů v kořenech mrkve

Šuk J, Hamouzová K, Hajšlová J, Jursík M. 2021. Dynamics of herbicides degradation in carrot (*Daucus carota* L.) roots. *Plant Soil Environment*. **67**: submitted to press.

doc. ing. Miroslav Jursik, Ph.D.
Czech University of Life Sciences Prague
Kamýcká 129 – Prague, 165 00
Czech Republic

Confirmation of the print of the manuscript:
Dynamics of herbicides degradation in carrot (*Daucus carota* L.) roots

Dear Sir/Madam,

we grant you the confirmation of the print of the manuscript: **Dynamics of herbicides degradation in carrot (*Daucus carota* L.) roots** written by **Jaroslav Šuk, Kateřina Hamouzová, Jana Hajšlová and Miroslav Jursik** which will be published in the journal **Plant, Soil and Environment** in 2021.

Sincerely

Součková Kateřina

Mgr. Kateřina Součková
Executive Editor

Prague, February 17, 2021

ID data box:
IČ:
DIČ:

nkr2ayv
48135291
CZ48135291

Email:
Tel:
Web:

cazv@cazv.cz
+ 420 227 010 287
www.cazv.cz

Dynamics of herbicides degradation in carrot (*Daucus carota* L.) roots

Jaroslav Šuk⁽¹⁾, Kateřina Hamouzová⁽¹⁾, Jana Hajšlová⁽²⁾, Miroslav Jursík^{*⁽¹⁾}

*(1) Department of Agroecology and Biometeorology, Czech University of Life Sciences
Prague, Czech Republic.*

*(2) Department of Food Analysis and Nutrition, University of Chemistry and Technology
Prague, Prague, Czech Republic*

Corresponding author: jursik@af.czu.cz

Abstract

This research had two main aims. First, to analyse the degradation dynamics of herbicides commonly used in carrot (aclonifen, clomazone, flufenacet, linuron, metribuzin, pendimethalin, S-metolachlor). Second, to compare the amount of herbicide residues with the maximum residue level and with requirements of non-residual production. The field experiments were conducted in 2012-2016. All tested herbicides resulted in relatively low concentrations of residues in carrot roots (up to 10 µg/kg) when the recommended withdrawal period was followed between application and harvest. Concentration of S-metolachlor in carrot roots exceeded maximal residual level (MRL) if application was carried out four days before harvest. The measured values of other tested herbicide residues in carrot roots did not exceed the MRL in any of tested samples. Pre-emergent use of clomazone, linuron and flufenacet could be recommended for non-residue carrot production. Post-emergent use of metribuzin can be used for non-residue carrot production if interval between application and harvest is at least 80 days. Concentrations of herbicide residues in carrot leaves were many times higher than in roots. All tested herbicides can be applied for a safe carrot production if applicators adhere to the requirements for use.

Keywords: herbicide residue; non-residue production; maximum residue level; weed control

Introduction

Carrot (*Daucus carota* L.) is one of the most widely grown and important vegetables (Welbaum 2015) and carrot production involves farmers of many socioeconomic levels (Araujo et al. 2016). Total world production of carrot was 43 million tons. Total world production area of carrot is roughly about 1.47 million ha and the average yield 37 t/ha (FAOSTAT 2017). Competition ability of carrot is low, because emergence and early growth are relatively slow. Without sufficient control, weeds may cause a yield loss up to 94 % (Coelho et al. 2009).

Several herbicide options have been registered for weed control in carrot. Pre-emergent (PRE) herbicides for use in carrot include pendimethalin, acifluorfen, clomazone, prometryn, trifluralin, flufenacet, metribuzin, and dimethenamid (Malidza et al. 1997, Ogbuchiekwe et al. 2004). Similar soil active herbicides can be used postemergence (POST): linuron, metribuzin, prometryn, flufenacet, pethoxamid, S-metolachlor, flumioxazin, oxyfluorfen, metoxuron, chlorpropham, ioxynil and others (Malidza et al. 1997, Ogbuchiekwe et al. 2004, Kavaliauskaite et al. 2009, Robinson et al. 2012). In the European Union, however, many of these herbicides have recently been restricted, and others are likely to follow in near future, consequently: fewer herbicide options with lower application rates.

In a global market, safety standards of edible produce are a worldwide concern; however, the responsibility often falls on the growers to balance agronomic practices with market standards. The concentration of pesticide residues in vegetable below the maximal residual level (MRL) rarely represent a toxicological risk (Winter 1992). Unfortunately, the growers might not know if the herbicides registered for the crop will result in excessive residues for selling their produce.

Because of specific behaviour of different herbicides in plants and in soil it can be assumed, that amounts of their residues in harvested carrots are different. Therefore, the first objective of this study was to compare the degradation dynamics of residues of most often used herbicides in carrot to MRL of tested herbicide. The second objective of this study was to develop recommendations for herbicide weed control for low-residual and non-residual carrot production. Low-residual production is the agricultural production, in which the crop protection is carried out so that residues of used pesticides in harvested products are below the limit for a predetermined action threshold, for example 25 % MRL or 50 % MRL (Kocourek et al. 2017). More restrictive about amount of residue is non-residue production, where residues of used pesticides in products are below the limit of $10 \mu\text{g kg}^{-1}$. This limit is currently used worldwide for products intended as infant food and is strictly monitored by Commission Directive 2006/141/EC. To our knowledge, there is a lack of studies regarding the herbicide degradation in the plant products, and this is probably the first study on herbicide degradation in carrot.

Materials and Methods

Small plot field trials were carried out in carrot (variety Grivola) in Demonstrational and Experimental field of Czech University of Life Sciences Prague in Czech Republic (300 m a.s.l., $50^{\circ} 7' \text{ N}$, $14^{\circ} 22' \text{ E}$) in 2012 – 2016. Soil was classified as Haplic Chernozem with clay content of 19%, sand content of 25%, silt content of 56%. These contents are specific for silt loam soil. Sorption capacity was $212 \text{ mmol}^{(+)}/\text{kg}$ and soil pH_{KCl} was 7.5. The region has a temperate climate with annual mean air temperature about 9°C and mean annual precipitation about 500 mm. Potato was the previous crop in all experimental years. None of the tested herbicides were used in previous crop.

All plots were arranged in randomized blocks of 13.5 m². Double (0.15 m) row spacing was 0.75 m and in-row plant spacing was approximately 0.04 m. Carrot was sown on 4, 29, 7, 21, and 28 April 2012, 2013, 2014, 2015 and 2016, respectively. Common agriculture practice by European and Mediterranean Plant Protection Organization was used according to the requirement of carrot. Tested herbicides (Table 1) were applied by Schachtner nonresidue sprayer at a spray volume of 300 L/ha and pressure of 0.2 MPa. The highest registered rates of all tested herbicides were used. Herbicides were applied PRE (second day after sowing) and POST (Table 2).

The samples of carrot were collected continuously during the growing season from the central part of each plot. First sampling was carried out when diameter of top root parts achieved 10 mm on average. There was two week interval between first and second sampling and between second and third sampling. A minimum of four carrots were collected from one plot at each sampling term. Roots of carrot were collected at each sampling time. In 2014-2016, carrot leaves were also collected in plots after POST herbicide application. The samples were stored at -20 °C until the extraction procedure.

All harvested carrot samples were tested in the fully certified laboratory of the Department of Food Analysis and Nutrition at University of Chemistry and Technology Prague. The determination of pesticide residues was done by QuEChERS method that has been readily accepted by pesticide residue analysts. Pesticides were extracted from a portion of homogenized sample (10 g) by acetonitrile. After separation of aqueous and acetonitrile layers (induced by addition of anhydrous MgSO₄ and NaCl salts) an aliquot of the upper organic layer was transferred into a vial for LC-MS/MS. A Ultra-High Performance Liquid Chromatography system, coupled to a triple quadrupole mass spectrometer, with electrospray ionization in positive ion mode (ESI+) was used for the final identification and content of herbicides residues. The generated data was processed using MassLynx software version 4.1. Analysis of

used herbicides was a part of a multiresidue analytical method that had been fully validated by ISO 17025 and the individual samples were assayed for residues of herbicides in $\mu\text{g}/\text{kg}$. External quality control was ensured by regular participation in proficiency tests of the European Commission's Proficiency Testing Program. The measured values were compared with the MRL established by Regulation (EC) No. 58/2019 and with requirements of non-residual production. MRL in carrot for linuron and clomazone is $10 \mu\text{g}/\text{kg}$, $50 \mu\text{g}/\text{kg}$ for flufenacet and S-metolachlor, $80 \mu\text{g}/\text{kg}$ for aclonifen, $100 \mu\text{g}/\text{kg}$ for metribuzin and $700 \mu\text{g}/\text{kg}$ for pendimethalin. The limit for non-residue production is $10 \mu\text{g}/\text{kg}$ of herbicide in harvested carrot regardless of the active ingredient.

The obtained data was processed in R project version 3.6.1 (R Core Team, 2019) and subjected to the comparison analysis (t-test) to reflect the differences in experimental years. Non-linear models of degradation of individual herbicides in carrot were calculated using the exponential decay formula in drc package using the following equation: $y = a*(\exp(-x/b))$, where y is the amount of active ingredient ($\mu\text{g}/\text{kg}$), x is number of days after herbicide application, parameter $b > 0$ is determines the steepness of decay. Goodness of fit was assessed by F-test. All tests were performed on significance level of 0.05. Parameters of models and the analytical results are shown in Table 3.

Results and Discussion

In literature, the availability of information about the herbicide residues in the plant product and herbicide uptake by carrot is scarce; therefore, this work can be considered as an innovative approach.

In this study, many active ingredients were tested. The different properties of each herbicide affect the uptake, translocation and soil persistence and will, in turn, have impact on the

herbicide residue found in the plant products. The herbicide residue levels in carrot from individual years were similar and data combined across years revealed no statistical differences ($p > 0.05$). Therefore, it was possible to merge data from all experimental years and calculate exponential curves.

Aclonifen belongs to the diphenyl-ether chemical family, which inhibit protoporphyrinogen oxidase; however, this particular chemical is unique. Recently, it was identified aconifen actually targets solanesyl diphosphate synthase (Kahlau et al. 2020). Residues of aconifen were detected in most of samples treated by this herbicide. Most contaminated sample was collected four days after POST application (shortest tested interval between application of aconifen and carrot harvest), where 55 $\mu\text{g}/\text{kg}$ of aconifen was detected in roots (69 % MRL). Residues of aconifen ranged from 0 to 30 $\mu\text{g}/\text{kg}$ when aconifen was applied at least 40 days before harvest. Lower amount of residue (up to 26 $\mu\text{g}/\text{kg}$) was found after the PRE application, however in 2014 and 2015, no residue of aconifen was detected. This can be explained by the fact that the target for aconifen is clearly limited to the plant's upper parts (Kilinc et al. 2011). The dynamic of degradation of aconifen in carrot roots is shown in Figure 1, where the horizontal line shows MRL for aconifen in carrot (80 $\mu\text{g}/\text{kg}$).

Residues of **S-metolachlor** were detected very often. In Pakistan, where S-metolachlor is a very common herbicide to control weeds in vegetable crops, detected residues were between 45 – 75 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (Amjad et al. 2013). Higher level of S-metolachlor residues can be caused by multiple application at high rates in intervals of 2-3 days (Baig et al. 2009). If the S-metolachlor has been used POST, residues often exceeded value of MRL (50 $\mu\text{g}/\text{kg}$). Only in 2012 and 2014, the S-metolachlor residues in carrot roots were relatively low (0-11 $\mu\text{g}/\text{kg}$). Most contaminated sample was collected four days after post-emergent application (shortest tested interval between S-metolachlor application and carrot harvest), where detected amount of S-metolachlor was 93 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (186 % MRL). The dynamic of degradation of S-metolachlor in

carrot roots is shown in Figure 2, where the horizontal line shows MRL value. Much higher values of S-metolachlor residues were found in leaves. This active ingredient can be absorbed into the plant through the roots and shoots but shoot tissues are generally more absorptive and the site of herbicidal activity (Wehtje et al. 1988).

Only very low **flufenacet** residues (0-3 µg/kg) were detected in carrot roots harvested from plots treated PRE by this herbicide. This is in accordance with the previous findings, which confirmed that primary uptake of flufenacet occurs both via the roots and emerging shoots of treated plants (Grichar et al. 2003). If flufenacet had been used POST, residues ranged from 0 to 45 µg/kg. No flufenacet residue was detected in 2014. The dynamic of degradation of flufenacet in carrot roots is shown in Figure 3, where the horizontal line shows MRL for flufenacet in carrot (50 µg/kg). Similar results appeared when the flufenacet was applied in wheat, soybean, potato, and tomato (Imai et al. 2019).

Pendimethalin residue was found in all carrot root samples which were harvested from plots treated PRE by pendimethalin (from 63 to 146 days after application) ranged between 0 and 7 µg/kg (1 % MRL). No residue of pendimethalin was recorded in 2014. Higher amount of residue (18-82 µg/kg) occurred after the POST application (harvest 15 - 63 days after application). However, detected values showed a large variation. Therefore, residues of pendimethalin less than 10 µg/kg cannot be guaranteed in specific soil and weather conditions. In different studies, pendimethalin and its metabolites were not detected in any of tested carrot samples (Engebretson et al. 2001, Singh et al. 2010). The dynamic of degradation of pendimethalin in carrot roots is shown in Figure 4. The residues of pendimethalin were detected in leaves after PRE and POST application, as well. This is not completely in compliance with previous conclusions which claimed that pendimethalin is absorbed by the roots and leaves, but not translocated in plant (Appleby and Valverde 1988, Gilliam et al. 1993).

Linuron was completely restricted in European Union in 2019. Linuron residue was found in all carrot root samples from PRE treatment (from 80 to 146 days after application) ranged between 0 and 4 µg/kg (2 % MRL). Residue of linuron in carrot roots fast decreased below MRL. Amount of linuron residue did not exceed 15 µg/kg after POST application in 2012-2015; however, in 2016 residues linuron ranged between 0 and 53 µg/kg (harvest was carried out 4-52 days after application). Khan et al. (1976) did not detect linuron residue, at final harvest time. In 2012, however, the small amount of residue (3 µg/kg) was detected even 127 days after the application. This could be due to the slow degradation of linuron in the soil during dry conditions. This agrees with the research of Fryer and Kirkland (1970) who detected linuron residues at levels less than 5 µg/kg in carrots sampled 15 weeks after the application of herbicide and this residue amount was also affected by weather conditions. On the contrary, Løkke (1974) did not found any interaction between the amount of linuron residues (including metabolite products) in carrot and interval between the herbicide application and carrot harvest (57 – 117 days). In our study, the dynamic of degradation of linuron in carrot roots is shown in Figure 5, where the horizontal line shows MRL for linuron in carrot (10 µg/kg). Linuron residues were found in leaves in 2015 and 2016. This is expected because this active ingredient moves apoplastically with the transpiration stream after uptake by roots (Ducruet 1991).

Metribuzin was degraded under the value for non-residue production already two days after POST application in 2013. Metribuzin showed similar results with rapid degradation in sugarcane (Selim and Naquin 2011). Slower degradation of metribuzin was recorded in 2016, where 34 µg/kg of metribuzin was detected in carrot roots four days after POST application, which is still under the value of MRL (100 µg/kg). Residue of active ingredient metribuzin was not found in carrot roots harvested 70 days after POST application. The dynamics of degradation of metribuzin in carrot roots are shown in Figure 6. Low levels of herbicide residue (3 µg/kg) were found in carrot up to 58 days after application. Therefore, it is necessary to

respect the withdrawal period (60 days); which is, of course, important for all pesticides. Low decreasing of metribuzin residues reported also Stoleru et al. (2015), who detected low amounts of residue (2 µg/kg) in vegetable samples at the harvest time. Moreover, persistence of metribuzin in the soil could be greater than 60 days (Saritha et al. 2017).

Clomazone was applied only PRE because its metabolic selectivity to carrot is relatively low and cannot be used POST (Rigoli et al. 2008). Residue of clomazone was detected only in one sample (2 µg/kg) of carrot root in 2012. In other experimental years, no clomazone residue was recorded in any tested sample of carrot. Low application rate (8 g/ha) and fast degradation of clomazone in soil is probably the main reason for low concentrations found in carrot root samples in our study. Similar results were found in soybean, where residue of clomazone at harvest time were always below the limits of quantification (Hu et al. 2011, Nalini et al. 2015). Residues of the clomazone were below the maximum residue levels in *Brassica napus* after 22 days after the herbicide application (Szpyrka et al. 2020).

The fate of the herbicide in the environment is affected by many factors, among them temperature and moisture are most important. Differences in herbicide residue content in leaves in 2015 compared to 2014 and 2016 can be attributed to the low precipitation (sum April to August 185 mm in 2015, 268 mm and 312 mm in 2014 and 2016, respectively) and higher temperatures in this period. Clomazone half-life in the soil shortened significantly when the average temperature was higher and stable (Szpyrka et al. 2020). Periods of drought and low temperatures slow down the decomposition of herbicides in the soil and affect their uptake by plants (Grygiel et al. 2012).

Herbicide residue levels in carrot leaves were significantly higher compared to herbicide residues in roots (Table 4). This agrees with research of Yajima et al. (2017) who founded the highest pesticide residue amounts in leaves. However, we did not detect any residue of clomazone in carrot leaves (only PRE application). Considering that carrot leaves are not

usually eaten, this finding should not be concerning and MRLs for carrots are only established for the roots.

Moreover, with only one exception in aclonifen (87-217 µg/kg) in 2014, no residues were detected in roots one month after application. This can be attributed to the heavy precipitation in May 2014.

The measured values of herbicide residues in carrot treated by aclonifen, pendimethalin, metribuzin, flufenacet and clomazone did not exceed the MRL in any tested sample. All tested herbicides can be used for low-residual carrot production if growers adhere to the recommended withdrawal period interval between application and harvest.

PRE application of clomazone, linuron and flufenacet can be used for non-residue carrot production. POST application of metribuzin can be used for non-residue carrot production if interval between application and harvest is at least 80 days.

Acknowledgements: Field experiments were carried out on Demonstrational and Experimental Centre of Faculty of Agrobiolgy, Food and Natural Resources. Authors very thank Dr. Theresa Ann Reinhardt Piskackova from North Carolina State University for proofreading of the manuscript.

References

- Amjad M., Ahmad T., Iqbal Q., Nawaz A., Jahangir M.M. (2013): Herbicide contamination in carrot grown in Punjab, Pakistan. *Pakistan Journal of Agriculture Science*, 50: 7-10.
- Appleby A.R., Valverde B.E. (1988): Behaviour of dinitroaniline herbicides in plants. *Weed Technology*, 3: 198-206.
- Araujo E.A., Lara M.C.R., dos Reis M.R., Viriato,R.L.S., Rocha R.A.R., Gocalves R.G.L., Heleno F.F., de Queiroz M.E.L.R., Tronto J., Pinto F.G. (2016): Determination of haloxyfop-methyl, linuron, and proxymidone pesticides in carrot using SLE-LTP extraction and GC-MS. *Food Analytical Methods*, 9: 1344-1352.
- Baig S.A., Akhter N.A., Ashfaq M., Asi M.R. (2009): Determination of the organophosphorus pesticide in vegetables by high-performance liquid chromatography. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, 5: 513-519.
- Coelho M., Bianco S., Carvalho L.B. (2009): Weed interference on carrot crop (*Daucus carota*). *Planta Daninha*, 27: 913-920.
- COMMISSION DIRECTIVE 2006/141/EC of 22 December 2006 on infant formulae and follow-on formulae and amending Directive 1999/21/EC.
- Ducruet J.M. (1991): Les inhibiteurs du photosysteme II. In: Scalla R.: Les herbicides: Mode d'Action et Principes d'Utilisation. INRA, Paris: 79-114. Paris.
- Engebretson J., Hall G., Hengel M., Shibamoto T. (2001): Analysis of pendimethalin residues in fruit, nuts, vegetables, grass, and mint by gas chromatography. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49: 2198-2206.
- FOOTPRINT DATABASE. <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/en/> (Visited on January 10th of 2021).

- Fryer J.D., Kirkland K. (1970): Field experiments to investigate long-term effects of repeated applications of MCPA, tri-allate, simazine and linuron: Report after 6 years. *Weed Research*, 10: 133-158.
- Gilliam C.H., Eakes D.J., Olive J.W. (1993): Herbicide use during propagation affects root initiation and development. *Journal of Environmental Horticulture*, 11: 157-159.
- Grichar W.J., Besler B.A., Brewer K.D., Palrang D.T. (2003): Flufenacet and metribuzin combinations for weed control and corn (*Zea mays*) tolerance. *Weed Technology*, 17: 346-351.
- Grygiel K, Sadowski J, Snopczyński T, Wysocki A. (2012): Herbicide residues in agricultural products and in the soil. *Journal of Ecology Health & Environment*, 16:159–163.
- Hu J.Y., Cao D., Den Z.B. (2011): Determination of clomazone residues in soybean and soil by high performance liquid chromatography with DAD detection. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 86: 444-448.
- Imai M., Takagi N., Yoshizaki M., Hosoki E., Kobayashi Y. (2019): Determination of flufenacet and its metabolites in agricultural products by LC-MS/MS. *Food Hygiene Safety Science*, 60: 1-6.
- ISO. ISO/IEC 17025 (2005). General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Geneva, Switzerland: ISO.
- Kahlau S., Schröder F., Freigang J., Laber B., Lange G., Passon D., Kleessen S., Lohse M., Schulz A., Von Koskull-Döring P., Klie S., Gille S. (2020): Aclonifen targets solanesyl diphosphate synthase, representing a novel mode of action for herbicides. *Pest Management Science*, 76: 3377-3388.
- Kavaliauskaite D., Starkute R., Bundiniene O., Jankauskiene J. (2009): Chemical weed control in carrot crop. *Acta Horticulturae*, 830: 385-389.

- Khan S.U., Belanger A., Hogue E.J., Hamilton H.A., Mathur S.P. (1976): Residues of paraquat and linuron in an organic soil and their uptake by onions, lettuce and carrots. *Canadian Journal of Soil Science*, 56: 407-412.
- Kilinc O., Grasset R., Reynaud S. (2011): The herbicide acetonifene: The complex theoretical bases of sunflower tolerance. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 100: 193-198.
- Kocourek F., Stará J., Holý K., Horská T., Kocourek V., Kováčová J., Kohoutková J., Suchanová M., Hajšlová J. (2017): Evaluation of pesticide residue dynamics in Chinese cabbage, head cabbage and cauliflower. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 34: 980-989.
- Løkke H. (1974): Residues in carrots treated with linuron. *Pesticide Science*, 5: 749-757.
- Malidza G., Glušac D., Takac A. (1997): Phytopharmacological value of herbicides in carrot production. *Acta Horticulturae*, 462: 549-552.
- Nalini R.R.P., Janaki P., Balusamy M., Chinnusamy C. (2015): Persistence and residues of clomazone in soil and soybean by HPLC-DAD. *Asian Journal of Chemistry*, 28: 51–54.
- Ogbuchiekwe E.J., McGiffen M.E., Nunez J., Fennimore S.A. (2004): Tolerance of carrot to low-rate preemergent and postemergent herbicides. *HortScience*, 39: 291-296.
- Rigoli R.P., Fontana L.C., Figueredo S.S., Noldin J.A. (2008): Response of beetroot (*Beta vulgaris*) and carrot (*Daucus carota*) to simulated glyphosate and clomazone drift. *Planta Daninha*, 26: 451-456.
- Robinson D.E., McNaughton K.E. (2012): Time of application of S-metolachlor affects growth, marketable yield and quality of carrot and red beet. *American Journal of Plant Science*, 12: 546-550.
- Saritha J.D., Ramprakash T., Rao P.C. (2017): Persistence of metribuzin in tomato growing soils and tomato fruits. *Nature Environment and Pollution Technology*, 16: 505–508.

- Selim H.M., Naquin B.J. (2011): Retention of metribuzin by sugarcane residue: Adsorption-desorption and miscible displacement experiments. *Soil Science*, 176: 520-526.
- Singh B., Bhullar M.S., Walia U.S., Randhawa S.K., Phutela R.P. (2010): Weed control in carrot (*Daucus carota*): Bio-efficacy and residues of pre-emergence herbicides. *Indian Journal of Ecology*, 37: 145-148.
- Stoleru V., Munteanu N., Hura C. (2015): Organophosphorus pesticide residues in soil and vegetable, through different growing systems. *Environmental Engineering and Management Journal*, 14: 1465-1473.
- Szpyrka E., Slowik-Borowiec M., Ksiazek P., Zwola A., Podbielska M. (2020): The difference in dissipation of clomazone and metazachlor in soil under field and laboratory conditions and their uptake by plants. *Scientific Reports*, 10: 3747.
- Wehtje G.J., Wilcut W., Hicks T.V., McGuire J. (1988): Relative tolerance of peanuts to alachlor and metolachlor. *Peanut Science*, 15: 53-56.
- Welbaum G.E. (2015): Vegetable production and practices. CABI, Boston.
- Winter C.K. (1992): Pesticide tolerances and their relevance as safety standards. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 15: 137-150.
- Yajima T., Fujita M., Iijima K., Sato K., Kato Y. (2017): Effect of sample preparation on the estimation of residue levels of sprayed pesticides in separate analyses of turnip roots and leaves: inclusion or exclusion of the root-shoot junction. *Journal of Pesticide Science*, 42: 119–123.

Table 1 Description of tested herbicides.

Trade name	Active ingredient	Formulation	Content of a.i. (g/L)	Application rate (g/ha a.i.)	Manufa
Bandur	aclonifen	SC	600	1800	Bayer Cro
Stomp 400 SC	pendimethalin	SC	400	1200	BA
Afalon 45 SC	linuron	SC	450	500	ADA
Sencor Liquid	metribuzin	SC	600	300	Bayer Cro
Cadou 500 SC	flufenacet	SC	500	150	Bayer Cro
Dual Gold 960 EC	S-metolachlor	EC	960	1152	Syng
Command 36 SC	clomazone	SC	360	72	FMC cor

SC – soluble concentrate; EC – emulsifiable concentrate

Table 2 Terms of post-emergence application in experimental years.

Herbicide	Days after sowing				
	2012	2013	2014	2015	2016
aclonifen	68	44	65	57 and 70	61
pendimethalin	-	-	-	-	49
linuron	68 and 84	44 and 69	65 and 77	48 and 70	35 and 61
metribuzin	68, 76 and 96	44, 56 and 77	65, 70 and 91	48 and 70	35 and 61
flufenacet	68	44	65	-	49
S-metolachlor	84	69	77	70	35 and 61

Table 3 Parameters of exponential decay models

Active ingredient	a	CI (95%)	b	CI (95%)	F-test	p-value
aclonifen	60.52	45.9-75.1	31.14	22.6-39.6	0.98	0.541
pendimethalin	165.73	121.4-210.0	22.37	16.8-27.9	0.89	0.646

linuron	76.53	48.5-104.6	9.09	5.6-12.5	1.86	0.290
metribuzin	21.40	16.8-27.1	9.28	6.1-12.4	0.78	0.147
flufenacet	129.63	83.2-156.1	13.82	8.2-19.4	0.59	0.789
S-metolachlor	122.11	82.3-161.9	15.66	10.08-21.24	1.59	0.397

a – parameter attained at x=0, b- parameter determining the steepness of the decay, CI – confidence interval, p-value (0.05)

Table 4 Concentration of herbicides in roots and leaves a month after application (mean \pm standard deviation).

Herbicide	Concentration of herbicide ($\mu\text{g}/\text{kg}$)					
	2014		2015		2016	
	roots	leaves	roots	leaves	roots	leaves
aclonifen	20 \pm 11	217 \pm 49	0 \pm 0	87 \pm 25	26 \pm 12	194 \pm 32
pendimethalin	0 \pm 0	9 \pm 5	2 \pm 2	62 \pm 21	5 \pm 3	18 \pm 9
linuron	0 \pm 0	28 \pm 14	3 \pm 3	44 \pm 26	3 \pm 3	25 \pm 11
metribuzin	0 \pm 0	34 \pm 18	0 \pm 0	61 \pm 30	4 \pm 2	54 \pm 18
flufenacet	0 \pm 0	52 \pm 20	2 \pm 2	68 \pm 24	3 \pm 2	60 \pm 26
S-metolachlor	0 \pm 0	152 \pm 47	5 \pm 4	10 \pm 5	16 \pm 7	38 \pm 15

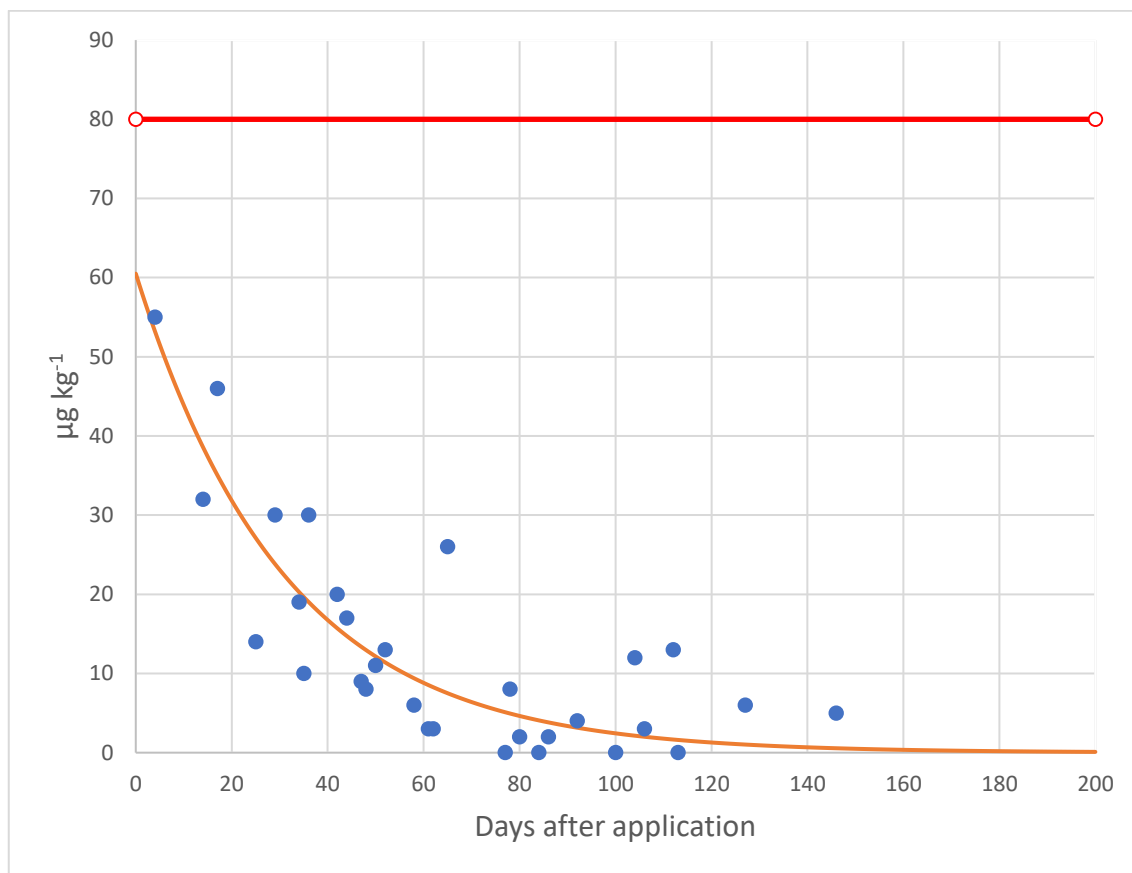


Figure 1 The course of degradation of aclonifen in carrot roots at time scale (data from 2012-2016). Red horizontal line shows MRL $80 \mu\text{g/kg}$.

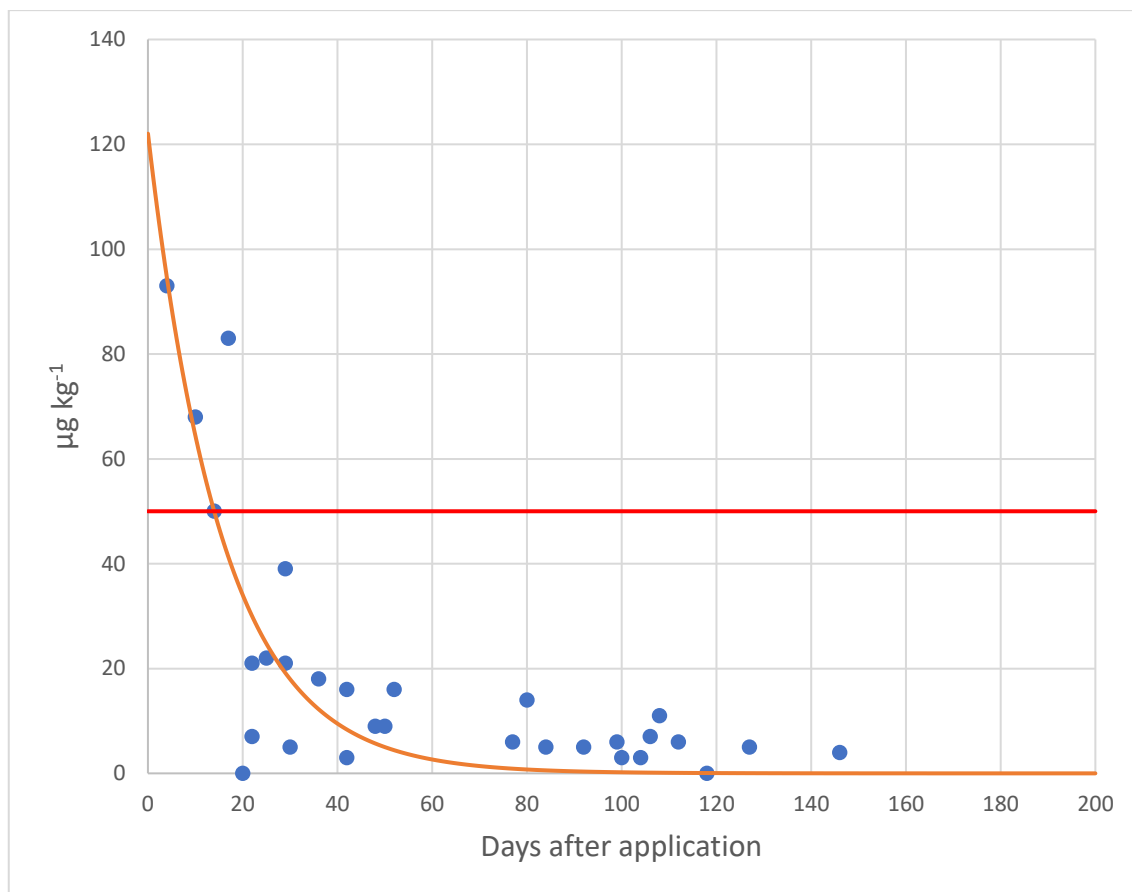


Figure 2 The course of degradation of S-metolachlor in carrot roots at time scale (data from 2012-2016). Red horizontal line shows MRL $50 \mu\text{g/kg}$.

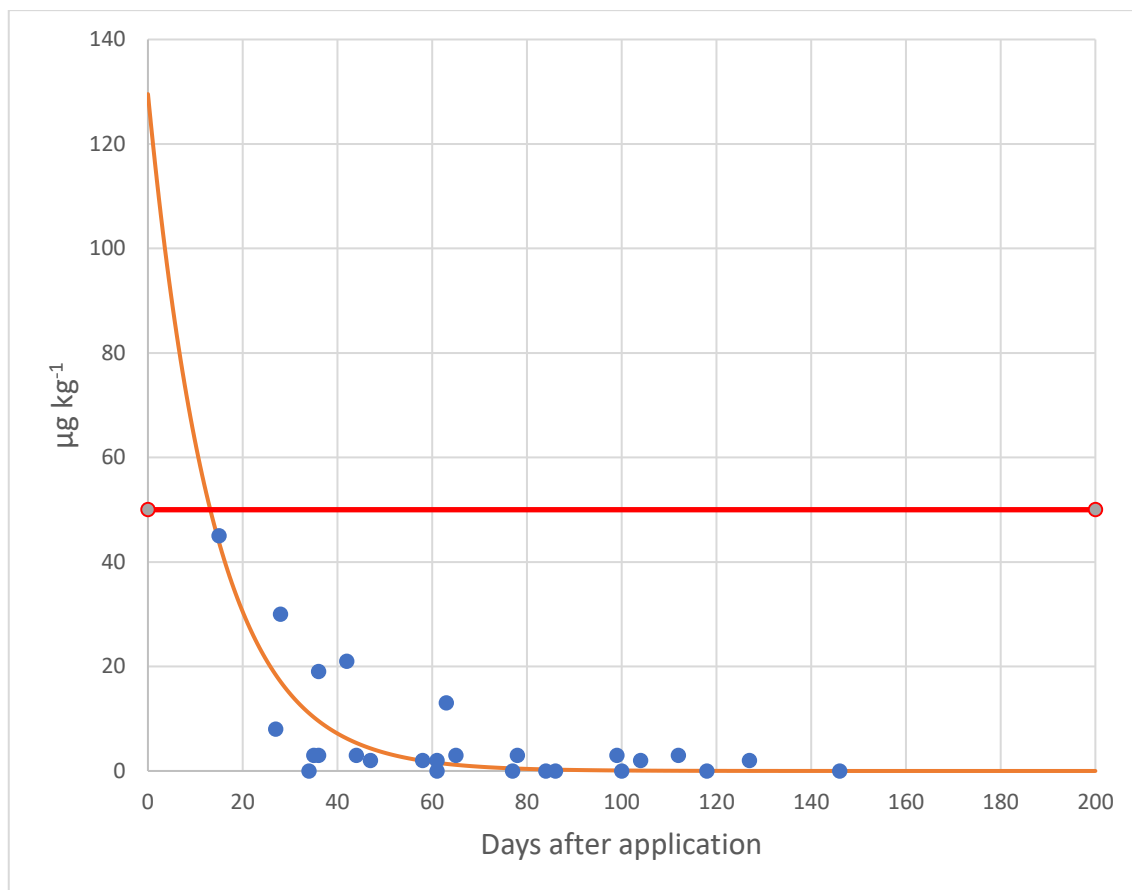


Figure 3 The course of degradation of flufenacet in carrot roots at time scale (data from 2012-2016). Red horizontal line shows MRL 50 µg/kg.

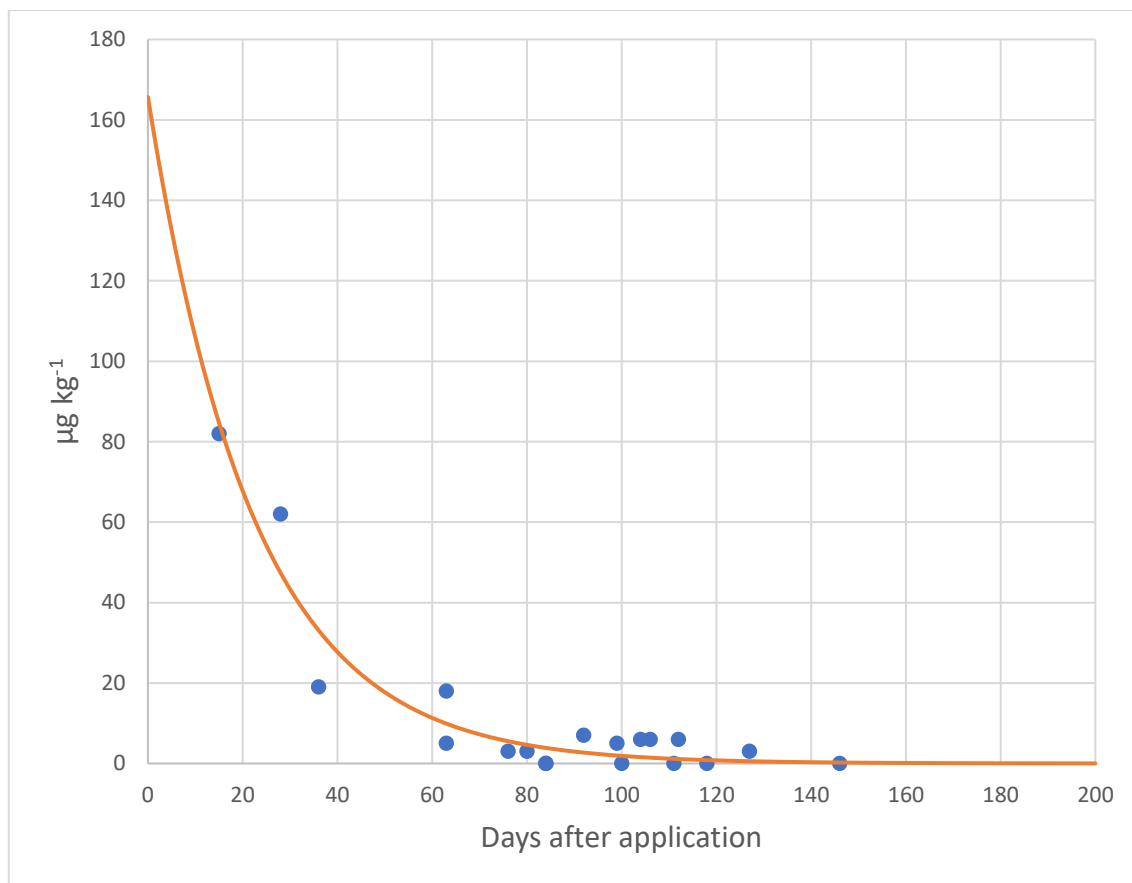


Figure 4 The course of degradation of pendimethalin in carrot roots at time scale (data from 2012-2016; MRL 700 $\mu\text{g/kg}$).

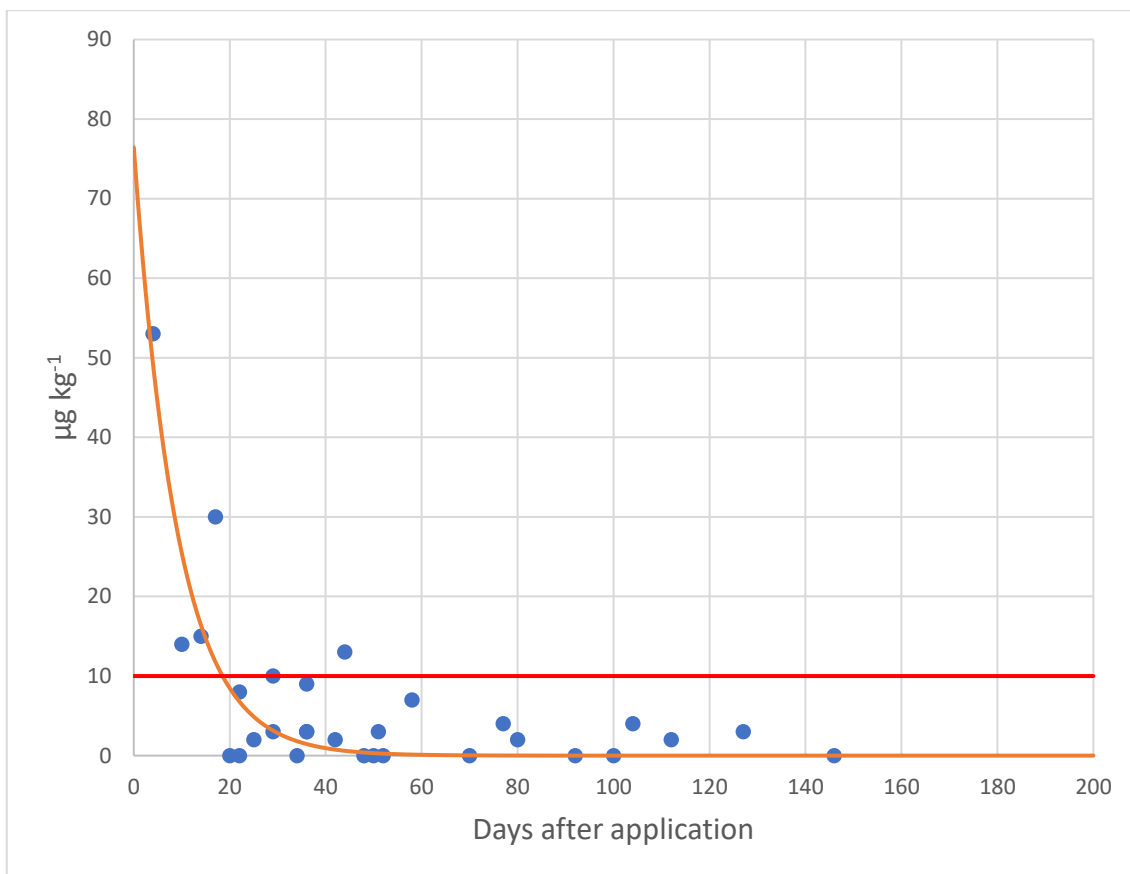


Figure 5 The course of degradation of linuron in carrot roots at time scale (data from 2012-2016). Red horizontal line shows MRL 10 $\mu\text{g/kg}$.

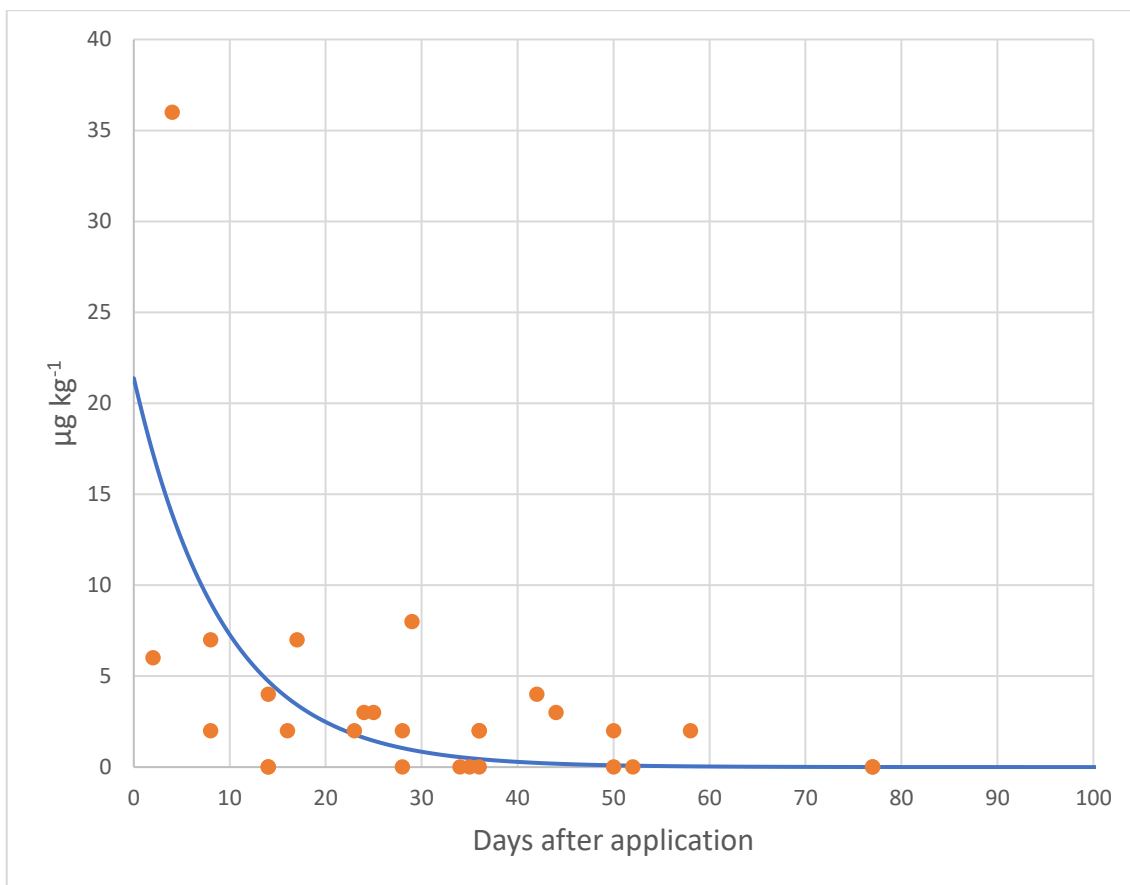


Figure 6 The course of degradation of metribuzin in carrot roots at time scale (data from 2012-2016; MRL 100 $\mu\text{g/kg}$).

5. Sumární diskuse

5.1. Obsah reziduí herbicidů v zelenině

5.1.1. Půdní herbicidy

Pendimethalin byl detekován ve všech testovaných zeleninách, přičemž zejména při postemergentním použití byly zaznamenány poměrně vysoké koncentrace tohoto herbicidu ve sklizené zelenině. Pokud byl aplikovaný preemergentně, byl detekován ve vzorcích mrkve v hodnotách nižších než 10 µg/kg. Naměřené hodnoty však vykazovaly poměrně značný rozptyl, což bylo způsobeno odlišnými povětrnostními podmínkami v jednotlivých letech. Odlišné výsledky prezentovali Engebrelson et al. (2001) a Singh et al. (2010), kteří nedetekovali žádná rezidua pendimethalinu v mrkvi. Ve sklizených vzorcích cibule byl pendimethalin detekován 18 týdnů po preemergentní i postemergentní aplikaci (1-5 µg/kg). Nízké koncentrace reziduí pendimethalinu ve sklizených plodinách detekoval také Sondhia (2009), jehož záchyty reziduí tohoto herbicidu byly na hodnotě meze detekce měření (1 µg/kg). Lazic (1995) zaznamenal snížení obsahu reziduí pendimethalinu během vegetace cibule na polovinu během 50 dní po aplikaci. S těmito výsledky se však neshodují Lazic et al. (1997), kteří ve vzorcích zelené cibule naměřili až 239 µg/kg a ve vzorcích zralé suché cibule až 113 µg/kg pendimethalinu. Také Tsiropoulos & Miliadi (1998) a Sharma & Mehta (1989) detekovali ve sklizených cibulích mnohem vyšší obsah pendimethalinu (54-103 µg/kg), avšak jimi použitá aplikační dávka byla o 25 % vyšší. Ve vzorcích květáku z našich pokusů byl ale pendimethalin po postemergentní aplikaci detekován pouze jednou (3 µg/kg) a to v roce 2013 po vysokých srážkách. Sondhia (2013) také detekoval velmi nízké obsahy pendimethalinu (do 3 µg/kg) ve vzorcích květáku, rajčat a ředkve sklizených 70 dní po aplikaci. Nejvyšší obsahy pendimethalinu v našich pokusech byly zaznamenány v salátu, kde byl tento herbicid 40 dní po aplikaci detekován v hodnotách vyšších než MRL (50 µg/kg). Pokud však byl salát sklizen po více jak 50 dnech po aplikaci, byl obsah reziduí menší než 50 % MRL (0-22 µg/kg). S rostoucí hmotností biomasy salátu nejspíše docházelo k nakoncentrování reziduí herbicidu, či byl průběh degradace pendimethalinu zrychlen. Detekovatelné malé množství reziduí (3 µg/kg) bylo nalezeno ještě 55 dní po aplikaci. Podobné výsledky zaznamenali také Estruk et al. (2014), kteří detekovali v salátu 0-35 µg/kg pendimethalinu. Obsah reziduí pendimethalinu ve vzorcích kedluben z našich pokusů byl relativně nízký (2-7 µg/kg). Nejvyšší obsah reziduí v kedlubnách (7 µg/kg) byl zjištěn, pokud po aplikaci herbicidu následovala intenzivní závlaha, která herbicid zapravila do půdy, kde nemohlo dojít k jeho fotodegradaci, k čemuž je tento herbicid poměrně

citlivý. Vliv adjuvantu Grounded na obsah reziduí se projevil pouze v jednom pokusném roce, kdy významně snížil obsah reziduí pendimethalinu ve sklizených kedlubnách. Vedle toho jsme zaznamenali průkazný vliv zakrývací netkané textilie na obsah reziduí pendimethalinu v salátu. Pokud byl ošetřený porost salátu zakryt netkanou textilií, snížil se obsah reziduí na polovinu, zejména za chladného počasí, kdy byl metabolismus rostlin salátu výrazně zpomalen, což se projevilo také menší velikostí hlávky.

S-metolachlor aplikovaný preemergentně nebyl ve vzorcích salátu ani cibule detekován. Ve vzorcích mrkve ošetřených preemergentně tímto herbicidem byl detekován S-metolachlor v hodnotách do 20 µg/kg až 120 dní po aplikaci a pokud byl aplikován postemergentně, byly jejich koncentrace ve vzorcích mrkve ještě vyšší (až 100 µg/kg) a přesahovaly hodnotu MRL (50 µg/kg). Ve vzorcích mrkve z pákistánských tržišť byl S-metolachlor nalezen Amjadem et al. (2013) v koncentracích 45-75 µg/kg. Ve vzorcích cibule byl S-metolachlor nalezen pouze po postemergentní aplikaci, nicméně jeho obsah klesl pod mez detekce již za 3 týdny po aplikaci. Pokud byl S-metolachlor aplikován postemergentně do porostu kvěťáku, nebyl ve vzorcích detekován. Podobné výsledky publikoval také Stachniuk et al. (2017), který nezaznamenal žádná rezidua S-metolachloru ve vzorcích brukvovité zeleniny.

Flufenacet aplikovaný preemergentně nebyl ve vzorcích salátu detekován. Ve všech vzorcích mrkve však byla rezidua tohoto herbicidu detekována na hranici meze detekce (2 µg/kg). To se shoduje s poznatky Grichara et al. (2003), kteří potvrdili, že hlavní příjem flufenacetu probíhá prostřednictvím kořenů. Detekovaná množství flufenacetu byla ale vždy pod hodnotou MRL. V případě postemergentního ošetření mrkve byl obsah reziduí flufenacetu do 45 µg/kg. Po postemergentní aplikaci do cibule nebyla rezidua flufenacetu detekována. Imai et al. (2009) prezentovali podobné výsledky ve studii, kde byl flufenacet aplikován do porostů pšenice, sóji, brambor a rajčat.

Preemergentně aplikovaný **dimethenamid** nebyl ve vzorcích salátu detekován. Rezidua tohoto herbicidu nebyla nalezena ani po postemergentní aplikaci v kvěťáku a cibuli. Výsledky našich pokusů jsou však v rozporu s výsledky Słowik-Borowiece et al. (2015), kteří detekovali rezidua dimethenamidu v horčici bílé 21-90 dní po aplikaci.

Preemergentně aplikovaný **pethoxamid** nebyl ve vzorcích cibule detekován. Avšak ve vzorcích mrkve byl detekován vždy na hranici meze detekce měření. Obdobné výsledky publikovala také Doležalová et al. (2020), která zaznamenala malé množství reziduí pethoxamidu (3 µg/kg) ve sklizené roketě seté ošetřené tímto herbicidem.

Clomazone aplikovaný preemergentně do porostu zeleniny nebyl ve vzorcích salátu ani květáku detekován v žádném pokusném roce. Ve vzorcích mrkve byl nalezen clomazone pouze v roce 2012 a to ve velmi nízké koncentraci (2 µg/kg). Nízká aplikační dávka (8 g/ha) a rychlá degradace clomazone v půdě byly pravděpodobně hlavním důvodem jeho nízkých koncentrací v testovaných vzorcích zeleniny. Podobné výsledky prezentovali rovněž Pornprom et al. (2010), Hu et al. (2011), Nalini et al. (2015) a Hussan et al. (2020), kteří nezaznamenali žádná rezidua clomazone v sóji. Naopak Spzyrka et al. (2020) sledovali obsah clomazone v řepce a zjistili, že obsah reziduí tohoto herbicidu klesne pod MRL za 22 dní po aplikaci.

Ve vzorcích cibule byla nalezena rezidua **ethofumesate** po jeho preemergentním ošetření a to i 20 týdnů po aplikaci (2-6 µg/kg). Takto pomalou degradaci ethofumesate sledoval také Kucharski (2007) v cukrové řepě, kde při sklizni detekovali 2 µg/kg.

Preemergentně aplikovaný **propyzamide** v salátu poměrně rychle degradoval, avšak jeho rezidua byla detekována i 6 týdnů po aplikaci (2-6 µg/kg). Podobné výsledky zaznamenali i Rouchaud et al. (1987), kteří propyzamide detekovali ve vzorcích salátu v koncentracích 2-3 µg/kg. Batts et al. (2008) doporučují propyzamide aplikovat v salátu pouze pokud lze dodržet ochranou lhůtu více než 55 dní.

Preemergentně i postemergentně aplikovaný **linuron** byl ve vzorcích mrkve rychle degradován pod hranici MRL. Podobných výsledků dosáhli i Khan et al. (1976), kteří nedetekovali rezidua linuronu v mrkvi při sklizni. V roce 2012 bylo jednou ve vzorcích mrkve detekováno malé množství reziduí linuronu (3 µg/kg) až 18 týdnů po aplikaci. Toto může být způsobeno pomalou degradací linuronu v suché půdě. I Fryer & Kirkland (1970) detekovali v mrkvi rezidua linuronu v koncentracích menších než 5 µg/kg až 15 týdnů po aplikaci. Množství reziduí bylo podle nich také ovlivněno povětrnostními podmínkami v průběhu vegetace. Naopak Løkke (1974) nezaznamenal žádné interakce mezi koncentrací reziduí linuronu v mrkvi a intervalem mezi aplikací herbicidu a sklizní plodiny (57-117 dní).

Aclonifen byl detekován v největším počtu vzorků testovaných zelenin ošetřených tímto herbicidem. Pokud byl aplikován preemergentně a cibule, resp. mrkev byla sklizena 100-140, resp. 80-150 dnů od aplikace, byl obsah reziduí v cibuli do 5 µg/kg a v mrkvi do 26 µg/kg. Pokud byla aplikace provedena postemergentně, byla týden po aplikaci koncentrace aclonifenu v cibuli 82 µg/kg, což převyšuje hodnotu MRL (50 µg/kg). Jeho další degradace byla pozvolná, přičemž 5 týdnů po aplikaci byla jeho koncentrace v cibuli pod 50 % MRL a 6 týdnů po aplikaci po 25 % MRL. Po postemergentní aplikaci do mrkve se 30 až 60 dní po aplikaci pohyboval

obsah reziduí do 3-11 % MRL (100 µg/kg). Podle Kilince et al. (2011), který sledoval příjem a pohyb aclonifenu ve slunečnici, jsou obsahy aclonifenu v nadzemních i podzemních orgánech rostlin, postemergentně ošetřených tímto herbicidem, vyšší z důvodu omezené schopnosti rostlin metabolizovat herbicid v nadzemních orgánech.

Preemergentně aplikovaný **metazachlor** nebyl ve sklizených kedlubnách ani kvěťáku detekován. Nebylo tedy možné posoudit vliv závlahy a adjuvantu na koncentraci reziduí v kedlubnách v našich pokusech. Podle Koleva-Valkova et al. (2016) byla v rostlinách řepky ošetřených postemergentně metazachlorem detekována rezidua 8-28 dní po aplikaci, avšak 48 dní po aplikaci již nebyla detekována žádná rezidua. Naopak výrazně vyšší koncentrace metazachloru byla detekována v řepce 28-68 dní po preemergentní aplikaci, kdy až 88 dní po aplikaci byl obsah reziduí nižší než mez detekce. Stejní autoři zaznamenali také velký rozdíl mezi pokusnými roky, kdy v sušších podmínkách byl záchyty reziduí výrazně vyšší, zejména u preemergentních aplikací.

Postemergentně aplikovaný **metribuzin** byl ve vzorcích mrkve již za 2 dny degradován pod hodnotou MRL. Stejně rychlou degradaci prokázal metribuzin v cukrové třtině (Selim & Naqun 2011). Lze tedy předpokládat, že listový příjem metribuzinu mrkvi je minimální a herbicid může na povrchu listů podléhat rychlé degradaci. Stoleru et al. (2015) rovněž zaznamenali rychlou degradaci metribuzinu v zelenině, avšak malé množství metribuzinu (2 µg/kg) detekovali také v zelenině sklizené v optimální zralosti.

V žádném z testovaných vzorků kvěťáku nebyl detekován **dimethachlor** ani **napropamide**. Napropamide nebyl nalezen ani ve vzorcích paprik a rajčat od španělských pěstitelů (Murillo Pulgarín & García Bermejo 2003), stejně jako dimethachlor nebyl nalezen ve vzorcích rockety seté, kde byly tyto herbicidy použity krátce před výsadbou (Doležalová et al. 2020). Nicméně Srivastava et al. (2011) našli rezidua dimethachloru ve vzorcích špenátu a zelí v koncentracích do 25 µg/kg.

5.1.2. Listové herbicidy

Největší záchyty reziduí herbicidů byly v našich pokusech zaznamenány po aplikaci některých listových graminicidů, zejména těch ze skupiny aryloxyfenoxi-propionátů. Nejpomalejší degradace byla zaznamenána u **fluazifopu** v kvěťáku, kde byla rezidua fluazifopu detekována i v případě, že doba od aplikace do sklizně byla delší než 40 dní, přičemž nejvyšší

záchyt (2,796 µg/kg) byl zaznamenán v případě, že aplikace byla provedena 11 dní před sklizní. Podobnou dynamiku degradace zaznamenal Doohan et al. (1986). V jeho studii se koncentrace reziduí fluazifopu v jahodách pohybovala v rozsahu 50-3,240 µg/kg. 12 až 28 dní po aplikaci. Rovněž Sondhia (2007) detekoval poměrně vysoké koncentrace fluazifopu v sójových semenech i slámě (297-702 µg/kg). Naopak Balinová & Landová (1992) nezaznamenaly žádná rezidua v semenech sóji ošetřené fluazifopem. Riziko kontaminace květáku a salátu fluazifopem je poměrně vysoké také kvůli relativně nízkým hodnotám MRL v EU (10, resp. 20 µg/kg). Délka vegetace těchto zelenin je navíc poměrně krátká (méně než 60 dní u salátu a 90 dní u květáku), přičemž listové graminicidy se obvykle aplikují 3-5 týdnů po výsadbě (Gelmini et al. 2000). Velmi vysoké koncentrace fluazifopu byly detekovány i ve vzorcích cibule a mrkve, kde ale po 6 týdnech klesl obsah reziduí pod mez detekce. Podobné výsledky popisují Qi et al. (2017), kteří zaznamenali v rajčatech a okurkách pomalejší degradaci fluazifopu oproti jeho degradaci v čínském zelí a řepce. Kucharski (2003) detekoval fluazifop ve sklizené řepě v množství 12 µg/kg, což je koncentrace překračující limit pro bezreziduální produkci. Naproti tomu, pokud byl fluazifop aplikován do hořčice bílé, tak již za 7 dní po aplikaci klesla koncentrace reziduí pod hodnotou 10 µg/kg (Słowik-Borowiec et al. 2015).

Koncentrace reziduí **quizalofopu** byly ve všech testovaných vzorcích zeleniny pod hodnotou MRL a nepřesáhly 400 µg/kg u salátu a 100 µg/kg u mrkve, cibule a květáku. Poměrně nízké koncentrace reziduí quizalofopu (104 µg/kg) zaznamenali také Poonia et al. (2017) v plodech podzemnice olejné, přičemž obsah reziduí se rychle snižoval a dva měsíce po aplikaci již byly koncentrace quizalofopu pod mezí detekce (10 µg/kg). Malé množství quizalofopu (9 µg/kg) detekoval také Kucharski (2003) ve sklizené řepě. Naopak Sahoo et al. (2013) nedetekovali rezidua quizalofopu v cibuli při sklizni.

Z testovaných listových graminicidů nebyl ve vzorcích salátu, květáku ani mrkve detekována žádná rezidua **cycloxydimu**. Také rezidua **propaquizafopu** nebyla ve vzorcích květáku, mrkve ani cibule detekována. Rovněž Duhan & Sing (2018) nenalezli žádná rezidua propaquizafopu v semenech a vláknech bavlny v době sklizně. Žádné další relevantní studie zaměřené na rychlost degradace dvou výše uvedených listových graminicidů nebyly dosud publikovány.

Postemergentně aplikovaný clopyralid, picloram, quinmerac a pyridate nebyly detekovány v žádném testovaném vzorku květáku. Rovněž Zhao et al. (2010) nedetekovali při sklizni řepky žádná rezidua clopyralidu ani picloramu, a to ani pokud byly oba herbicidy

aplikovány současně. Pyridate nebyl detekován ani ve vzorcích cibule, které byly postemergentně ošetřeny tímto herbicidem. V žádném vzorku cibule nebyl rovněž detekován flumioxazin ani fluroxypyr aplikovaný postemergentně.

5.2. Vliv agrotechnických opatření na účinnost a selektivitu herbicidů

5.2.1. Vliv závlahy a adjuvantu

Nejrůznější aditivní látky (adjuvanty) jsou velmi často přidávány k mnoha herbicidům za účelem zvýšení jejich účinnosti, případně selektivity. Adjuvanty mohou pozitivně ovlivňovat plošnou rovnoměrnost aplikace (postřiku), povrchové napětí postřikových kapének a velmi významně mohou ovlivňovat chování herbicidu v prostředí (Green & Beestman 2007; Cabrera et al. 2010). Adjuvant Grounded (emulgovatelný koncentrát rafinovaného parafinového oleje (732 g/l), alifatických hydrokarbonů, hexahydrických alkohol ethoxylátů a C18-C20 mastných kyselin), který byl použit v našich pokusech v porostu kedluben, však neovlivnil účinnost ani selektivitu testovaných půdních herbicidů (metazachlor, pendimethalin a jejich kombinace). Podobné výsledky zdokumentovali rovněž Andr et al. (2017), kteří testovali dva odlišné adjuvanty a tři půdní herbicidy ve slunečnici.

Ve stejné studii byl prokázán vliv závlahy, resp. intenzivních srážek, krátce po aplikaci herbicidu na účinnost testovaných herbicidů (především pendimethalinu) na merlík bílý a penízek rolní. Přestože je pozitivní vliv srážek na účinnost půdních herbicidů dobře znám (Jursík et al. 2013; Smith et al. 2016; Hakoomat et al. 2017), v některých situacích může závlaha ovlivnit účinnost herbicidů negativně, neboť proplavení herbicidu hlouběji do půdy může snížit jeho koncentraci v povrchové vrstvě půdy a odolnější plevelé pak mohou začít vzcházet (Wilson & Sbatella 2014).

Velmi významně byla závlahou ovlivněna selektivita herbicidu metazachlor, zatímco selektivita pendimethalinu nebyla závlahou průkazně ovlivněna. Na druhou stranu byly zaznamenány velké rozdíly ve fytotoxicitě pendimethalinu mezi pokusnými ročníky. V sušších letech nezpůsobil pendimethalin poškození kedluben vyšší než 15 %, zatímco ve srážkově vydatnějších ročnících bylo poškození více než dvojnásobné. Také Miller et al. (2003) zaznamenali poškození košťálové zeleniny, konkrétně kvěťáku herbicidem pendimethalin, pokud byl použit v dávce 560 g/ha a vyšší. Toto poškození vedlo ke snížení výnosu, zejména pokud byla použita menší sadba a ošetření bylo provedeno na list (po výsadbě).

Pokud byla provedena závlaha po aplikaci metazachloru, byla účinnost na lilek leskloplodý 100 %, naopak v sušších podmínkách byla účinnost průkazně nižší (92-99 %). Nízkou účinnost pendimethalinu na plevelné lilky pozorovali i Glatkova & Pacanoski (2019).

Výnos kedluben nebyl ovlivněn způsobem závlahy ani použitým adjuvancem. Kosterna et al. (2011) sice pozoroval nárůst výnosu kedluben o 25 % v případě použití závlahy, nicméně v našich pokusech byl pokles výnosu v důsledku poškození herbicidy vyšší než pokles výnosu v důsledku konkurence plevelů. Sklizené kedlubny z ručně pleté varianty a varianty ošetřené metazachlorem měly průkazně vyšší hmotnost než kedlubny ošetřené pendimethalinem. Pokud byla aplikována kombinace pendimethalinu a metazachloru, hmotnost sklizených kedlubnů byla ještě nižší. S tím se neshodují Bairambekov & Valeeva (1996), kteří ve všech případech zaznamenali po aplikaci pendimethalinu nejvyšší výnos a žádné poškození okurek.

5.2.2. Vliv zakrývání netkanou textilií

Vliv zakrývání netkanou textilií velmi silně ovlivnil účinnost i selektivitu pendimethalinu v porostech salátu. Účinnost pendimethalinu byla průkazně vyšší, pokud byl ošetřený porost krátce po aplikaci zakryt transparentní netkanou textilií pouze v případě nedostatku srážek/závlahy. Nejvyšší vliv zakrývání byl zaznamenán v účinnosti na plevele tvořící větší semena (ježatka kuří noha, bažanka roční), která mohou vzcházet z větší hloubky (Abdallah 1991; Jursík et al. 2004).

Vliv použité dávky herbicidu na účinnost byl pozorován rovněž pouze v sušším roce (2012), kdy dochází k degradaci pendimethalinu v půdě v důsledku působení UV záření a tčkaním (Neururer and Womastek 1991). Ježatka kuří noha a bažanka roční byly lépe regulovány při vyšší dávce pendimethalinu (1200 g/ha). Merlík bílý byl na všech variantách pendimethalinem potlačen, avšak v roce 2012 došlo ke snížení jeho účinnosti na nezakryté variantě na 96-98 %. S tím se shodují i Alebahim et al. (2012), kteří ale pozorovali nižší účinnost pendimethalinu v bramborách na laskavec ohnutý. V našich pokusech byla také účinnost pendimethalinu na laskavec ohnutý nižší než na merlík bílý, ale byla stále velmi dobrá (více než 90 %). Účinnost pendimethalinu na lilek leskloplodý byla významně ovlivněna zakrýváním netkanou textilií i aplikovaným množstvím pouze za sušších podmínek. Nejnížší účinnost byla pozorována na nezakryté variantě s nízkou dávkou (77 %) a nejvyšší účinnost na lilek leskloplodý (97 %) byla zaznamenána na zakryté variantě s vyšší dávkou pendimethalinu.

Avšak v roce 2014 nebyl tento rozdíl potvrzen. Účinnost všech zkoumaných variant se pohybovala mezi 99-100 %. Dostatečnou účinnost pendimethalinu na lilek leskloplodý v salátu potvrzují i Lati et al. (2015).

Malé projevy fytotoxicity na salátu (do 4 %) se objevili 5 týdnů po aplikaci pendimethalinu v roce 2012 na všech variantách kromě varianty s nižší dávkou herbicidu a bez zakrytí netkanou textilií. Následně tyto projevy poškození do 7 týdnů po aplikaci odezněly. Vyšší poškození salátu pendimethalinem bylo po intenzivním dešti během vegetace. 5 týdnů po aplikaci bylo zaznamenáno poškození salátu až 15 %. Pokud byla aplikována vyšší dávka pendimethalinu (1200 g/ha) a salát byl zakryt netkanou textilií, zvýšilo se poškození salátu 7 týdnů po aplikaci až na 27 %. Toto zvýšení poškození bylo významně vyšší od ostatních variant, kde nepřekračovalo poškození salátů 10 %. S nízkým poškozením salátu (do 12 %) se shodují i Lati et al. (2015), kteří pozorovali převážně zpomalení růstu. Avšak v jejich pokusech nebyla potvrzena významná závislost mezi dávkou pendimethalinu a mírou fytotoxicity. Henderson & Webber (1993) navíc zkoumali fytotoxicitu způsobenou pendimethalinem aplikovaným do salátu po výsadbě. Takto ošetřený salát byl silně zakrnělý. V listové zelenině jsou po aplikaci pendimethalinu růstové retardace běžné (Lee et al. 1998).

Saláty z důvodu vyššího zaplevelení pod netkanou textilií měli o 35-46 % nižší výnos. S tím se neshodují Tosic et al. (2019), kteří sledovali po zakrytí salátu vyšší výnos i pozitivní vliv na obsah vitamínu C a dusičnanů. Konkurence letních plevelů byla větší při vyšších teplotách pod netkanou textilií než při nižších teplotách na nezakryté variantě. Vliv plevelů na růst a výnos salátu se v literatuře značně rozchází (Santos et al. 2004b versus Giacotti et al. 2010), což je pravděpodobně způsobeno odlišnou konkurenční schopností různých plevelů v různých povětrnostních podmínkách.

6. Závěr

Disertační práce je souborem pěti publikovaných vědeckých prací, které mají napomoci k optimálnějšímu používání herbicidů v porostech zeleniny s důrazem na snížení množství jejich reziduí ve sklizených produktech.

První hypotéza, že obsah reziduí herbicidů v zelenině lze snížit některými agrotechnickými opatřeními a prodloužením ochranných lhůt, byla potvrzena. Nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím množství reziduí v zelenině je délka intervalu mezi aplikací herbicidu a sklizní. Velmi významný vliv na množství reziduí půdních herbicidů měla také závlaha po aplikaci herbicidu a množství přírodních srážek v konkrétním roce.

Rezidua některých půdních preemergentně aplikovaných herbicidů (napropamide, clomazone a dimethachlor v kvěťáku; clomazone, linuron a flufenacet v mrkvi) nebyla detekována v žádném testovaném vzorku. V kvěťáku nebyla navíc detekována ani rezidua postemergentně aplikovaných herbicidů obsahující účinné látky S-metolachlor, pyridate, dimethenamid, metazachlor, quinmerac, picloram, clopyralid, cycloxydim a propaquizafop. Rezidua metazachloru nebyla detekována ani v kedlubnách. Lze tedy předpokládat, že pokud bude dodržena stanovená ochranná lhůta mezi aplikací těchto herbicidů a sklizní námi testovaných zelenin, lze tyto herbicidy doporučit do porostů, které jsou určeny pro dětskou výživu (bezreziduální produkce).

Rezidua pendimethalinu byla detekována ve všech zkoumaných zeleninách. V kvěťáku byl pendimethalin detekován zejména po vysokých srážkách, kdy navíc způsoboval vyšší poškození kvěťáku. Množství reziduí pendimethalinu v kedlubnách bylo nízké, avšak pokud nebyla provedena krátce po jeho aplikaci intenzivní závlaha, došlo k navýšení obsahu reziduí. Podobné výsledky byly zaznamenány také v případě použití pendimethalinu v mrkvi a salátu. Z důvodu dlouhé perzistence pendimethalinu v půdě lze předpokládat, že rezidua tohoto herbicidu v zelenině mohou být detekována po celou dobu vegetace testovaných zelenin. Tento herbicid proto nelze doporučit do porostů určených k bezreziduální produkci.

Nejpomalejší degradace byla zaznamenána u některých listových graminicidů, zejména u quizalofopu a fluazifopu. Rezidua quizalofopu byla v kvěťáku detekována téměř ve všech vzorcích, ale vždy pod hodnotou MRL. V nízkoreziduální produkci je možné quizalofop použít, pokud bude dodržena akční ochranná lhůta 50 dní. Do porostů určených pro dětskou výživu nelze tento herbicid doporučit.

Nejpomalejší degradace reziduí byla zjištěna u fluazifopu. Ještě 50 dní po aplikaci byl obsah reziduí v kvěťáku vyšší než hodnota MRL. Fluazifop sice není do kvěťáku registrován, ale je registrován do kapusty, což by mohlo pěstitele vést k použití v ostatních brukvovitých zeleninách. Fluazifop není vhodný do nízkoreziduální ani bezreziduální produkce zeleniny.

Naopak rezidua graminicidu cycloxydim a propaquizafop nebyly detekovány v žádném testovaném vzorku zeleniny a mohou proto být v souladu s jejich registrací, použity do porostů určených k nízkoreziduální i bezreziduální produkci zeleniny.

Druhá hypotéza, že dávky herbicidů používaných v zelenině lze výrazně snížit využitím vhodných agrotechnických opatření, při zachování vysoké účinnosti a selektivity ošetření, byla potvrzena také, avšak mezi jednotlivými opatřeními i herbicidy byly zaznamenány rozdíly:

- Použití adjuvantu Grounded nemělo vliv na účinnost ani selektivitu herbicidu obsahující úč. látku pendimethalin, metazachlor ani jejich kombinace v kedlubnách.
- Vyšší intenzita závlahy a dešťové srážky pozitivně ovlivnily účinnost obou testovaných herbicidů.
- Vysoká intenzita závlahy krátce po aplikaci metazachloru snížila jeho selektivitu.
- Pokud byly pendimethalin a metazachlor aplikovány společně, nebyl pozorován vliv na účinnost, zvýšila se však průkazně fytotoxicita ošetření.
- Výnos kedlubnů byl průkazně více ovlivněn poškozením způsobeným pendimethalinem než konkurencí plevelů.
- Použitím netkané textilie při pěstování salátu lze dosáhnout vyšší účinnosti půdních herbicidů, ale snižuje se jejich selektivita (herbicid se pomaleji rozkládá a odpařený herbicid může být snadněji přijímán listy zeleniny).
- Předpokládá-li se tedy zakrytí porostu netkanou textilií, je vhodné snížit dávku herbicidu minimálně o 50 % a to především u velmi raných výsadeb (březen), které jsou herbicidem nejčastěji poškozovány, protože herbicid je pomaleji metabolizován při nižších teplotách. Velmi důležité je toto opatření především u herbicidů obsahující úč. látku pendimethalin (významná degradace ultrafialovou složkou slunečního záření) a clomazone (vysoká intenzita těkání).
- Snížení dávky je vhodné i v podmínkách intenzivního zavlažování nebo před deštěm.
- Zelenina zakrytá netkanou textilií je citlivější vůči konkurenci plevelů, což se může projevit snížením výnosu v případě absence regulačního zásahu.

7. Použitá literatura

- Abad FC, Winck PR, da Silva JM, Caramao EB, Zini CA. 2010. Multiresidue determination of pesticides in carrots using pressurized liquid extraction and gas chromatography with mass spectrometry detector. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. **21**: 461-468.
- Abdallah MMF. 1991. Control of different weed species at different soil depths with soil solarization. *Egyptian Journal of Agronomy*. Special issue: 81–88.
- Abu-Hamdeh N, Abu-Qudais M. 2001. The economics of mechanical versus chemical weed control in peas and lettuce under different tillage systems and irrigation regimes. *Journal of agricultural engineering research* **79**: 177-185.
- Abulra'uf LB, Tan GH. 2013. Multivariate study of parameters in the determination of pesticide residues in apple by headspace solid phase microextraction coupled to gas chromatography–mass spectrometry using experimental factorial design. *Food Chemistry* **141**: 4344-4348.
- Ahn CK, Choi YW, Son BG, Kang JS. 2003. Effect of covering method of ventilating non-woven fabric and GA₃ treatment on the growth and yield of leaf lettuce during low temperature season. *Journal of Bio-Environmental Control*. **12**: 72–76.
- Alebrahim MT, Majd R, Rashed Mohassel MH, Wilcockson S, Baghestani, MA, Ghorbani R, Kudsk P. 2012. Evaluating the efficacy of pre- and post-emergence herbicides for controlling *Amaranthus retroflexus* L. and *Chenopodium album* L. in potato. *Crop Protection*. **42**: 345–350.
- Aliyu L, Adekpe DI, Mani H, Ogunlana MO. 2012. Response of carrot to mulching and irrigation interval at Kadawa, Nigeria. *Research on crops* **13**: 268-270.
- Al-Khatib K, Libbey C, Kadir S. 1995. Broadleaf weed control and cabbage seed yield following herbicide applications. *HortScience* **30**: 1211–1214.
- Altieri MA, Wilson RC, Schmidt LL. 1985. The effects of living mulches and weed cover on the dynamics of foliage- and soil-arthropod communities in three crop systems. *Crop Protection* **4**: 201-213.
- Amjad M, Ahmad T, Iqbal Q, Nawaz A, Jahangir MM. 2013. Herbicide contamination in carrot grown in Punjab, Pakistan. *Pakistan journal of agricultural sciences* **50**: 7-10.

- Andr J, Kočárek M, Jursík M, Fendrychová V, Tichý L. 2017. Effect of adjuvants on the dissipation, efficacy and selectivity of three different pre-emergent sunflower herbicides. *Plant Soil Environment*. **63**: 409–415.
- Ashton FM, Monaco TJ. 1991. *Weed Science: Principles and Practices* (3rd Edition). Wiley, New York.
- Baig SA, Akhtera NA, Ashfaq M, Asi MR. 2009. Determination of the organophosphorus pesticide in vegetables by High-Performance Liquid Chromatograph. *American-Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Science* **6**: 513-519.
- Bairambekov SB, Valeeva ZB. 1996. Herbicide application systems in a three-field vegetation component of crop rotation. *Russian Agricultural Sciences*. **11**: 24-27.
- Balinova AM, Lalova MP. 1992. Translocation, metabolism and residues of fluazifop-butyl in soybean plants. *Weed Research*. **32**: 143-147.
- Batts RB, Monks DW, Mitchem WE, Jennings KM. 2008a. Lettuce. Weed management in North Carolina. Department of Horticultural Science. NC State University.
- Batts RB, Monks DW, Mitchem WE, Jennings KM. 2008b. Weed management in North Carolina: Broccoli, Cabbage & Cauliflower. Department of Horticultural Science. NC State University.
- Bender I, Angver A. 2012. The Influence of Production Methods on Yield and Quality of Carrots and Swedes. *Acta Horticulturae* **960**: 293-298.
- Bond W. Evaluation of ioxynil, fluroxypyr and clopyralid for the control of volunteer potato in vegetable crops. *Aspects of Applied Biology*. **35**: 123-130.
- Boydston RA, Seymour MD. 2002. Volunteer potato (*solanum tuberosum*) control with herbicides and cultivation in onion (*allium cepa*). *Weed technology* **16**: 620–626.
- Buryšková L. 2006. Citlivost plodin na rezidua herbicidů v půdě. *Agromanuál* **2**: 60-63.
- Cabrera D, Lopez-Pineiro A, Albarran A, Pena D. 2010. Direct and residual effect on diuron behavior and persistence following two-phase olive mill waste addition to soil. *Geoderma*. **157**: 133–141.

- Carlson HL, Kirby D. 2005. Effect of herbicide rate and application timing on weed control in dehydrator onions. *Research progress* **115**: 4.
- Chaitanya K, Reddy SA, Reddy RVSK, Lavanya AVN. 2014a. Influence of integrated weed management of growth and yield of carrot. *Plant Archives* **14**: 611-613.
- Chaitanya K, Reddy SA, Lavanya AVN, Raju SS. 2014b. Integrated weed management in carrot (*Daucus Carota* L.) *Asian journal of mikrobiology, biotechnology and environmental sciences* **16**: 221-223.
- Cielsik LF, Vidal RA, Machado AB, Trezzi MM. 2017. Fluazifop-p-butyl efficacy as a function of application time and herbicide dose. *Planta daninha*. 35 (e017167349) DOI: 10.1590/s0100-83582017350100011
- Cobb AH, Reade JPH. 2010. *Herbicides and Plant Physiology*. Wiley-Blackwell. Oxford.
- Coelho M, Bianco S, Carvalho LB. 2009. Weed interference on carrot crop (*Daucus carota*). *Planta Daninha*. **27**: 913-920.
- Collins Ch. 2016. Environmental fate of propyzamide. California department of pesticide regulation. Sacramento.
- COMMISSION DIRECTIVE 2006/141/EC of 22 December 2006 on infant formulae and follow-on formulae and amending Directive 1999/21/EC
- Cudney DW, Orloff SB. 1988. Russian thistle, *Salsola iberica*, control in onion, *Allium cepa*. *Weed Technology*. **16**: 620-626.
- Doležalová I, Petrželová I, Duchoslav M. 2020. Selectivity and efficacy of herbicides dimethachlor and pethoxamid in rocket crop. *Plant Protection Science*. **56**: 305-316.
- Donald C, Porter I. Integrated Control of Clubroot. *Journal of Plant Growth Regulation*. **28**. 289. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9094-7>
- Donkor A, Osei-Fosu P, Nyarko S, Kingsford-Adaboh R, Dubex B, Asante I. 2015. Validation of QuEChERS method for the determination of 36 pesticide residues in fruits and vegetables from Ghana, using gas chromatography with electron capture and pulsed flame photometric detectors. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*. **50**: 560-570.
- Doohan DJ, Monaco TJ, Sheets TJ, Leidy RB. 1986. Residues and efficacy of fluazifop-buthyl in strawberries. *Weed Research*. **26**: 89-98.

- Duhang A, Sing S. 2018. Terminal residues of propaquizafop in cotton seed, lint and soil. *Journal of Cotton Research*. **32**: 133–138.
- Engebretson J, Hall G, Hengel M, Shibamoto T. 2001. Analysis of pendimethalin residues in fruit, nuts, vegetables, grass, and mint by gas chromatography. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. **49**: 2198-2206.
- Estruk O, Yakar Y, Ayhan Z. 2014. Pesticide residue analysis in parsley, lettuce and spinach by LC-MS/MS. *Journal of food science and technology*. **51**: 458-466.
- Farkas Z, Horvath Z, Kerekes K, Ambrus A, Hamos A, Szabo MS. 2014. Estimation of sampling uncertainty for pesticide residues in root vegetable crops. *Journal of Environmental Science and Health part b-Pesticides Food Contaminants and Agricultural Wastes*. **49**: 1-14.
- Fennimore SA, Rachuy JS, Valdez JA. 2011. Safe Lettuce Planting Intervals Following Herbicide Use on Fallow Beds. *Weed technology*. **25**: 103-106.
- Fennimore SA, Smith RF, McGiffen ME. 2001. Weed management in fresh market spinach (*Spinaca oleracea*) with S-metolachlor. *Weed Technology*. **15**: 511–516.
- Fennimore SA, Umeda K. 2003. Time of glyphosate application in glyphosate-tolerant lettuce. *Weed Technology*. **17**: 738–746.
- Figuroa R, Pacheco F, Echaiz C, Cordovez G, Kuhn N. 2016. Effects of preemergence herbicides on bell pepper, crop injury, and weed management in irrigated Chilean fields. *Weed Technology*. **30**: 587–594.
- Frenich AG, Fernandez MDM, Moreno LD, Vidal JLM, Lopez-Gutierrez N. 2012. Multiresidue pesticide analysis of tuber and root commodities by QuEChERS extraction and ultra-performance liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry. *Journal of AOAC International*. **95**: 1319-133.
- Frost PR, Hingston TL. 2004. Evaluation of new herbicides in lettuce crops. *Serve-Ag Research*. Devonport.
- Fryer JD, Kirkland K. 1970. Field experiments to investigate long-term effects of repeated applications of MCPA, tri-allate, simazine and linuron: Report after 6 years. *Weed Research*. **10**: 133-158.

- Gál I, Pusztai P, Radics L. 2003. Comparison of weed management methods in organic carrot. *International Journal of Horticultural Science*. **9**: 55-58.
- Gall J. 2007. Herbicidy a podmínky použití. *Agromanuál*. **3**: 14.
- Garcia-German S, Bardaji I, Garrido A. 2014. New pesticides regulation: potential economic impacts of the withdrawal of Pendimethalin in horticultural crops. *Spanish Journal of Agricultural Research*. **12**: 29-43.
- Gelmini GA, Novo M, doC SS, Mattos JBS. 2000. Poaceae control by fenoxaprop-p-ethyl + clethodim in lettuce crop. *Eccossistema*. **25**: 160-163.
- Ghosheh HZ. 2004. Single herbicide treatments for control of broadleaved weeds in onion (*Allium cepa*). *Crop Protection*. **23**: 539-542.
- Giancotti PRF, Machado MH, Yamauti MS. 2010. Período total de prevenção a interferência das plantas daninhas na cultura da alface cultivar Solaris. *Semina: Ciências Agrárias*. **31**: 1299-1304.
- Gimenez C, Otto RF, Castilla N. 2002. Productivity of leaf and root vegetable crops under direct cover. *Scientia Horticulturae*. **94**: 1-11.
- Glatkova G, Pacanoski Z. 2019. Evaluating the effects of application modes and soil types on the herbicide efficacy and crop yield of pendimethalin and clomazone on transplanted pepper (*Capsicum annuum* L.). *Agronomy Research*. **17**: 430-437.
- Golles M, Bravin E, Naef A. 2015. Evaluation of the low-residue apple crop protection. *Acta Horticulturae*. **1105**: 241-246.
- Green JM, Beestman GB. 2007. Recently patented and commercialized formulation and adjuvant technology. *Crop Protection*. **26**: 320-327.
- Grichar WJ, Besler BA, Brewer KD, Palrang DT. 2003. Flufenacet and metribuzin combinations for weed control and corn (*Zea mays*) tolerance. *Weed Technology*. **17**: 346-351.
- Gruszecki R, Borowy A, Salata A, Zawislak G. 2015. Effect of living mulch and linuron on weeds and yield of carrot under ridge cultivation. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*. **14**: 67-82.
- Gustafson DI. 1989. Groundwater ubiquity score: A simple method for assessing pesticide leachability. *Environmental Toxicology and Chemistry*. **8**: 339-357.

- Håkansson S. 2003. Weeds and Weed Management on Arable Land. CABI Publishing. Uppsala.
- Hakoomat A, Arooj M, Sarwar N, Areeb A, Shahzad AN, Hussain S. 2017. Application of pre and post emergence herbicide under improved field irrigation system proved a sustainable weed management strategy in cotton crop. *Planta Daninha* **35**.
- Henderson CWL, Cairns R. 2002. Post emergence spraying of clopyralid, picloram or pyridate in broccoli, Chinese cabbage, cabbage, or cauliflower kills weeds, with minimal crop damage. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. **42**: 1113-1117.
- Henderson CWL, Webber MJ. 1993. Phytotoxicity to transplanted lettuce (*Lactuca Sativa*) of 3 preemergence herbicides – metolachlor, pendimethalin and propachlor. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. **33**: 373-380.
- Herrmann CHM, Goll MA, Phillippo CJ, Zandstra BH. 2017. Postemergence weed control in onion with bentazon, flumioxazin and oxyfluorfen. *Weed Technology*. **31**: 279-290.
- Holý K, Hrbek V, Urbanová J, Hajšlová J, Kocourek V, Kocourek F. 2011. Výskyt reziduí pesticidů v zelenině pěstované v systému IP. *Zahradnictví*. **12**: 28-30.
- Hu JY, Cao D, Den ZB. 2011. Determination of clomazone residues in soybean and soil by high performance liquid chromatography with DAD detection. *B. Environmental Contamination and Toxicology*. **86**: 444-448.
- Huang JK, Wang SK, Xiao ZH. 2017. Rising herbicide use and its driving forces in China. *The European Journal of Development Research*. **29**: 614-627.
- Hussan HNM, He HR, Du PQ, Wu XH, Liu XG, Xu J, Dong FS, Zheng YQ. 2020. Determination of clomazone and acetachlor residues in soybean (*Glycine max (L.) Merr.*). *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. DOI: [10.1080/03067319.2019.1694668](https://doi.org/10.1080/03067319.2019.1694668).
- Hussain Z, Marwat KB, Shah SIA, Arifullah SA, Khan NM. 2008. Evaluation of different herbicides for weed control in onion. *Sarhad Journal of Agriculture*. **24**: 453-456.
- Imai M, Takagi N, Yoshizaki M, Hosoki E, Kobayashi Y. 2019. Determination of flufenacet and its metabolites in agricultural products by LC-MS/MS. *Food Hygiene and Safety Science*. **60**: 1-6.

- Imtiyaz M, Mgadla NP, Manase SK, Chendo K, Mothobi EO. 2000. Yield and economic return of vegetable crops under variable irrigation. *Irrigation Science*. **19**: 87-93.
- Janýška A. 1977. Účelné použití herbicidů v kulturách cibule. Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství. Praha.
- Janýška A. 1984. Použití herbicidů v kulturách zeleniny 53. Výzkumný a šlechtitelský ústav zelinářský. Olomouc.
- Janýška A. 1990. Použití herbicidů v kulturách zeleniny 62. Výzkumný a šlechtitelský ústav zelinářský. Olomouc.
- Jursík M. 2004. Regulace plevelů v cibuli. *Zahradnictví*. **4**: 24-26.
- Jursík M, Holec J, Hamouz P, Soukup J. 2004. Biologie a regulace významných plevelů cukrové řepy - Bažanka roční (*Mercurialis annua* L.). *Listy Cukrovarnické a Řepářské*. **120**: 210–213.
- Jursík M, Soukup J. 2004. Regulace plevelů v cibulové zelenině. *Agro*. **5**: 16-19.
- Jursík M, Soukup J, Klamová J. 2005. Regulace plevelů v kořenové zelenině z čeledi miříkovitých. *Agromanuál*. **0**: 4-6.
- Jursík M, Soukup J. 2006. Regulace plevelů v košťálové zelenině. *Agromanuál*. **1**: 10-12.
- Jursík M, Holec H, Hamouz H, Soukup J. 2011. PLEVELE Biologie a regulace. *Kurent*. České Budějovice.
- Jursík M, Kočárek M, Hamouzová K, Soukup J, Venclová V. 2013. Effect of precipitation on the dissipation, efficacy and selectivity of three chloroacetamide herbicides in sunflower. *Plant Soil Environment*. **59**: 175–182.
- Jursík M, Crha J. 2014a. Možnosti regulace plevelů v košťálové zelenině – 1. díl. *Úroda*. **62**: 82-85.
- Jursík M, Crha J. 2014b. Možnosti regulace plevelů v košťálové zelenině – dokončení. *Úroda*. **62**: 85-86.
- Jursík M, Crha J, Šuk J. 2015 Regulace plevelů v porostech salátů – 1. díl. *Zahradnictví*, **14**: 24-26.

- Jursík M, Crha J, Šuk J. 2016a. Regulace plevelů v kořenové zelenině. *Zahradnictví* **5**: 24-26.
- Jursík M, Šuk J, Crha J. 2017. Regulace plevelů v porostech cibulové zeleniny – I. díl. *Zahradnictví*. **6**: 34-35.
- Jursík M, Šuk J, Hamouzová K, Suchanová M, Hamouz P, Kocourek K, Kysilková K. 2016b. Optimalizace regulace plevelů v systému integrované produkce košťálové, cibulové, kořenové zeleniny a salátu. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- Jursík M, Kočárek M, Hamouzová K, Soukup J, Venclová V. 2018. Effect of precipitation on the dissipation, efficacy and selectivity of three chloroacetamide herbicides in sunflower. *Plant Soil and Environment*. **59**: 175-182.
- Kavaliauskaite D, Starkute R, Bundiniene O, Jankauskiene J. 2009. Chemical weed control in carrot crop. *Acta Horticulturae*. **830**: 385-389.
- Keeling JW, Bender DA, Abernathy JR. 1990. Yellow nutsedge (*Cyperus esculentus*) management in transplanted onions (*Allium cepa*). *Weed Technology*. **4**: 68-70.
- Khan A, Ilyas M, Hussain T. 2005. Response of wheat to herbicides application and hand weeding under irrigated and non-irrigated conditions. *Pakistan Journal of Weed Science Research*. **11**: 1-9.
- Khan SU, Belanger A, Hogue EJ, Hamilton HA, Mathur SP. 1976. Residues of paraquat and linuron in an organic soil and their uptake by onions, lettuce and carrots. *Canadian Journal of Soil Science*. **56**: 407-412.
- Knott CM. 2002. Weed Control in other Arable and Field Vegetable Crops. In: Naylor REL *Weed Management Handbook*. British Crop Protection Council, Blackwell Science, Oxford.
- Kočárek M, Kodešová R, Sharipov U, Jursík M. 2018. Effect of adjuvant on pendimethalin and dimethenamid-P behavior in soil. *Journal of Hazardous Materials*. **354**: 266-274.
- Kocourek V. 2013. Úvod do potravinářské legislativy. Část 4: rezidua pesticidů, léčiv a biologicky aktivních látek ze zemědělství. VŠCHT. Praha.
- Kocourek F, Holý K, Stará J. 2013. Optimalizace používání pesticidů proti škůdcům v systému integrované produkce brukvovité zeleniny. Výzkumný ústav rostlinné výroby.

Kocourek F, Holý K, Rod J, Stará J, Kovaříková K, Douda O, Koudela M, Kováčová J, Kocourek V. 2014 Optimalizace používání pesticidů proti škůdcům a chorobám v systému integrované produkce cibulové a kořenové zeleniny a salátu. Výzkumný ústav rostlinné výroby.

Kocourek F, Stara J, Holy K, Horska T, Kocourek V, Kovacova J, Kohoutkova J, Suchanova M, Hajslova J. 2017. Evaluation of pesticide residue dynamics in Chinese cabbage, head cabbage and cauliflower. Food additives and contaminants part a-chemistry analysis control exposure & risk assessment. **36**: 980-989.

Koleva-Valkova L, Vasilev A, Dimitrova M, Stoychev D. 2016. Determination of metazachlor residues in winter oilseed rape (*Brassica napus* var. Xenon) by HPLC. Emirates Journal of Food and Agriculture. **28**: 813-817.

Kosterna E, Zaniwicz-Bajkowska A, Rosa R, Franczuk J. 2011. The effect of agrohydrogel and irrigation on kohlrabi cv 'Oasis F1' yields. Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus. **10**: 53-61.

Kováčová J, Kocourek V, Kohoutková J, Lánský M, Hajšlová J. 2014. Production of apple-based baby food: changes in pesticide residues. Food Additives and Contaminants part A. **31**: 1089-1099.

Kucharski M. 2003. Influence of herbicide and adjuvant application on residue in soil and plants of sugar beet. Journal of Plant Protection Research. **43**: 225-232.

Kucharski M. 2007. Impact of adjuvants on: phenmedipham, desmedipham and ethofmesate residues in soil and plant. Pestycydy. **3-4**: 53-59.

Lanini WT, Le Strange M. 1991. Low-input management of weeds in vegetable fields. Calif Agric **45**: 11-13.

Lati RN, Mou BQ, Rachuy JS, Smith RF, Dara SK, Daugovish O, Fennimore SA. 2015. Weed management in transplanted lettuce with pendimethalin and S-metolachlor. Weed technology. **29**: 827-834.

Lazic S. 1995. Pendimethalin herbicide residues in soil. Pesticidi. **10**: 231-236.

Lazic S, Jevtic S, Lazic B. 1997. Pendimethalin Residues in Onion. Acta Horticulturae. **462**: 571-576.

- Lee IY, Park JE, Park TS, Yu GH, Yu BS. 1998. Studies on occurrence and control of weed in edible wild greens field. *Korean Journal of Weed Science*. **18**: 63-68.
- Lee JW, Lee AH, Seong KC, Um YC, Park DK. 2009. Effects of row cover materials on the micro environment and the growth of leafy vegetables. *Journal of Bio-Environmental Control*. **18**: 326-331.
- Lehotay SJ, Anastassiades M, Majors R. 2010. The QuEChERS revolution. *LC GC Europe*.
- Li WW, Morgan MK, Graham SE, Starr JM. 2016. Talanta measurement of pyrethroids and their environmental degradation products in fresh fruits and vegetables using a modification of the quick easy cheap effective rugged safe (QuEChERS) method. *Talanta*. **151**: 42-50.
- Locke MA, Reddy KN, Gaston LA, Zablotowicz RM. 2002. Adjuvant modification of herbicide interactions in aqueous soil suspension. *Soil Science*. **167**: 444-452.
- Loken JR, Hatterman-Valenti HM. 2010. Multiple applications of reduced-rate herbicides for weed control in onion. *Weed Technology*. **24**: 153-159.
- Loken JR, Hatterman-Valenti HM. 2013. Early-Season Weed Control Using Herbicides with Adjuvants in Direct-Seeded Onion. *Weed technology*. **27**: 369-372.
- Løkke H. 1974. Residues in carrots treated with linuron. *Pesticide Science*. **5**: 749-757.
- Lozowicka B, Jankowska M, Kaczynski P. 2012. Pesticide residues in Brassica vegetables and exposure assessment of consumers. *Food control*. **2**: 561-575.
- Lüning HU, Klaaßen H, Menck BH. 1983. Control of weeds in transplanted cabbages with metazachlor. *Acta Horticulturae*. **136**: 61-64.
- Malidza G, Glušac D, Takac A. 1997. Phytopharmacological value of herbicides in carrot production. *Acta Horticulturae*. **462**: 549-552.
- Malý I, Petříková K. 1998. *Základy pěstování kořenové zeleniny*. Institut výchovy a vzdělávání MZe ČR. Praha.
- Malý I, Petříková K. 2000. *Základy pěstování cibulové zeleniny*. Institut výchovy a vzdělávání MZe ČR. Praha.

- Maštovská K, Lehotay SJ, Hajšlová J. 2001. Optimization and evaluation of low-pressure gas chromatography-mass spectrometry for the fast analysis of multiple pesticide residues in food commodity. *Journal of Chromatography*. **926**: 291-308.
- Miller AB, Hopen HJ. 1991. Critical weed-control period in seeded cabbage (*Brassica oleracea* var *capitata*). *Weed Technology*. **5**: 852-857.
- Morariu A, Rusu T, Morariu AD. 2017. Weed control strategies in carrot crops. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*. **17**: 693-700.
- Muniyappa TV, Dev NP, Gowda A. 1995. Economics of integrated weed control in hybrid tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Indian Journal of Agronomy*. **40**: 339-341.
- Murillo Pulgarín JA, García Bermejo LF. 2003. Determination of napropamide in technical formulations, soil and vegetable samples by sensitised fluorescence: validation of the method. *Analytica Chimica Acta*. **491**: 37-45.
- Nalini RRP, Janaki P, Balusamy M, Chinnusamy C. 2015. Persistence and residues of clomazone in soil and soybean by HPLC-DAD. *Asian Journal of Chemistry*. **28**: 51-54.
- Neururer H, Womastek R. 1991. Über das Auftreten von Pflanzenschutzmitteln in der Luft. *Bodenkult*. **42**: 57-70.
- Neuweiler R, Krauss J. 2008. Effect of different planting techniques on the efficacy and phytotoxicity of Pendimethalin in lettuce (*Lactuca sativa* L.) *Journal of plant diseases and protection*. **21**: 575-579.
- Norsworthy JK, Smith JP, Meister C. 2007. Tolerance of direct-seeded green onions to herbicides applied before or after crop emergence. *Weed technology*. **21**: 119-123.
- Odero DC, Shanner DL. 2014. Dissipation of Pendimethalin in Organic Soils in Florida. *Weed technology*. **28**: 82-88.
- Odero DC, Wright AL. 2013. Phosphorus application influences the critical period of weed control in lettuce. *Weed Science*. **61**: 410-414.
- Ogbuchiekwe EK, McGiffen ME, Nunez J, Fennimore SA. 2004. Tolerance of carrot to low rate preemergent and postemergent herbicides. *HortScience*. **39**: 291-296.

- Özer M, Özer H, Balkaya A, Uzun S. 2015. The effect of different seed sowing time and mulch application on kohlrabi (*Brassica oleraceae* var. *gongyloides*) growing in greenhouses. *Akademik Ziraat Dergisi*. **4**: 49-58.
- Petříková K, Malý I, Pokluda R, Pacík V. 2004. Integrované pěstování listové zeleniny. Ústav zemědělských a potravinářských informací. Praha.
- Petříková K, Jánský J, Malý I, Peza Z, Poláčková J, Rod J. 2006. Zelenina: pěstování ekonomika prodej. Profi Press s. r. o. Praha.
- Petříková K, Hlušek J, Koudela M, Malý I, Pokluda R, Lošák T, Ryant P, Škarpa P, Rod J, Poláčková J. 2012. Zelenina. Profi Press s. r. o. Praha.
- Poonia TC, Mathukia RK, Karwasara PK. 2017. Residues of pendimethalin, oxyfluorfen, quizalofop-ethyl and imazethapyr in groundnut and their persistence in soil. *Journal of Crop and Weed*. **13**: 194-202.
- Pornprom T, Sukcharoenvipharat W, Sansiriphun D. 2010. Weed control with pre-emergence herbicides in vegetable soybean (*Glycine max* L. Merrill). *Crop Protection*. **29**: 684-690.
- Pospíšilová J, Pospíšil R. 1975. Rezidua pesticidů v zelenině. Výzkumný ústav zelinářský v Olomouci. Olomouc.
- Qasem JR. 2005a. Chemical control of weeds in onion (*Allium cepa* L.). *Journal of horticultural science & biotechnology*. **80**: 721-726.
- Qasem JR. 2005b. Chemical weed control in seedbed sown onion (*Allium cepa* L.). *Crop Protection*. **25**: 618-622.
- Qasem JR. 2007. Weed control in cauliflower (*Brassica oleracea* var. *Botrytis* L.) with herbicides. *Crop protection*. **26**: 1013-1020.
- Qasem JR. 2009. Weed competition in cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *Botrytis*) in the Jordan Valley. *Scientia Horticulturae*. **121**: 255-259.
- Qi Y, Liu D, Liu Ch, Yiran L, Zhan J, Zhou Z, Wang Z. 2017. Enantioselective behaviour of the herbicide fluazifop-butyl in vegetable and soil. *Food Chemistry*. **221**: 1120-1127.

- Reddy KN. 1993. Effect of acrylic polymer adjuvant on leaching of bromacil, diuron, norfurazon and simazine in soil columns. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. **50**: 449-457.
- Renauld FG, Brown CD, Fryer cj, Walker A. 2004. A lysimeter experiment to investigate temporal changes in the availability of pesticide residues for leaching. *Environmental Pollution*. **131**: 81-91.
- Reuber MD. 1980. Carcinogenicity of pronamide. *Environmental research*. **23**: 1-12.
- Rice PJ, Anderson TA, Coats JR. 2009. Degradation and persistence of metolachlor in soil: Effects of concentration, soil moisture, soil depth, and sterilization. *Environmental Toxicology and Chemistry*. **21**: 2640-2648.
- Roberts HA. 1976. Weed competition in vegetable crops. *Annals of Applied Biology*. **83**: 321-324.
- Rouchaud J, Gustin F, Callens D, Bulcke R, Benoit F, Ceustermans N, Gillet J, Marchand S. 1994. Herbicides metazachlor and propachlor soil biodegradation in cauliflower crops: Effects of the recent organic fertilizers. *Toxicological and Environmental Chemistry*. **45**: 139-148.
- Rouchaud J, Moons Ch, Benoit F, Ceustermans N, Maraite HMM. 1987. Concentrations of the herbicides propyzamide, chlorpropham, and of their metabolites in soil and lettuce under field conditions. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. **38**:240-246.
- Saha D, Marble Ch, Pearson BJ, Pérez HE, MacDonald GE, Odero DC. 2019. Mulch Type and Depth, Herbicide Formulation, and Postapplication Irrigation Volume Influence on Control of Common Landscape Weed Species. *HortTechnology*. **29**: 65-77.
- Sahoo SK, Mandal K, Singh G, Kumar R, Chahil GS, Battu RS, Singh B. 2013. Residual behavior of quizalofop ethyl on onion (*Allium cepa* L.) Environmental monitoring and assessment. **185**: 1711-1718.
- Santos BM, Dusky JA, Stall WM, Gilreath JP. 2004a. Effect of phosphorus fertilization on common lambsquarters (*Chenopodium album*) duration of interference in lettuce (*Lactuca sativa*). *Weed Technology*. **18**: 152-156.

- Santos BM, Dusky JA, Stall WM, Gilreath JP. 2004b. Influence of common lambsquarters (*Chenopodium album*) densities and phosphorus fertilization on lettuce. *Crop Protection*. **23**: 173-176.
- Sarmah K, Kookana RS, Alston AM. 2000. Leaching and degradation of triasulfuron, metsulfuron-methyl and chlorsulfuron in alkaline soil profiles under field condition. *Australian Journal of Soil Research*. **38**: 617-631.
- Sasnauskas A, Kavaliauskaite D, Kerkleliene R, Bobinas C. 2012. Weed control by herbicides and their combination in carrot crop. *Acta Horticulturae*. **936**: 295-298.
- Scott JE, Weston LA. 1992. Cole Crop (*Brassica oleracea*) Tolerance to Clomazone. *Weed science*. **40**: 7-11.
- Scott JE, Weston LA, Jones RT. 1995. Clomazone for weed control in transplanted cole crops (*Brassica oleracea*), *Weed science*. **43**: 121-127.
- Selim HM, Naquin BJ. 2011. Retention of metribuzin by sugarcane residue: Adsorption-desorption and miscible displacement experiments. *Soil Science*. **176**: 520-526.
- Shadbolt CA, Holm LG. 1956. Some Quantitative Aspects of Weed Competition in Vegetable Crops. *Weeds*. **4**: 111-123.
- Sharma R, Mehta H. 1989. Studies on Pendimethalin and Fluchloralin Residues in Soil and Onion. *Indian Journal of Agronomy*. **34**: 245-247.
- Shem-Tov S, Fennimore SA, Lanini WT. 2006. Weed management in lettuce (*Lactuca sativa*) with preplant irrigation. *Weed technology*. **20**: 1058-1065.
- Sikkema PH, Soltani N, McNaughton K, Robinson DE. 2006. Broccoli, cabbage and cauliflower tolerance to sulfonylurea herbicides. *Crop Protection* **25**: 225-229.
- Sikkema PH, Soltani N, Robinson DE. 2007. Responses of cole crops to pre-transplant herbicides. *Crop Protection* **26**: 1173-1177.
- Singh B, Bhullar MS, Walia US, Randhawa SK, Phutela RP. 2010. Weed control in carrot (*Daucus carota*): Bio-efficacy and residues of pre-emergence herbicides. *Indian Journal of Ecology*. **37**: 145-148.
- Singh PP, Tripathi SS. 1988. Effect of herbicides and time of weeding on weed control and fruit yield of tomato. *Indian Journal of Weed Science*. **20**: 39-43.

- Słowik-Borowiec M, Szpyrka E, Walorczyk S. 2015. Gas chromatographic determination of pesticide residues in white mustard. *Food Chemistry*. **173**: 997-1005.
- Smith RF, Fennimore SA, LeStrange M. 2007. UC IPM Pest Management Guidelines: Lettuce.
- Smith HC, Ferrell JA, Webster TM, Fernandez JV, Dittmar PJ, Munoz PR, MacDonald GE. 2016. Impact of Irrigation Volume on PRE Herbicide Activity. *Weed Technology*. **30**: 793-800.
- Soceanu A, Dobrina, S, Coatu V, Chirila E. 2009. Pesticide residues determination in vegetables from Romania by GC-ECD. NATO Science for Peace and Security Series C - Environment Security. 423-430.
- Soukup J, Jursík M, Hamouz P, Holec J, Krupka J. 2004. Influence of soil ph, rainfall, dosage, and application timing of herbicide merlin 750 wg (isoxaflutole) on phytotoxicity level in maize (zea mays l.). *Plant Soil and Environment*. **52**: 88-94.
- Sondhia S. 2007. Fluazifop-p-butyl residues in soybean crop and soil. *Pesticide Research Journal*. **19**: 248-250.
- Sondhia S. 2009. Persistence of metsulfuron-methyl in Paddy field and detection of its residues in crop produce. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. **83**: 799-802.
- Sondhia S. 2013. Harvest time residues of pendimethalin in tomato, cauliflower, and radish under field conditions. *Toxicological and environmental chemistry*. **95**: 254-259.
- Sraw PK, Kur B, Kuar A, Singh K. 2016. Efficacy of different herbicides for controlling weeds in onion. *Journal of Crop and Weed*. **12**: 125-128.
- Srivastava AK, Trivedi P, Srivastava MK, Lohani M, Srivastava LP. 2011. Monitoring of pesticide residues in market basket samples of vegetable from Lucknow City, India: QuEChERS method. *Environmental Monitoring and Assessment*. **176**: 465-472.
- Stachniuk A, Szmagara A, Czeczko R, Fornal E. 2017. LC-MS/MS determination of pesticide residues in fruits and vegetables. *Journal of Environmental Science and Health part b-Pesticides Food Contaminants and Agricultural Wastes*. **52**: 446-457.
- Stajner D, Popovic M, Stajner M. 2003. Herbicide induced oxidative stress in lettuce, beans, pea seeds and leaves. *Biologia plantarum*. **47**: 575-579.

- Stall WM, Dusky JA. 2000. Weed control in carrots and parsley. Natural Resources. California.
- Stoleru V, Munteanu N, Hura C. 2015. Organophosphorus pesticide residues in soil and vegetable, through different growing systems. Environmental Engineering and Management Journal. **14**: 1465-1473.
- Šuk J, Jursík M. 2016. Rezidua herbicide v zelenině. Agromanuál. **11**: 36-38.
- Tagle Martin GS, Laura Salum M, Bujan Elba I, Argullo Gustavo A. 2005. Time evolution and competing pathways in photodegradation of trifluralin and three of its major degradation products. Photochemical & Photobiological Sciences. **4**: 869-875.
- Tei F, Cirujeda A, Dobrzanski AJ, Froud-williams RJ, Mennan H, Neuweiler R, Pannacci E, Quasem J, Rocha F, Simončič A, Verschwele A, van der Weide R, Zaragoza C. 2007. Weeds and weed management in lettuce. Conference paper 14h EWRS Symposium. Hamar. Norway. 226.
- Tickes BR, Kerns DL. 1996. Lettuce injury from preplant and preemergence herbicides. IPM Series 9. Publ. No. 196007. University of Arizona. Tucson.
- Tomlin CDS. 2000. The pesticide manual 12th edition. British Crop Protection Council, United Kingdom.
- Tosic I, Miroslavljevic M, Przulj N, Trkulja V, Pesevic D, Barbir J. 2019. Effect of geotextile and agrotexile covering on productivity and nutritional values in lettuce. Chilean Journal of Agricultural Research. **79**: 523-530.
- Tóth Š. 2001. Osud pesticidov v prírodnom prostredí. Jurov. Michalovce.
- Tsiropoulos NG, Miliadi GES. 1998. Field Persistence Study of Pendimethalin in Soils after Herbicide Post Emergence Application in Onion Cultivation. Journal of Agriculture and Food Chemistry. **46**: 291-295.
- Umeda K. 2000. Weed controle in cole crops. The University of Arizona.
- Uygur S, Gürbüz R, Uygur N. 2010. Weeds of onion fields and effects of some herbicides on weeds in Cukurova region, Turkey. African Journal of Biotechnology. **9**: 7037-7042.
- Walker A. 1987. Evaluation of a simulation model for prediction of herbicide movement and persistence in soil. Weed Research. **27**: 143-152.

- Walker A. 1989. Factors influencing the variability in pesticide persistence in soil. *Reviews of weed science*. **3**: 1-17.
- Wang S, Arnold WA. 2003. Abiotic reduction of dinitroaniline herbicides. *Water Research*. **37**: 4191-4201.
- Wang S, Wang Z, Zhang Y, Wang J, Rong G. 2013. Pesticide residues in market foods in Shaanxi Province of China in 2010. *Food Chemistry*. **138**: 2016-2025.
- Whitewell JD. 1984. Herbicides for brassica crops. *Annual Review for 1983*. Stockbridge House Experimental Horticulture Station, North Yorks UK. **31**: 28-32.
- Williams MM, Boydston RA. 2005. Alternative to hand-weeding volunteer potato (*Solanum tuberosum*) in carrot (*Daucus carota*). *Weed technology*. **19**: 1050-1055.
- Williams MM, Ramson CV, Thompson WM. 2007. Volunteer potato density influences critical time of weed removal in bulb onion. *Weed technology*. **21**: 136-140.
- Wilson RG, Sbatella GM. 2014. Integrating irrigation, tillage, and herbicides for weed control in dry bean. *Weed Technology*. **28**: 479-485.
- Winter CK. 1992. Pesticide tolerances and their relevance as safety standards. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. **15**: 137-150.
- Wischmeier WH, Mannering JV. 1969. Relation of soil proper-ties to its erodibility. *Soil Science Society of America Journal*. **33**: 131-137.
- Wittroc A, Hentsch T, Bonin J. 2008. Kerb (R) Flo a new, user-friendly propyzamide formulation active againts hard-to-control grasses and broad-leaved weeds in many crops. *Journal of plant diseases and protection*. **21**: 665-669.
- Yen J, Tsai P, Chen W, Wang Y. 2008. Fate of anilide and aniline herbicides in plant-materials-amended soils. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*. **43**: 382-389.
- Zanatta JF, Procopio SO, Manica R, Pauleto EA, Cargnelutti FA, Vargas L, Sganzerla, D.C., Rosenthal MD, Pinto JJO. 2008. Soil water contents and fomesafen efficacy in controlling *Amaranthus Hybridus*. *Planta Daninha*. **26**: 143-155.
- Zandstra BH. 2006. Weed control guide for vegetable crops. Department of Holticulture. Michigan State University.

Zhang W, Webster EP, Selim HM. 2001. Effect of soil moisture on efficacy of imazethapyr in greenhouse. *Weed Technology*. **15**: 355-359.

Zhao P, Wang L, Chen L, Pan C. 2010. Residue Dynamics of Clopyralid and Picloram in Rape Plant Rapeseed and Field Soil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. **86**: 78-82.

Zinikeviciute D, Baleliunas P. 1998. Efficiency of Butisan S for white head cabbage and cauliflower. *Zemdirbyste, Mokslo Darbai*. **62**: 52-62.