

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroekologie a rostlinné produkce (FAPPZ)



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Management herbicidní rezistence u významných
trávovitých plevelů**

Bakalářská práce

Autor práce: Kateřina Doušová

Studijní program: Ochrana krajiny a využívání přírodních zdrojů

Vedoucí práce: Ing. Pavlína Košnarová, Ph.D.

© 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Management herbicidní rezistence u významných trávovitých plevelů" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 28. 4. 2023

Poděkování

Rád(a) bych touto cestou poděkovala Ing. Pavlíně Košnarové, Ph.D. za podporu, trpělivost, cenné rady a konstruktivní zpětnou vazbu při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat rodině a přátelům za podporu.

Management herbicidní rezistence u významných trávovitých plevelů

Souhrn

Toto téma bakalářské práce jsem si vybrala, proto že herbicidní rezistence u jednoděložných plevelů je rostoucí problém v moderním zemědělství. Pro účinné řešení této výzvy je nutné zavést integrovaný přístup k managementu plevelů, který zahrnuje kombinaci fyzikálních, mechanických a chemických metod.

V rámci chemických metod je důležité provádět rotaci herbicidů, která snižuje riziko vzniku herbicidní rezistence. Další důležitou strategií je použití herbicidů s různými mechanismy účinku a s různou chemickou strukturou. Použití přípravků s kombinovaným účinkem, které obsahují více účinných látek, zvyšující účinnost herbicidu, je také účinnou strategií.

Při aplikaci herbicidů je důležité dodržovat správné dávkování a aplikovat je v optimální fázi růstu plevelů. Množství a doba aplikace by měly být stanoveny na základě typu plevelů a specifických podmínek polí.

Prevence je také důležitou součástí managementu herbicidní rezistence. Prevence může zahrnovat monitorování herbicidní rezistence, použití nechemických metod kontroly plevelů, jako je mechanická nebo tepelná regulace plevelů, a zlepšení zemědělských postupů a dodržování správné zemědělské praxe.

Celkově lze říci, že účinný management herbicidní rezistence u jednoděložných plevelů zahrnuje kombinaci různých metod, včetně rotace herbicidů, použití kombinovaných přípravků a preventivních opatření. Tento integrovaný přístup k řízení rezistence pomůže snížit riziko vzniku a šíření herbicidní rezistence a zachovat účinnost herbicidů na dlouhou dobu.

Klíčová slova: jednoděložné plevele, herbicidy, rezistence, monitoring, metody testování

Herbicide resistance management in important grass weeds

Summary

I chose this topic for my bachelor thesis because herbicide resistance in monocotyledonous weeds is a growing problem in modern agriculture. To effectively address this challenge, an integrated approach to weed management that includes a combination of physical, mechanical and chemical methods is necessary.

Within chemical methods, it is important to implement herbicide rotation to reduce the risk of herbicide resistance. Another important strategy is the use of herbicides with different modes of action and chemical structures. The use of products with combined mode of action, which contain multiple active ingredients that improve herbicide efficacy, is also an effective strategy.

When applying herbicides, it is important to observe the correct dosage and to apply them at the optimum stage of weed growth. Application rates and timing should be determined based on the type of weeds and specific field conditions.

Prevention is also an important part of herbicide resistance management. Prevention may include monitoring for herbicide resistance, use of non-herbicide weed control methods such as mechanical or thermal weed control, and improved agricultural and follow good agricultural practices.

Overall, effective management of herbicide resistance in monocotyledonous weeds involves a combination of different methods, including herbicide rotation, the use of combination products and preventive measures. This integrated approach to resistance management will help to reduce the risk of herbicide resistance developing and spreading and maintain the effectiveness of herbicides for a long time.

Keywords: monocot weeds, herbicides, resistance, monitoring, testing methods

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Cíl práce.....	9
3. Literární rešerše.....	10
3.1. Obecná charakteristika plevelů.....	10
3.2. Hospodářský význam a škodlivost plevelů.....	11
3.3. Nejvýznamnější jednoděložné plevely s herbicidní rezistencí.....	12
3.3.1. Chundelka metlice (<i>Apera spica-venti</i>).....	12
3.3.2. Psárka polní (<i>Alopecurus myosuroides</i>).....	15
3.3.3. Sveřep jalový (<i>Bromus sterilis</i>).....	18
3.4. Definice herbicidů.....	20
3.5. Klasifikace herbicidů.....	21
3.5.1. Podle selektivity účinku a působení.....	21
3.5.2. Podle aplikace.....	23
3.5.3. Podle mechanismu účinku.....	25
3.6. Příjem a transport herbicidu v rostlině.....	28
3.7. Příčiny vzniku herbicidní rezistence.....	29
3.8. Vývoj herbicidní rezistence.....	30
3.9. Mechanismy herbicidní rezistence.....	31
3.9.1. V místě účinku.....	31
3.9.2. Mimo místo účinku.....	32
3.9.3. Křížová a vícenásobná rezistence.....	32
3.10. Rezistence k významným skupinám herbicidů.....	33
3.10.1. Rezistence k inhibitorům fotosystému II.....	34
3.10.2. Rezistence k inhibitorům acetylkoenzym – A karboxylázy.....	35
3.10.3. Rezistence k inhibitorům stavby mikrotubulů.....	35
3.10.4. Rezistence k inhibitorům EPSPS (5-enolpyruvylšikimát-3-fosfát syntázy).....	36
3.10.5. Rezistence plevelů k inhibitorům ALS (acetolaktát-syntázy).....	37
3.11. Monitoring a testování herbicidní rezistence.....	37
3.11.1. Sběr vzorků plevelů.....	38
3.11.2. Růstové testy.....	38
3.11.3. Genetické testy.....	39
3.11.4. Sledování vývoje populace plevelů.....	41
3.11.5. Sledování herbicidního použití.....	41
3.11.6. Testování klíčivosti semen.....	42
3.11.7. Testování enzymové aktivity.....	43

3.11.8. Testování v terénu.....	43
3.12. Ekonomické dopady rezistence.....	44
3.13. Prevence vzniku rezistence a antirezistentní strategie.....	47
3.14. Management herbicidní rezistence u významných jednoděložných plevelů.....	48
3.14.1. Mechanické metody.....	48
3.14.2. Chemické metody.....	49
4. Závěr.....	52
5. Zdroje.....	53

1. Úvod

Herbicidní rezistence se stává stále častějším problémem v zemědělství, který výrazně snižuje účinnost používaných herbicidů a tím i celkovou úroveň produktivity a ekonomického výnosu v zemědělské výrobě. Jedním z hlavních důvodů pro vznik herbicidní rezistence u plevelů je nadměrné používání jediného druhu herbicidu na stejném místě a po dlouhou dobu. Tím dochází k výběru a selekci plevelů s vyšší tolerancí vůči herbicidu, což vede k vzniku herbicidně rezistentních populací.

Mezi nejvýznamnější trávovité plevely, které vykazují herbicidní rezistenci, patří chundelka metlice, sverep jalový, psárka polní a další. Tyto druhy plevelů jsou nejen velmi rozšířené, ale také velmi agresivní a odolné vůči mnoha druhům herbicidů.

Abychom zabránili vzniku a šíření herbicidní rezistence, je nutné využít různé strategie a technologie. Mezi tyto strategie patří například rotace herbicidů, což znamená využívat různých druhů herbicidů na různých místech a v různých letech. Důležité je také používat herbicidy v správné koncentraci a správným způsobem aplikovat, aby byla minimalizována pravděpodobnost vývoje herbicidní rezistence.

Další strategií může být využití kombinace herbicidů s jinými způsoby kontrolního opatření, jako je například mechanické odstraňování plevelů nebo zvýšení konkurence o světlo a vodu pomocí porostových kultur. Je také důležité přijmout preventivní opatření, jako je včasná identifikace herbicidně rezistentních populací a monitorování vývoje rezistence na různých lokalitách.

V řešení herbicidní rezistence u významných trávovitých plevelů hrají roli také nové technologie, jako jsou například geneticky modifikované plodiny, které jsou odolné vůči herbicidům nebo herbicidy s novým mechanismem účinku. Tyto nové technologie jsou však často stále v experimentální fázi vývoje a mohou být doprovázeny řadou etických a environmentálních otázek.

Je tedy důležité vyváženě přistupovat k řešení herbicidní rezistence u významných trávovitých plevelů a kombinovat různé strategie a technologie, aby se minimalizovaly negativní dopady na životní prostředí a zároveň byla zachována vysoká úroveň produktivity v zemědělské výrobě.

2. Cíl práce

Cílem práce je rozšířit poznatky o vzniku a vývoji herbicidní rezistence u významných jednoděložných plevelů, o prevenci vzniku rezistence a možnostech její regulace. Pozornost bude dále zaměřena na management herbicidní rezistence a antirezistentní strategie u vybraných plevelných druhů.

3. Literární rešerše

3.1. Obecná charakteristika plevelů

Plevele jsou všechny rostliny, které rostou většinou nechtěně mezi kulturními plodinami a mohou snižovat jejich výnos a kvalitu. Tyto rostliny jsou často konkurenti pro kulturní plodiny o zdroje, jako jsou voda, živiny a sluneční světlo, což může vést k nižšímu výnosu a zhoršení kvality sklizených plodin. Kvůli tomu jsou plevle považovány za problém a často se snažíme je odstraňovat nebo omezovat jejich růst a šíření (Kohout a kol., 1996).

Mezi plevle mohou patřit nejen planě rostoucí druhy, ale také kulturní rostliny, které se dostaly na nevhodné místo. Dále existují také tzv. zaplevelující plodiny, které jsou schopné růst v porostu jiných plodin a způsobují jim škody. Tyto plodiny často vznikají ze sklizňových ztrát, kdy semena či plody kultivovaných rostlin zůstanou na poli a následně začnou růst (Jursík a kol., 2011).

Plevele mohou být klasifikovány podle různých kritérií, ale nejčastěji se používá klasifikace podle biologických vlastností, jako je délka životnosti rostlin, způsob rozmnožování, rozšiřování semen, doba vzcházení a hloubka kořenů. Tato klasifikace umožňuje snadnou volbu regulačních opatření. V minulosti byly plevelné rostliny tříděny podle různých lokalit (luční, polní, zahradní, vodní, lesní), výskytu v kulturních plodinách (obilnin, píce, okopanin atd.) a jejich škodlivosti (velmi nebezpečné, příležitostné, méně významné) (Mikulka, Kneifelová, 2005).

Existuje také botanická klasifikace plevelů, která rostliny řadí do skupin podle jejich botanického původu a vlastností. Tato klasifikace může poskytnout užitečné informace o biologii plevelů a jeho potenciálních slabých bodech pro regulaci. Avšak v jedné skupině se mohou nacházet jak druhy s vysokým stupněm škodlivosti, tak i druhy s nižším stupněm, což znemožňuje jednoduchou volbu regulace. Proto se v současnosti častěji používá klasifikace podle biologických vlastností (Hron, Vodák, 1959).

Výstižnou definici plevelů uvádí Burgermeister (1838): „Obecně se rozumí plevle všechny rostliny, které proti úmyslu zemědělců samy rostou na kultivované půdě“.

Plevellem se tedy může stát kterýkoliv rostlinný druh, který se z různých příčin na stanovišti přemnoží a je třeba jeho výskyt regulovat (Mikulka a kol., 1999). Při regulaci plevelných druhů nejde o to, aby byly za každou cenu zničeny, ale spíše o to, aby byly omezeny na míru, která nepředstavuje větší škodu (Kohout, 1993).

3.2. Hospodářský význam a škodlivost plevelů

Přítomnost plevelu na zemědělské půdě může snížit negativní dopad opakovaného pěstování jednoho druhu plodin na půdní ekosystém. Některé druhy plevelu, které mají hluboko sahající kořeny (jako například svlačec rolní), mohou přinášet do kořenové zóny plodin živiny, které by jinak nebyly využity při tvorbě výnosů. (Dvořák, Smutný 2003).

Plevelné rostliny mají i ekologický význam. Zabraňují vodní i větrné erozi, omezují vysychání a narušení půdní struktury, jsou součástí koloběhu živin v půdě a nedílnou součástí ekosystému, kdy spolu s ostatními autotrofními organismy zvyšují biodiverzitu krajiny. Svůj význam mají i plevely, které jsou využívány jako léčivé rostliny. Mnoho plevelných rostlin je vyhledáváno včelami anebo slouží jako významný zdroj potravy pro hmyz, ptáky a savce (Mikulka a kol., 2005).

V únosné míře by tak zaplevelení mohlo mít pozitivní význam pro udržení biologické rovnováhy porostu plodin.

Bohužel však nad užitečností plevelů převládá jejich škodlivost. Kromě parazitických druhů, plevelné rostliny nepoškozují plodiny přímo. Přesto patří plevely mezi nejvýznamnější škodlivé činitele v České republice. Celkem je na jejich regulaci vynakládáno více než 72 % všech nákladů v ochraně rostlin (Mikulka, Chodová, 2015).

Škodlivý vliv plevelů na kulturní plodiny je velmi variabilní a může se výrazně lišit. Od pradávna až po současnost způsobují přemnožené plevely každoročně velké ztráty na množství i kvalitě produkce kulturních rostlin, což se projevuje rovněž i celkovým snížením produktivity práce v zemědělství (Kohout 1997).

Plevely mohou způsobovat několik problémů, včetně odčerpávání živin a vody z půdy, konkurence s pěstovanými plodinami o prostor, znehodnocování rostlinné produkce, komplikování sklizně a zvyšování ztráty na produkci. Některé druhy plevelu mohou být také zdrojem alergenů (zejména pylu), jedovaté pro lidi a domácí zvířata, podporovat šíření chorob a škůdců pěstovaných rostlin. (Mikulka a kol., 2005).

Nepříznivý vliv plevelů na rostlinnou produkci se projevuje jednak přímým, jednak nepřímým působením (Kohout a kol. 1996).

Přímý škodlivý vliv plevelů na plodiny je důsledkem jejich konkurence. Nejnebezpečnější plevelné druhy jsou nejlépe vybaveny konkurenčními schopnostmi. Mají mohutný kořenový systém, pomocí kterého získávají z půdy lépe než plodiny vodu a živiny. Proto snadněji vzdorují suchu a vytvoří značně reprodukce schopné jedince i v podmínkách snížené úrovně vody a pohotových živin. Některé druhy rostlin mají schopnost přizpůsobit se

nepříznivým podmínkám, jako jsou zamokření, mrazy nebo jiné nepříznivé klimatické faktory. (Dvořák a Smutný 2003).

Na druhou stranu nepřímá škodlivost plevelů představuje četné, značně rozmanité formy, rovněž nepříznivě působící na kvantitu i kvalitu sklizně kulturních rostlin. Tyto formy podporují šíření chorob a škůdců kulturních rostlin, znehodnocení rostlinných produktů a ohrožení zdraví i celkové snížení produktivity práce (Kohout a kol., 1996).

3.3. Nejvýznamnější jednoděložné plevele s herbicidní rezistencí

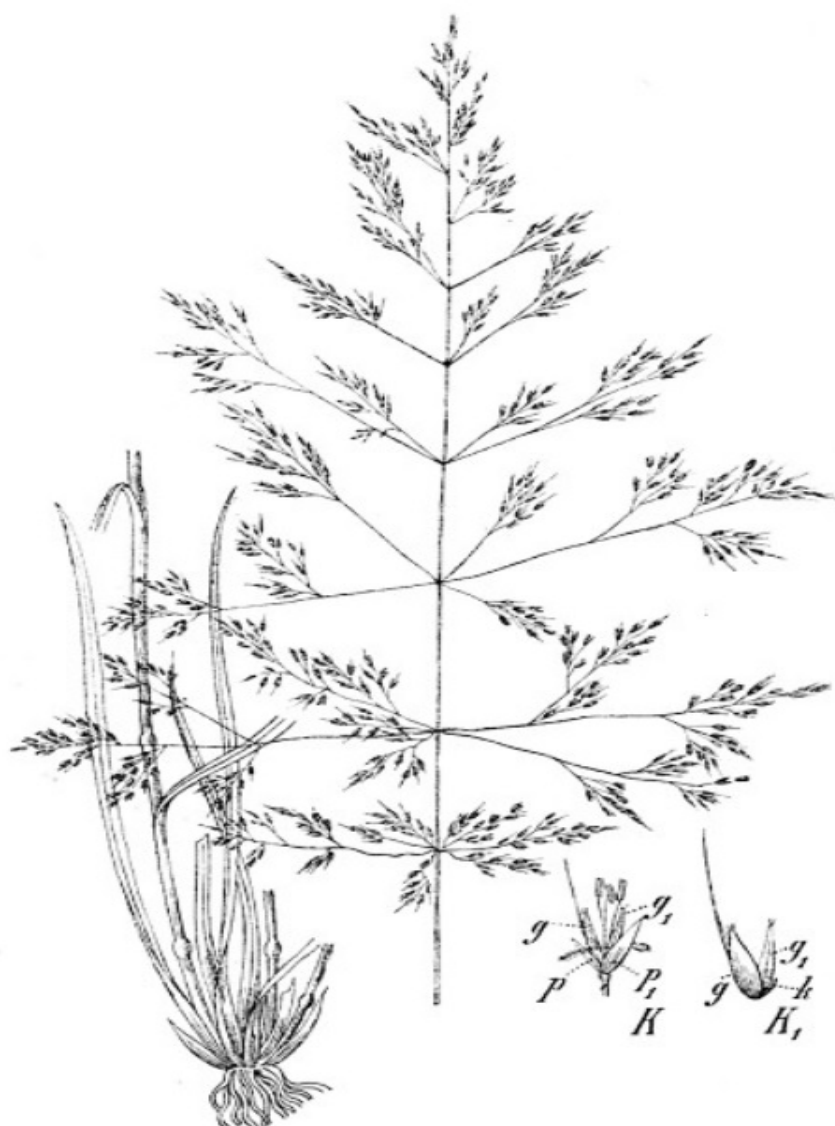
3.3.1. Chundelka metlice (*Apera spica-venti*)

Chundelka metlice je druh obtížného plevelu, který se vyskytuje hlavně mezi ozimými obilninami, ozimou řepkou, víceletými píceňkami a zeleninou. Je rozšířená od nížin až po horské oblasti a dokáže způsobit velké problémy při pěstování rostlin. V současnosti zapleveluje i porosty jařin. Jedná se o rostlinu rodu *Apera*, která patří do čeledi lipnicovitě (*Poaceae*).

Biologie:

Chundelka je typem volně trsnaté trávy, která má svazčité kořeny. Její stébla jsou přímá až kolénkatě vystoupavá, hladká, lesklá, řídce olistěná a mohou dorůst až do výšky 150 cm. Pochva listů má charakteristický jazýček bez oušek, který může být až 6 mm dlouhý. Listy jsou ploché a asi 5 mm široké. Lata má jehlancovitá, rozkladitá a bohatě větvená. (Mikulka, Štrobach, 2020)

Chundelka kvete jednokvětými, leskle nafialovělými klásky. Plevy nejsou osinaté, ale plucha je osinatá a pluška je menší a bez osin. Obilka je kopinatá, ostře zašpičatělá a měří 2-3 mm. Díky své lehkosti (HTS je pouze 1,9 g) se obilky mohou šířit větrem i na velké vzdálenosti (Mikulka, Štrobach, 2020).



615. *Chundelka obecná* ;
K klásek, *K₁* vnitřek klásku: *p*, *p₁* plevy, *g* plucha, *g₁* pluška,
k pastopečka po druhém kvitku.

Obrázek č. 1: Chundelka metlice (*Apera spica-venti*) – celá rostlina, klásek (Polívka, 1902).

Rozmnožování:

Množí se převážně semeny, která jsou uložena v pluchách podobných těm u obilovin. Tyto semena mohou zůstat v půdě po mnoho let a klíčit až pod vhodnými podmínkami. Rozmnožování se však může vyskytnout i vegetativně, zejména u různých druhů metlic. U chundelky metlice se vegetativní rozmnožování vyskytuje poměrně vzácně a obvykle se omezuje na vytváření odnoží z bazálních listů.

Konkurenční schopnost a škodlivost:

Chundelka metlice je považována za velmi konkurenční druh, který se snadno přizpůsobuje novým podmínkám a vykazuje vysokou míru variability. Tato schopnost rychle se přizpůsobit novým prostředím a vzdorovat různým způsobům kontroly z ní činí jeden z nejtěžších plevelů pro hubení v zemědělských plodinách.

Rychle se šíří a vytváří husté porosty, které mohou být pro ostatní rostliny obtížné překonat. Celkově tedy může chundelka metlice vést k ekonomickým ztrátám v zemědělství a snížení biodiverzity v přírodě.

Regulace:

Regulace chundelky metlice je obtížný úkol a vyžaduje komplexní opatření pro úspěšný výsledek. V jařinách je nezbytná kvalitní předseťová příprava půdy, která ovlivní již vzešlé rostliny, které se špatně regenerují v porovnání s roční lipnicí. Pro efektivní kontrolu chundelky lze také využít postupného sledování jařin několik let po sobě a zapojení okopanin, nebo pěstování víceletých pícnin na orné půdě (Mikulka, Štrobach, 2020).

Naštěstí existuje poměrně široká škála herbicidních přípravků s různými mechanismy působení proti chundelce. Vzhledem k tomu, že byly popsány rezistentní populace chundelky metlice vůči inhibitorům ALS, je nutné pravidelně obměňovat přípravky s různými účinnými látkami pro účinnou kontrolu, např. imazamox, sulfosulfuron, tribenuron-methyl, chlorsulfuron, metsulfuron-methyl a flumetsulam. Je důležité regulovat porosty již v podzimních měsících a potřebě čištění porostů v jarních měsících se věnovat jen tehdy, kdy je to nezbytné (Mikulka, Štrobach, 2020).

Na podzim lze proti chundelce použít velmi široké spektrum herbicidů, jako jsou např. Pendimethalin, chlorotoluron, flufenacet, prosulfocarb, chlorsulfuron, pyroxsulam, iodosulfuron, penoxsulam a další. Na jaře je zase možné použít iodosulfuron, mesosulfuron, sulfosulfuron, chlorsulfurona a pyroxsulam (Jursík, 2011).

Herbicidní rezistence:

U chundelky metlice byla identifikována první populace rezistentní k účinné látce chlorsulfuron, což je inhibitor enzymu acetolaktát syntázy (ALS), již v roce 2004. Od té doby byly na ČZU provedeny růstové testy mnoha dalších populací chundelky s podezřením na rezistenci. Výsledky ukázaly, že více než 70 % testovaných populací, které byly odebírány na pozemcích, kde byla pozorována snížená účinnost herbicidního přípravku, vykazovalo rezistenci k různým účinným látkám ze skupiny inhibitorů ALS (Soukup et al., 2021).

U chundelky metlice je stále častější křížová rezistence k několika skupinám herbicidů, včetně sulfonylmočovin (chlorsulfuron, iodosulfuron, mesosulfuron, sulfosulfuron), triazolových pyrimidinů (penoxsulam, pyroxsulam) a sulfonylamino-karbonyl-triazolinonů (propoxycarbazone). Navíc se v posledních letech objevují populace, které jsou zároveň rezistentní i k inhibitorům enzymu acetyl-koenzym A karboxylázy (fenoxaprop, pinoxaden) a k inhibitorům fotosystému II (zejména k chlorotoluronu). Tato vícečetná rezistence v daných lokalitách komplikuje ochranu proti chundelce metlici a omezuje výběr účinných herbicidů

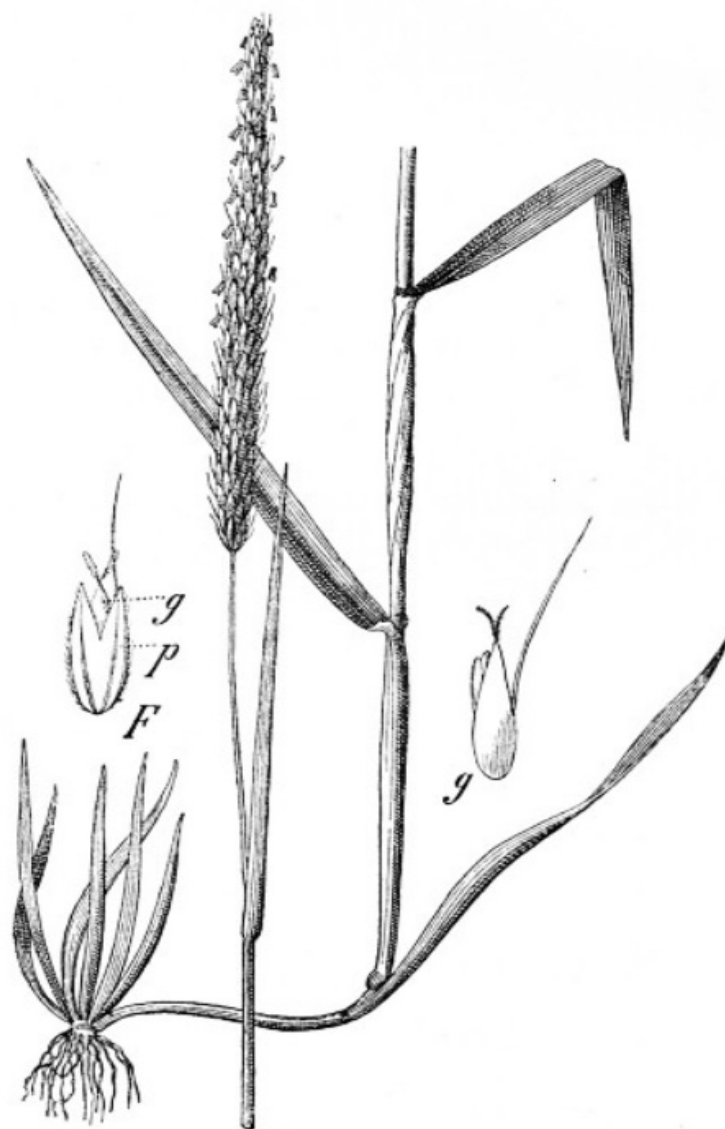
Již existují i populace, které jsou rezistentní ke všem třem výše uvedeným mechanismům účinku. Tento typ rezistence nalezený v jižních Čechách prakticky vylučuje z použití většinu postemergentních herbicidů (Soukup et al., 2021).

3.3.2. Psárka polní (*Alopecurus myosuroides*)

Psárka polní (*Alopecurus myosuroides*) je druh jednoletého plevelného rostliny, která patří do čeledi lipnicovité (*Poaceae*). Její přirozené prostředí jsou pole, zahrady, louky a pastviny, ale v současné době je rozšířena po celém světě jako invazivní druh. Psárka polní je pro zemědělce problematická, protože může způsobit významné škody na úrodě a snížit zisky.

Popis rostliny:

Psárka polní je trsnatá tráva s přímými, drsnými stébly dorůstajícími výšky 20-40 (60) cm. Její listy mají ploché čepele o šířce 3-5 (8) mm a jsou drsné na líci. Květenstvím je lichoklas o délce 5-8 (12) cm, který může být na bázi rozvětvený a obsahuje větvičky s bledě zelenými klásky. Pluchy jsou srostlé do poloviny, bělavé a mají pluchy s 8 mm dlouhou osinou. Rostlina kvete od května do července a rozmnožuje se obilkami, které jsou poměrně velké, pluchaté a osinaté, měří 5-6 mm na délku a 1,2-1,9 mm na šířku. Rostliny také silně odnožují, vytvářejí až 6 odnoží. Pro klíčení potřebuje psárka teplotu mezi 3 až 5 °C a dostatek vláhy, přičemž světlo urychluje vzcházení (Mikulka, Štrobach, 2020).



596. *Psárka rolní*;
F klásek: *p* plevy, *g* plucha; *g* vnitřek klásku (bez plev).

Obrázek č.2: Psárka polní (*Alopecurus myosuroides*) - celá rostlina a klásek (Polívka, 1902).

Rozmnožování:

Psárka polní se rozmnožuje převážně generativně, tedy pomocí obilky. Rostlina silně odnožuje, průměrně vytvoří až 6 odnoží, které vytvářejí nová stébla a květenství. Pro klíčení potřebuje teplotu mezi 3 až 5 °C a dostatek vláhy, nejnáze klíčí z povrchových vrstev půdy, světlo urychluje vzcházení. Obilky mají dobrou klíčivost a snadno se uvolňují z řídkých lichoklasů ještě před sklizní plodin na poli a zůstávají v půdní zásobě. Na další lokality se mohou dostat s osivem trav a jiných plodin. Obilky v půdě vydrží i několik let a nejlépe vzcházejí z povrchových vrstev půdy z hloubek do 3–4 cm (Mikulka, Štrobach, 2021).

Škodlivost:

Psárka polní se stala pro zemědělce celosvětovým problémem kvůli své schopnosti vyvinout herbicidní rezistenci a snížit tak účinnost herbicidů používaných k její kontrole. Psárka polní může také snížit výnosy zemědělských plodin, protože se šíří rychle a vytváří husté porosty, které konkurují plodinám o vodu, živiny a sluneční světlo. Navíc psárka polní může způsobit problémy s kvalitou sklizně, zejména pokud infikuje obilniny a olejnaté plodiny.

Regulace:

Existují různé způsoby, jak regulovat psárku polní, která je často považována za škodlivou rostlinu v zemědělství. Mezi nejúčinnější metody patří hluboká orba, která snižuje množství psárky v půdě, a použití herbicidů s dostatečně účinnými látkami. Regulace psárky pomocí půdních herbicidů, jako jsou např. metazachlor, dimethenamid-P, S-metolachlor, acetochlor, propisochlor a pendimethalin, může být méně účinná, protože tato rostlina je již odolná vůči herbicidům, například proti glyphosátu a sulfonylureovým herbicidům, jako jsou například metsulfuron-methyl, tribenuron-methyl nebo chlorsulfuron, a účinnost se snižuje s postupem času. Pro postemergentní regulaci je tedy důležité zasáhnout v rané fázi růstu, kdy je psárka nejcitlivější (Mikulka, Štrobach, 2020). Nejúčinnějšími herbicidy pro regulaci psárky u nás jsou pendimethalin, flufenacet, pinoxaden. (Jursík, 2011)

Regulace psárky je často komplikovaná její rychlou růstovou dynamikou na začátku vegetace a schopností vzcházet i z větších hloubek půdy. Navíc v poslední době byly zaznamenány populace psárky rezistentní vůči herbicidům v některých zemích Evropy, včetně Česka (Mikulka, Štrobach, 2020; Jursík, 2011).

Z preventivního hlediska je nejlepší ochrana proti zapelevelení polí založena na obecných zásadách, jako je střídání plodin, správné zpracování půdy (orba, plečkování, vláčení), použití čistého osiva, správná výživa pěstovaných rostlin a kvalitní statková hnojiva. Tyto postupy pomáhají snižovat množství psárky v půdě a předcházet jejímu šíření (Mikulka, Štrobach, 2020).

3.3.3. Sveřep jalový (*Bromus sterilis*)

Sveřep jalový dříve nepatřil mezi významné plevely, ale v poslední době se jeho význam zvyšuje. Rostlina je velmi konkurenceschopná a dokáže se přizpůsobit měnícím se podmínkám, což vede k jeho šíření. To je podporováno vysokým podílem ozimých obilnin v osevech, větším využíváním technologií minimálního zpracování půdy, které jsou vhodné i pro většinu trávovitých plevelů, a přirozenou odolností vůči většině běžně používaných herbicidů. Sveřep jalový (*Bromus sterilis*) je jednoletá nebo dvouletá tráva patřící do čeledi lipnicovitých (*Poaceae*) (Mikulka, Štrobach, 2020).

Popis:

Sveřep jalový je druh jednoleté, ozimé trávy, která roste ve volných trsech a dorůstá výšky mezi 30 až 100 cm. Má silné svazčité kořeny a stébla, která mohou být buď přímá nebo v kolínkách vystoupavá. Pochvy listů jsou měkce chlupaté a téměř uzavřené, s jemně roztřepeným jazýčkem o velikosti 4 mm, ale bez oušek. Listy jsou ploché, ochablé, měkce chlupaté a mají drsné okraje. Listové čepele jsou 60 cm dlouhé a 6 mm široké. Listová vernance je stočená. Na vrcholu stébla se nachází všestranně rozkladitá lata, která je velmi řídká a široce rozložená. Větévky jsou dlouhé a po odkvětu mírně převislé a nesou jeden až čtyři osinaté klásky, které mohou mít čtyři až šest kvítků. V době květu jsou klásky zelené a později fialové až hnědé, nahoře do široka otevřené. Spodní pleva je jednožilná, horní třížilná, jsou protáhlé, stejně dlouhé a mají až 3 cm rovnou osinu. Kvete od května do července (Möllerová, 2009).



697. *Sveřep jalový.*

Obrázek č.3: Sveřep jalový (*Bromus sterilis*) - celá rostlina (Polívka, 1902).

Rozmnožování:

Sveřep jalový se rozmnožuje semeny, která jsou uložena v kláscích na koncích větví. Semena dozrávají v létě a jsou velmi drobná, váží jen zlomek gramu. Rozptylují se větrem nebo se šíří s pomocí zvířat a lidí, kteří je přenášejí na oblečení nebo na obuvi. Semena mohou zůstat životaschopná v půdě po mnoho let a čekají na vhodné podmínky pro klíčení.

Sveřep jalový se může také rozmnožovat vegetativně, tedy vytvářením nových rostlin z kořenů, oddenků nebo stonků. Tyto nové rostliny mohou vytvořit nové trsy a tím se sveřep jalový rozšíří do větší plochy.

Škodlivost:

Sveřep konkuruje o prostor, světlo, vodu a živiny, což může vést ke snížení výnosů. Kromě toho může obsahovat toxiny, které jsou škodlivé pro zvířata i člověka. Například alkaloidy, které mohou způsobit otravu při konzumaci infikovaných obilovin. Sveřep jalový je také hostitelem některých chorob a škůdců, které mohou poškodit pěstované plodiny. Celkově lze říci, že sveřep jalový je nepřátelskou rostlinou v zemědělství a jeho výskyt by měl být řádně monitorován a regulován.

Regulace:

Existují různé způsoby, jak zabránit zaplevelení plodin sveřepy. Kombinace herbicidů a mechanických postupů, jako je podmítka a orba, střídání plodin, úplná likvidace ohnisek zaplevelení i s porosty v jejich okolí jsou obecně osvědčené postupy. Nicméně použití herbicidů může být obtížné vzhledem k rychlému růstu a odolnosti sveřepů vůči běžně používaným herbicidům, jako je glyphosát, mesotrion, florasulam, MCPA, Dicamba a 2,4-D – herbicid. Doporučují se herbicidy obsahující účinnou látku ze skupiny inhibitorů acetolaktátsyntázy (ALS), jako jsou např. Propoxycarbazone, mesosulfuron, sulfosulfuron, spolu se smáčedly nebo herbicidy s vysokým obsahem flufenacetu. Kvůli regeneraci sveřepů je třeba herbicidní aplikace opakovat. Regulaci sveřepů také komplikuje jejich postupné vzcházení (Mikulka, Štrobach, 2020; Jursík, 2011).

3.4. Definice herbicidů

Herbicidy jsou klíčovým nástrojem pro kontrolu plevelů a nežádoucích rostlin v různých odvětvích zemědělství, zahradnictví a lesnictví. V zemědělství jsou herbicidy často používány k ochraně plodin před konkurenčními plevele, které mohou snížit výnos plodin a ovlivnit jejich kvalitu. V zahradnictví jsou herbicidy používány k ochraně zahrad před plevele a dalšími nežádoucími rostlinami, které mohou konkurovat květinám a keřům o živiny, světlo a prostor. V lesnictví se herbicidy používají k likvidaci nežádoucích rostlin v oblastech s nově vysazenými stromy, což umožňuje lepší růst a ochranu lesních porostů (Mesnage, Zaller, 2021).

Herbicidy se vyrábějí v různých formách, jako jsou tekutiny, prášky, granule nebo aerosoly. Existují různé typy herbicidů, jako jsou selektivní herbicidy, které zničí pouze určité druhy rostlin, a neselektivní herbicidy, které zničí všechny rostliny, se kterými přijdou do

kontaktu. Některé herbicidy jsou aplikovány přímo na listy rostlin, zatímco jiné jsou aplikovány do půdy (Mesnage, Zaller, 2021).

Výběr správného typu herbicidu závisí na druhu a fázi vývoje nežádoucích rostlin, účelu aplikace a podmínkách prostředí, jako jsou půdní a klimatické faktory. Je důležité používat herbicidy v souladu s návodem a správně je aplikovat, aby se minimalizovaly negativní dopady na životní prostředí a nežádoucí účinky na případné náhodné cílové rostliny (Mesnage, Zaller, 2021).

3.5. Klasifikace herbicidů

3.5.1. Podle selektivity účinku a působení

Herbicidy lze také rozdělit podle selektivity účinku na rostliny, což znamená, že určitý herbicid bude mít větší účinnost na určité rostliny než na jiné. Následující seznam uvádí několik typů herbicidů podle selektivity účinku:

a) Selektivní herbicidy

Selektivní herbicidy jsou chemické látky používané k ničení určitých druhů rostlin, zatímco zanechávají jiné druhy rostlin nedotčené. Tyto herbicidy jsou obvykle používány k řízení a omezení růstu nežádoucích rostlin, zatímco se snaží minimalizovat poškození nebo zabití cílové plodiny nebo trávy.

Použití selektivních herbicidů může být velmi užitečné v zemědělství, kde je potřeba řídit růst plevelů a zároveň zachovat růst plodin nebo trávy. Avšak, jako u každého chemického produktu, je důležité používat je správným způsobem a v souladu s návody na etiketě. Mezi selektivní herbicidy patří například atrazin, metolachlor, 2,4-D, dikamba a mnoho dalších (Liu et al., 2019).

b) Neselektivní herbicidy

Neselektivní herbicidy jsou chemické látky používané k ničení širokého spektra rostlin, bez ohledu na to, zda jsou cílovou rostlinou nebo ne. Tyto herbicidy jsou obvykle používány pro likvidaci plevelu nebo vegetace na plochách, kde se neplánuje růst určitých rostlin.

Mohou mít silné a rychlé účinky, nicméně jejich použití může být riskantní, protože mohou způsobit poškození i na dalších rostlinách a také mohou mít negativní dopad na životní prostředí. Proto se doporučuje používat je opatrně a s ohledem na okolní prostředí.

Mezi neselektivní herbicidy patří například glyfosát, diuron, dikvat, paraquat nebo 2,4-D (Monaco, Weller, Ashton, 2002).

c) Kontaktní herbicidy

Kontaktní herbicidy jsou herbicidy, které ničí pouze rostliny, se kterými přicházejí do přímého kontaktu. Tyto herbicidy se používají k ničení nadzemních částí rostlin, jako jsou listy a stonky, a obvykle neovlivňují kořeny. Kontaktní herbicidy se často používají k odstraňování plevelů a ke zbavování se nežádoucích rostlin v oblastech, jako jsou cesty, parkoviště a podobně. Příklady kontaktních herbicidů zahrnují glyfosát, diuron a paraquat (Mallik, Senb, 2018).

d) Systémové herbicidy

Systémové herbicidy jsou herbicidy, které se absorbují kořeny nebo listy rostlin a následně se transportují do celé rostliny. Tyto herbicidy mohou ničit jak nadzemní, tak i podzemní části rostlin, včetně kořenů. Systémové herbicidy se používají k ničení trvalých rostlin, jako jsou keře, stromy, trávy a další rostliny. Příklady systémových herbicidů zahrnují glyphosate, imazapyr a tebuthiuron (Grossmann, 2010).

e) Preemergentní herbicidy

Preemergentní herbicidy jsou herbicidy aplikované před výsadbou nebo vyklíčením semen, aby zabránily růstu plevelů a nežádoucích rostlin. Tyto herbicidy mohou být aplikovány přímo na půdu, kde se poté vstřebávají a chrání semena před klíčením. Preemergentní herbicidy jsou obvykle používány v zemědělské výrobě, kde mohou být aplikovány na pole před setím, aby zabránily růstu plevelů a zvýšily výnosy. Příklady preemergentních herbicidů zahrnují atrazin, metolachlor a pendimethalin (Zimdahl, 2018)

f) Postemergentní herbicidy

Postemergentní herbicidy jsou herbicidy aplikované na již vyrostlé rostliny, které jsou již nad zemí. Tyto herbicidy mohou být buď selektivní nebo neselektivní a jsou účinné proti různým druhům plevelů a nežádoucích rostlin. Tyto herbicidy jsou obvykle aplikovány na listy rostlin, kde se poté vstřebávají a transportují do celé rostliny. Příklady postemergentních herbicidů zahrnují glyphosate, 2,4-D a dicamba (Grossmann, 2010).

Selektivita účinku herbicidů může být důležitá při výběru správného herbicidu pro konkrétní plodinu nebo oblast. Výběr správného herbicidu může také pomoci minimalizovat škody na okolních rostlinách a životním prostředí.

3.5.2. Podle aplikace

Herbicity lze také rozdělit podle způsobu aplikace. Následující seznam uvádí několik typů herbicidů podle aplikace:

a) Postřikové herbicidy

Aplikace herbicidů postřikem se provádí pomocí speciálních postřikových zařízení, která umožňují rovnoměrné rozptýlení herbicidu na listy nebo jiné části rostlin. Při aplikaci postřikem je důležité zvolit správnou koncentraci a dávkování herbicidu, aby bylo dosaženo maximální účinnosti při minimalizaci nežádoucích účinků.

Aplikace herbicidů postřikem se provádí buď ručně nebo pomocí speciálních strojů. Ruční aplikace se používá pro menší plochy nebo pro terénní nerovnosti, kde je třeba aplikovat herbicid přesně na určité místo. Pro větší plochy se používají stroje, které umožňují aplikaci herbicidů velmi rychle a účinně.

Postřikové aplikace herbicidů jsou vhodné pro postemergentní a systémové herbicidy, které se aplikují na již vyrostlé rostliny, nebo na listy, kde se následně vstřebávají a transportují do celé rostliny (Grossmann, 2010).

b) Přímé aplikace

Přímá aplikace herbicidů se provádí na specifické části rostlin, jako jsou listy, stonky nebo kořeny. Tato aplikace se provádí pomocí různých technik a metod v závislosti na rostlinné kultuře a herbicidu použitém k aplikaci.

Pro aplikaci herbicidů na listy se používají postřiky a kropení. Kropení se používá pro aplikaci malého množství herbicidu přímo na listy rostlin, zatímco postřik se používá pro aplikaci většího množství herbicidu na listy, stonky nebo kořeny rostlin.

Přímá aplikace na kořeny se provádí pomocí vstřikování, kdy se herbicid vstřikuje přímo do kořenů rostliny. Tato metoda se obvykle používá pro aplikaci herbicidů proti trvalým plevelům a invazivním rostlinám.

Pro aplikaci herbicidů na stonky se používají metody jako jsou nátěry, potírání nebo aplikace pomocí válečků. Tyto metody se obvykle používají pro aplikaci herbicidů na omezené oblasti nebo pro ochranu rostlin, které nejsou cílem aplikace.

Přímá aplikace herbicidů může být selektivní nebo neselektivní, a závisí na zvoleném herbicidu a rostlinné kultuře, na kterou se aplikuje (Buhler, 1998)

c) Pásová aplikace

Pásová aplikace herbicidů je způsob aplikace herbicidů na velké plochy zemědělského pozemku, který umožňuje efektivní a úsporné použití herbicidů. Pásová aplikace se provádí pomocí speciálních zařízení, která se nazývají aplikátory nebo rozprašovače.

Aplikátory jsou obvykle umístěny na traktorech nebo jiných zemědělských strojích a jsou napojeny na nádrž s herbicidy. Aplikátor vytváří kontinuální pásy, které jsou široké několik metrů a které se překrývají, aby se zaručilo, že každá část plochy bude ošetřena herbicidem.

Pásová aplikace má několik výhod oproti jiným způsobům aplikace herbicidů, jako je například aplikace pomocí rozprašovačů na traktoru nebo pomocí letadel. Pásová aplikace umožňuje úsporu herbicidů díky přesnému dávkování a umožňuje pokrýt větší plochu za kratší dobu. Navíc pásová aplikace minimalizuje riziko kontaminace životního prostředí, protože se herbicidy aplikují přesně tam, kde je to potřeba.

Nicméně pásová aplikace má také některé nevýhody. Například je potřeba speciálních zařízení a traktorů, což může být nákladné pro menší zemědělské podniky. Dále je třeba přesně plánovat trasu aplikace a vyhnout se překážkám, jako jsou stromy nebo elektrické vedení.

Celkově lze říci, že pásová aplikace herbicidů je efektivní způsob aplikace herbicidů na velké plochy zemědělského pozemku, který umožňuje úsporné a přesné použití herbicidů (Vaněk et al., 2018; Naranjo et al., 2015).

d) Aplikace přes semena

Aplikace herbicidů přes semena je jedna z metod, jakými lze aplikovat herbicidy v zemědělství. Tento postup spočívá v aplikaci herbicidů při setí, což umožňuje kontrolovat plevelné rostliny již v raném stadiu růstu.

Tato metoda se využívá především v kulturách, které jsou citlivé na konkurenci plevelů, jako jsou například olejové plodiny nebo řepka. Při aplikaci herbicidů přes semena je důležité zvolit správný typ herbicidu, který bude účinný proti cíleným plevelům, ale nebude

poškozovat osev. Většinou se používají selektivní herbicidy, které jsou schopné ovlivňovat růst plevelů bez poškození osevu.

Aplikace přes semena se využívá jak v konvenčním zemědělství, tak i v ekologickém zemědělství, kde jsou k dispozici přírodní herbicidy. Tento postup může být výhodný, protože umožňuje omezit množství herbicidů, které se používají na pole, a minimalizovat riziko kontaminace vody a půdy (Hartzel, Owen, 2015; Grossmann, 2010).

e) Aplikace do půdy

Aplikace herbicidů do půdy je běžnou metodou používanou v zemědělství ke kontrole plevelů. Tato metoda umožňuje aplikaci herbicidů přímo na kořeny nebo semena plevelů a výrazně snižuje množství herbicidů, které se používají na pole.

Při aplikaci herbicidů do půdy se herbicidy aplikují na pole buď před setím, nebo po setí před vyklíčením osiva. Herbicidy mohou být aplikovány různými způsoby, například pomocí postřikovače, rozmetadla nebo injektáží.

Důležitým faktorem při aplikaci herbicidů do půdy je výběr správného herbicidu. Je nutné zvolit herbicid, který bude účinný proti cíleným plevelům a zároveň minimalizuje riziko poškození osevu nebo okolních rostlin.

Aplikace herbicidů do půdy může být výhodná, protože umožňuje kontrolovat plevele v raném stadiu růstu a minimalizuje riziko kontaminace vody a půdy. Nicméně je třeba být opatrný, aby se herbicidy nedostaly do podzemních vod nebo nezpůsobily škody na okolních rostlinách a živočiších (Andrew J. Price, 2013).

Výběr správného typu aplikace závisí na cíli použití herbicidu, velikosti plochy, kde se má aplikovat, a dalších faktorech. Správná aplikace herbicidů může pomoci snížit množství potřebných látek a tím minimalizovat negativní dopady na životní prostředí.

3.5.3. Podle mechanismu účinku

Herbicidy lze dále rozdělit podle mechanismu účinku na rostliny. Následující seznam uvádí několik typů herbicidů podle mechanismu účinku:

a) Inhibitory fotosyntézy

Inhibitory fotosyntézy jsou chemické látky, které ovlivňují fotosyntetický proces v rostlinách. Tyto látky interferují s různými enzymy, pigmenty a dalšími molekulami, které jsou důležité pro fotosyntézu. Důsledkem toho je snížení schopnosti rostliny využívat sluneční energii pro tvorbu organických látek, což má za následek oslabení nebo dokonce úplnou ztrátu vitality rostliny.

Mezi nejčastější inhibitory fotosyntézy patří herbicidy jako atrazin, diuron, simazin a další. Tyto látky jsou běžně používány v zemědělství k ochraně plodin před nežádoucími rostlinami, ale mohou mít také negativní vliv na okolní prostředí a ekosystémy.

Inhibitory fotosyntézy se využívají i v laboratorních studiích k výzkumu procesů fotosyntézy a ke studiu molekulárních mechanismů, které jsou zodpovědné za tento proces (Cobb, Reade, 2010; Grossmann, 2010).

b) Inhibitory růstu

Inhibitory růstu jsou chemické látky, které mohou brzdit nebo zastavit růst rostlin. Tyto látky jsou často používány v zemědělství, lesnictví a zahradnictví ke kontrole nežádoucích rostlin a plevelů.

Mezi nejčastější inhibitory růstu patří herbicidy jako glyphosát, glufosinát amonný a další. Tyto látky mohou působit na různé procesy v rostlinných buňkách, jako je například dělení buněk, tvorba nových orgánů nebo syntéza proteinů.

Inhibitory růstu mohou mít negativní vliv na okolní prostředí a organismy, pokud jsou používány neodpovědně. Proto je důležité používat je s opatrností a dodržovat předepsané postupy a dávkování (Cobb, Reade, 2010; Grossmann, 2010).

c) Inhibitory syntézy bílkovin

Inhibitory syntézy bílkovin se často používají v zemědělství jako herbicidy pro kontrolu plevelů. Tyto látky mohou působit na různé procesy v buňkách rostlin a bránit jim v tvorbě nezbytných bílkovin pro růst a vývoj.

Mezi nejčastěji používané inhibitory syntézy bílkovin patří například glyphosát, glufosinát amonný a další. Tyto herbicidy jsou širokospektrální, což znamená, že mohou zabít nejen nežádoucí plevelové rostliny, ale i užitečné rostliny a další organismy.

Použití inhibitory syntézy bílkovin může mít negativní dopad na životní prostředí, zejména na půdní mikroflóru a faunu (Cobb, Reade, 2010; Grossmann, 2010).

d) Inhibitory syntézy lipidů

Inhibitory syntézy lipidů jsou herbicidy, které působí na rostliny tím, že narušují tvorbu lipidů v buňkách. Tyto látky jsou velmi účinné proti mnoha druhům plevelů, protože rostliny potřebují syntetizovat lipidy pro tvorbu buněčných membrán, jako zdroj energie a pro další metabolické procesy. Inhibitory syntézy lipidů brání rostlinám v syntéze některých důležitých lipidových molekul, což vede k narušení buněčného metabolismu a postupnému uhynutí rostlin.

Mezi nejčastěji používané inhibitory syntézy lipidů patří například fomesafen, oxyfluorfen, flumioxazin, pyroxasulfone a mnoho dalších. Tyto herbicidy se obvykle aplikují na listy plevelů, kde se rychle vstřebávají a transportují do kořenů a dalších částí rostliny, kde působí jako postupný jed.

Inhibitory syntézy lipidů se používají nejen v zemědělství, ale také v lesnictví a krajinářské údržbě. Tyto herbicidy mají výhodu v tom, že jsou šetrné k půdnímu prostředí a nezanechávají dlouhodobé zbytky v půdě (Cobb, Reade, 2010; Grossmann, 2010).

e) Inhibitory syntézy kyseliny listové

Inhibitory syntézy kyseliny listové jsou herbicidy, které narušují tvorbu kyseliny listové v rostlinách. Kyselina listová je důležitým vitamínem pro rostliny, neboť je nezbytná pro tvorbu nukleových kyselin a syntézu proteinů. Inhibitory syntézy kyseliny listové brání rostlinám v syntéze této důležité látky, což vede k jejich postupnému usmrcení.

Mezi nejčastěji používané inhibitory syntézy kyseliny listové patří glyphosát, který byl patentován společností Monsanto v roce 1970 a od té doby se stal nejrozšířenějším herbicidem na světě. Dalšími herbicidy z této skupiny jsou například glufosinát amonný, sulfosulfuron, pyrazosulfuron-ethyl a další (Cobb, Reade, 2010; Grossmann, 2010).

Správná volba herbicidu závisí na konkrétní situaci a cíli aplikace. Je důležité používat herbicidy s opatrností, aby se minimalizovaly negativní dopady na životní prostředí a na další rostliny, zvířata a lidi.

3.6. Příjem a transport herbicidu v rostlině

Jednotlivé druhy herbicidů mají různé fyzikálně-chemické vlastnosti a jejich transport v rostlině je tak ovlivňován faktory prostředí, které se mohou měnit i během vývoje rostliny. Nutno vzít v potaz také fakt, že jakmile dojde ke vstupu molekul herbicidu do rostlinných buněk, dochází k jejich postupnému odbourávání a ke snížení koncentrace herbicidu (Hamouzová a kol. 2021).

Do rostliny se může herbicid dostat dvěma způsoby. První způsob je příjem přes kořenový systém po koncentračním spádu. Tento způsob se aplikuje v době klíčení a vzcházení plevelů. Herbicid je následně rychle transportován xylémem k vegetujícím pletivům. Absorpci zde ztěžuje Casparyho proužek tvořený pásem ligninu a suberinu, který je voskovitou bariérou a ztěžuje tak průnik herbicidů do rostliny. Je jakousi obdobou kutikuly, která se nachází na listech rostliny (Hamouzová a kol. 2021, Colquhoun 2011).

Druhým způsobem je aplikace herbicidu post-emergentně, tedy na již vzrostlé rostliny a dochází tak k příjmu herbicidu skrze listy. Transport látky z listů do celé rostliny je pomalejší, neboť musí látka projít přes kutikulu a rostlinné buňky do floému, odkud se pak dostane na cílové místo, účinek se tak projeví později, mezi 2 až 3 týdny. Pro zlepšení absorpce se přidávají surfaktanty, které snižují povrchové napětí kapek a ty tak lépe pokryjí celou plochu listu, což umožní lepší vstřebávání (Hamouzová a kol. 2021).

Využít lze i kombinace těchto dvou způsobů, aby došlo k účinku na již vzrostlé plevelné rostliny, ale i semena klíčící v půdě. V tomto případě musí být použit herbicid, který může být přijímán kořeny i listy nebo lze využít kombinace dvou herbicidů, a to zejména v případě, pokud plevelné rostliny vzchází etapovitě a je nutné působit na všechna vývojová stádia rostliny (Hamouzová a kol. 2021).

Při absorpci a transportu herbicidu v rostlině záleží na vlastnostech herbicidu, zejména na jeho rozpustnosti. Optimální herbicid by měl být rozpustný jak ve vodě, tak i v lipidech. Rozpustnost ve vodě je důležitá pro jeho transport přes apoplast a cytoplasmu buněk, a aby pronikl herbicid skrz kutikulu a fosfolipidové membrány, musí být rozpustný i v lipidech (Hall, Beckie, Wolf, 1999).

3.7. Příčiny vzniku herbicidní rezistence

Herbicidní rezistence u rostlin vzniká v důsledku opakovaného používání herbicidů. Pokud jsou herbicidy používány opakovaně na stejném místě a v pravidelných intervalech, mohou selektovat rostliny s genetickou mutací, která jim umožňuje přežít expozici herbicidu. Tyto mutace se pak mohou šířit v populaci, což zvyšuje celkovou odolnost populace rostlin vůči danému herbicidu (Powles, Yu, 2010; Gaines et al., 2020).

Opakované používání herbicidu je jednou z hlavních příčin vzniku herbicidní rezistence. Pokud se herbicid používá opakovaně na stejných místech a rostlinách, mohou se některé rostliny vyvinout na rezistentní kmeny. To je způsobeno tím, že jedinci s přirozenou rezistencí v populaci přežijí a mohou předávat své geny na potomstvo, což zvyšuje pravděpodobnost vzniku nových rezistentních jedinců (Powles, Yu, 2010; Gaines et al., 2020).

Nedostatečné dávkování herbicidu může být další příčinou vzniku herbicidní rezistence. Pokud není herbicid použit v dostatečné koncentraci, nemusí být účinný proti všem rostlinám. Ty rostliny, které jsou odolné vůči nižším dávkám, se mohou stát dominantními v populaci a snížit účinnost herbicidu (Powles, Yu, 2010; Gaines et al., 2020).

Křížení mezi odolnými a citlivými rostlinami může také být příčinou vzniku herbicidní rezistence. Pokud se odolné a citlivé rostliny vyskytují na stejném místě a dochází k přirozenému křížení, mohou se některé z potomků vyvinout na rezistentní rostliny. Tyto rostliny pak mohou dále přenášet rezistentní geny na další generace rostlin (Powles, Yu, 2010; Gaines et al., 2020).

Křížení mezi odolnými a citlivými rostlinami může být uměle indukováno také aplikací herbicidu na citlivé rostliny. Pokud se odolné rostliny vyskytují v blízkosti citlivých rostlin a jsou vystaveny herbicidu, mohou vytvářet semena, která obsahují rezistentní geny. Tyto semena se pak mohou šířit do okolí a mohou vést k rozvoji odolných kmenů nežádoucích rostlin (Powles, Yu, 2010; Gaines et al., 2020).

Přenos genů je také jednou z možných příčin vzniku herbicidní rezistence. Geny odpovědné za rezistenci na herbicidy se mohou přenášet mezi různými druhy rostlin, nejen mezi jedinci téhož druhu. To znamená, že i když je určitá rostlina vůči určitému herbicidu odolná, může přenášet rezistentní geny na jiné rostliny v okolí (Powles, Yu, 2010; Gaines et al., 2020).

Přenos genů může být přirozený nebo umělý. Přirozený přenos genů se děje v důsledku křížení mezi dvěma druhy rostlin, kdy jsou potomci hybridní rostliny a mohou mít různé kombinace genů obou rodičů. Pokud má jedna z rodičovských rostlin odolnost vůči herbicidu, mohou se některé z hybridních potomků stát odolnými, protože dědí rezistentní gen (Powles, Yu, 2010; Gaines et al., 2020).

Umělý přenos genů se děje během procesu genetického inženýrství. Rostliny jsou geneticky upravovány, aby měly odolnost vůči herbicidu a aby mohly lépe růst v polích, kde se používají herbicidy. Tyto modifikované rostliny se pak mohou křížit s jinými rostlinami, které se následně stávají odolnými vůči herbicidům (Powles, Yu, 2010; Gaines et al., 2020).

Je důležité mít na paměti, že odolnost vůči herbicidům se může vyvinout velmi rychle a může být velmi obtížné ji poté eliminovat. Je proto důležité používat herbicidy s rozumným úsudkem a v souladu s doporučeními a pokyny (Powles, Yu, 2010; Gaines et al., 2020).

3.8. Vývoj herbicidní rezistence

Herbicidní rezistence je schopnost některých rostlin přežít a růst i přesto, že jsou vystaveny běžně používaným herbicidům. Tento jev je významným problémem v zemědělství, protože snižuje účinnost herbicidů a může vést k potřebě používání větších dávek herbicidů nebo k přechodu na jiné herbicidy, což může být nákladné a může mít negativní dopad na životní prostředí (Gaines et al., 2020; Heap, 2014).

Vývoj herbicidní rezistence je proces, který se děje postupně, kdy se některé rostliny s určitou genetickou variací dokážou přizpůsobit stresu způsobenému aplikací herbicidu. Pokud jsou v populaci rostliny s touto rezistencí přítomny, přežívají a mohou se množit a šířit svou rezistenci na další generace rostlin (Gaines et al., 2020; Heap, 2014).

Existuje několik faktorů, které přispívají k vývoji herbicidní rezistence. Mezi ně patří časté a opakované používání stejného herbicidu, používání nedostatečně účinných dávek herbicidu, nebo používání stejného herbicidu na stejném místě a v krátkých intervalech mezi aplikacemi. Tyto faktory umožňují rezistentním rostlinám přežít a reprodukovat se, což zvyšuje počet rostlin s herbicidní rezistencí (Gaines et al., 2020; Heap, 2014).

Prevence vývoje herbicidní rezistence zahrnuje použití různých herbicidů s různými mechanismy účinku, střídání herbicidů a dávek, používání herbicidů jen v případě potřeby a aplikaci herbicidů na optimální úroveň, aby se minimalizoval negativní dopad na životní prostředí a snížila se pravděpodobnost vývoje rezistence (Gaines et al., 2020; Heap, 2014).

3.9. Mechanismy herbicidní rezistence

3.9.1. V místě účinku

Rezistence v místě účinku je výsledkem modifikace vazebného místa herbicidu. V důsledku této modifikace dochází k zamezení efektivního navázání herbicidu s cílovým místem (Tharayil-Santhakumar, 2003). Cílovým místem jsou obvykle enzymy, proteiny nebo jejich komponenty, se kterými se herbicidy váží a tím narušují v rostlině základní funkce. Příčinou modifikace vazebného místa je bodová mutace genu, který kóduje enzym, se kterým by se herbicid normálně vázal. Záměna pořadí aminokyselin v primární struktuře cílového proteinu způsobená bodovou mutací umožní enzymu jeho normální funkci i za přítomnosti herbicidu (Devine, Eberlein, 1997). Tyto změny již byly popsány u všech významných míst účinku herbicidů – D1 proteinů, acetolaktátsyntázy, acetyl-koenzym A karboxylázy a 5-enolpyruvylšikimát-3-fosfát syntázy (Devine, Shukla, 2000).

Mechanismy, které vedou k herbicidní rezistenci v místě účinku, mohou zahrnovat zvýšenou produkci enzymů, které inaktivují herbicidy v dané části rostliny, nebo změny v transportu herbicidů v rostlině, které snižují účinnost herbicidů v této části rostliny (Heap, 2014; Gaines et al., 2020).

Herbicidní rezistence v místě účinku může být problematická zejména u rostlin, které se šíří vegetativně, jako jsou například některé trávy nebo oddenkové druhy, jako je například pýr plazivý. Tyto rostliny mohou mít rozmanité kořenové systémy a růstové zóny, což zvyšuje pravděpodobnost výskytu herbicidní rezistence v místě účinku (Heap, 2014; Gaines et al., 2020).

Prevence herbicidní rezistence v místě účinku zahrnuje použití herbicidů s různými mechanismy účinku, aby se minimalizoval vývoj rezistence v dané oblasti rostliny. Také se doporučuje rotace herbicidů a používání kombinovaných přípravků, aby se minimalizoval výskyt rezistence. Výběr vhodného herbicidu a aplikace v souladu s pokyny výrobce může také pomoci minimalizovat vývoj herbicidní rezistence v místě účinku (Heap, 2014; Gaines et al., 2020).

3.9.2. Mimo místo účinku

Herbicidní rezistence mimo místo účinku se vyskytuje u rostlin, které vyvinuly rezistenci proti herbicidům v celé své rostlinné tkáni, nikoliv pouze na místě aplikace. Tento typ rezistence se obvykle vyskytuje u rostlin, které mají schopnost transportovat herbicidy z jedné části rostliny do druhé, což může vést k akumulaci herbicidů v rostlině, kde je účinnost herbicidu snížena nebo úplně ztracena (Heap, 2014; Gaines et al., 2020).

Mechanismy, které vedou k herbicidní rezistenci mimo místo účinku, mohou zahrnovat změny v transportu herbicidů, které snižují množství herbicidu, který se dostane na cílové místo v rostlině, nebo změny v metabolismu herbicidů, které zvyšují odolnost rostliny proti herbicidům v celé rostlinné tkáni (Heap, 2014; Gaines et al., 2020).

Herbicidní rezistence mimo místo účinku může být problematická zejména u rostlin, které se mohou šířit semeny, jako jsou například některé druhy plevelů. Tyto rostliny mohou přenášet rezistentní geny na své potomky a herbicidní rezistence se tak může šířit v celé populaci (Heap, 2014; Gaines et al., 2020).

Prevence herbicidní rezistence mimo místo účinku zahrnuje používání herbicidů s různými mechanismy účinku a rotaci herbicidů, aby se minimalizovala možnost vývoje rezistence. Také se doporučuje používat kombinované přípravky s různými aktivními látkami, aby se minimalizovala možnost výskytu rezistence v celé rostlině. Správná aplikace herbicidů a výběr vhodného herbicidu mohou také pomoci minimalizovat vývoj herbicidní rezistence mimo místo účinku (Heap, 2014; Gaines et al., 2020).

3.9.3. Křížová a vícenásobná rezistence

Křížová herbicidní rezistence se vyskytuje u rostlin, které vyvinuly rezistenci proti více než jednomu herbicidu s různými mechanismy účinku. Tento typ rezistence se vyvíjí, když jsou rostliny vystaveny kombinaci herbicidů s různými mechanismy účinku a rostliny s genetickými mutacemi, které jim umožňují přežít aplikaci obou herbicidů, mají výhodu a mohou se množit a šířit (Heap, 2014; Gaines et al., 2020).

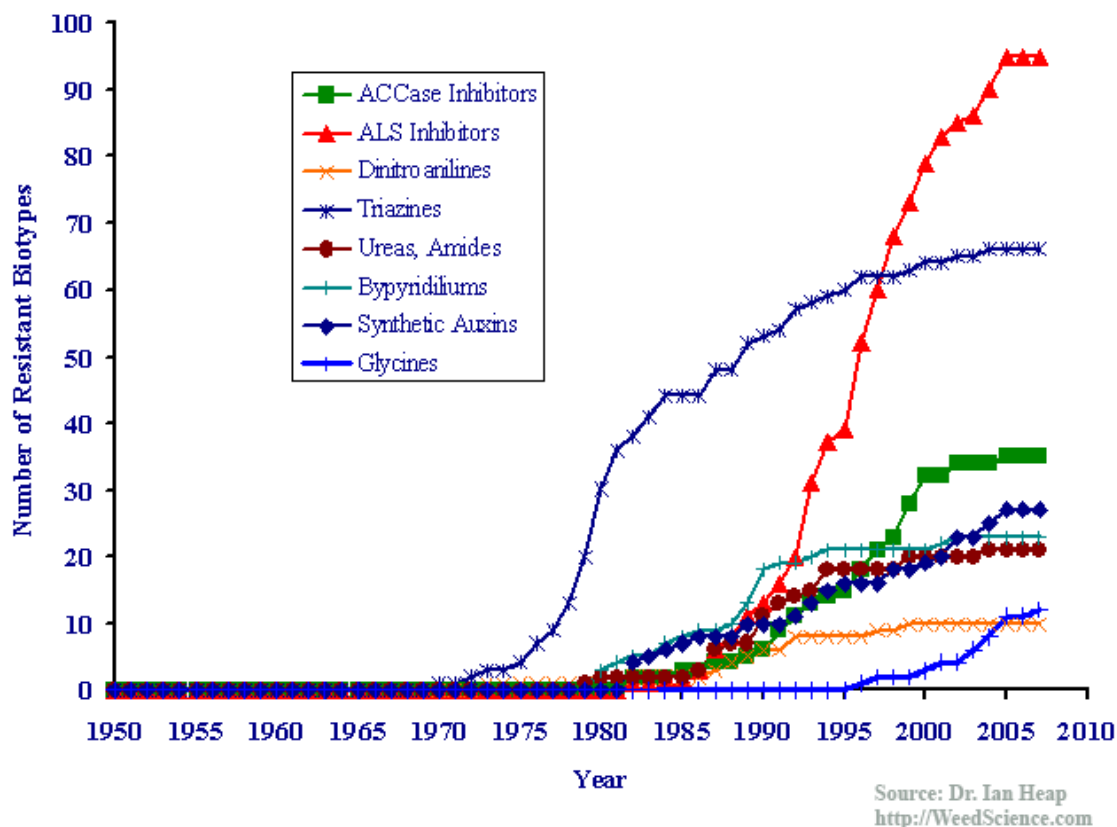
Vícenásobná herbicidní rezistence se vyskytuje u rostlin, které vyvinuly rezistenci proti více než jednomu herbicidu s různým mechanismem účinku. Například mohou být rezistentní proti více než jednomu herbicidu inhibujícímu stejnou enzymatickou dráhu nebo biochemický proces v rostlině. Tento typ rezistence se obvykle vyvíjí, když jsou rostliny

vystaveny opakovaným aplikacím stejného herbicidu nebo herbicidů s podobným mechanismem účinku, a genetické mutace, které umožňují rostlinám přežít aplikaci herbicidu, se hromadí v populaci (Heap, 2014; Gaines et al., 2020).

Křížová a vícenásobná herbicidní rezistence jsou obecně velmi problematické, protože ztěžují boj proti plevelům a mohou vést ke zvýšenému používání herbicidů a nákladům na kontrolu plevelů. Prevence křížové a vícenásobné herbicidní rezistence zahrnuje používání herbicidů s různými mechanismy účinku a rotaci herbicidů s cílem minimalizovat vývoj rezistence. Také se doporučuje používat kombinované přípravky s různými aktivními látkami a správně aplikovat herbicidy, aby se minimalizovala možnost výskytu rezistence. Výzkum a vývoj nových herbicidů s různými mechanismy účinku může také pomoci minimalizovat vývoj křížové a vícenásobné herbicidní rezistence (Heap, 2014; Gaines et al., 2020).

3.10. Rezistence k významným skupinám herbicidů

Trávovité plevele vykazují také často rezistenci k významným skupinám herbicidů. Mezi nejvýznamnější patří rezistence k herbicidům ze skupin sulfonylureí, triazinů, glyphosátů a imidazolonů. Některé druhy trávovitých plevelů dokážou vyvinout rezistenci k více než jedné skupině herbicidů, což značně ztěžuje kontrolu těchto plevelů v zemědělských plodinách.



Obrázek č. 4: Vývoj počtu rezistentních plevelů vůči vybraným skupinám herbicidů v období 1950–2010 (upraveno podle Heap, 2008).

3.10.1. Rezistence k inhibitorům fotosystému II.

Inhibitory fotosystému II jsou skupinou herbicidů, které narušují proces fotosyntézy a vedou k rychlému úhynu rostlin. Tyto herbicidy se vážou na D1 protein ve fotosystému II a blokují tak proces fotosyntézy, která je klíčová pro růst a vývoj rostlin. Rezistence k těmto herbicidům se vyvíjí poměrně často u různých druhů rostlin, zejména u travovitých plevelů. (Pfister et al., 1979; Jursík, 2011).

Rezistence k inhibitorům fotosystému II může být způsobena různými faktory, jako je genetická variabilita, opakované používání stejného herbicidu nebo jeho nadměrné použití. K rezistenci může dojít také prostřednictvím spontánní mutace genů kódujících D1 protein, což vede k vytvoření nových forem D1 proteinu, které jsou odolné vůči danému herbicidu (Pfister et al., 1979; Jursík, 2011).

Proti rezistenci k inhibitorům fotosystému II se využívají různé strategie, jako je rotace herbicidů, kombinace různých herbicidů s jinými metodami kontroly plevelů, nebo

použití herbicidů s jinými mechanismy účinku, které nepůsobí na fotosystém II (Pfister et al., 1979; Jursík, 2011).

3.10.2. Rezistence k inhibitorům acetylkoenzym – A karboxylázy

Inhibitory acetylkoenzym-A karboxylázy (ACCCase) jsou skupinou herbicidů, které narušují syntézu mastných kyselin a vedou k rychlému úhynu rostlin. Podle studie publikované v časopise *Pest Management Science* (Yu et al., 2019) jsou hlavní příčiny vzniku rezistence k inhibitorům acetylkoenzym-A karboxylázy genetické mutace v genu ACCázy, který kóduje tento enzym. Tyto mutace mohou vést ke snížené afinitě k herbicidům nebo k jeho změněnému vazebnému místu. Tyto herbicidy se vážou na ACCCase, což blokuje syntézu kyseliny acetylsalicylové, což je základní stavební blok pro syntézu mastných kyselin. Rezistence k těmto herbicidům se vyvíjí poměrně často u různých druhů rostlin, zejména u trávovitých plevelů. (Jursík, 2011)

Rezistence k inhibitorům ACCCase může být způsobena různými faktory, jako je genetická variabilita, opakované používání stejného herbicidu nebo jeho nadměrné použití. Rezistence může být také způsobena sníženou absorpcí herbicidu rostlinou, zvýšenou degradací herbicidu v rostlině, nebo se může jednat o kombinaci těchto faktorů (Yu et al., 2019)

Proti rezistenci k inhibitorům ACCCase se využívají různé strategie, jako je rotace herbicidů, kombinace různých herbicidů s jinými metodami kontroly plevelů, nebo použití herbicidů s jinými mechanismy účinku, které nepůsobí na ACCCase. V některých případech mohou být úspěšné také změny postupů použití herbicidů, například změna dávkování nebo času aplikace (Yu et al., 2019).

3.10.3. Rezistence k inhibitorům stavby mikrotubulů

Inhibitory stavby mikrotubulů jsou herbicidy, které zasahují do dynamiky cytoskeletu a narušují procesy, jako je dělení buněk a růst kořenů. Tyto herbicidy se vážou na specifické bílkoviny mikrotubulů a ovlivňují tvorbu a stabilitu těchto struktur, což způsobuje poškození buněk a snížení růstu rostliny. Mezi nejčastěji používané herbicidy, které inhibují stavbu mikrotubulů, patří například oryzalin, trifluralin, pendimethalin, dimethenamid, propisochlor a další (Powles, 2008).

Rezistence k herbicidům, které inhibují stavbu mikrotubulů, se může projevovat jako snížená citlivost rostlin k těmto herbicidům. Rezistence může být buď cílená, kdy se rostliny naučí se bránit účinku konkrétního herbicidu, nebo nevysvětlitelná, kdy není jasný důvod pro sníženou účinnost herbicidů. Cílená rezistence se často vyskytuje u rostlin, které jsou vystaveny opakovaným dávkám herbicidů, a výsledkem je výběr populací, které jsou odolné vůči danému herbicidu (Powles, 2008).

Pro boj proti rezistenci k herbicidům, které inhibují stavbu mikrotubulů, se využívají různé strategie, jako například střídání herbicidů s odlišným způsobem účinku, kombinace herbicidů, které mají různé cíle účinku, nebo využití adjuvantů, které zvyšují účinnost herbicidů. Tyto strategie mohou pomoci minimalizovat výskyt rezistence a zajistit účinnost herbicidů v boji proti nežádoucím rostlinám (Powles, 2008).

3.10.4. Rezistence k inhibitorům EPSPS (5-enolpyruvylshikimát-3-fosfát syntázy)

Inhibitory 5-enolpyruvylshikimát-3-fosfát syntázy (EPSPS) jsou herbicidy, které působí na rostliny tím, že narušují syntézu aminokyseliny a kyseliny listové, což nakonec vede k narušení syntézy bílkovin a úhynu rostliny. Mezi nejvýznamnější skupinu herbicidů patří glyfosát, který je široce používán na hubení plevelů v zemědělství, zahradách a lesích po celém světě. (Holec a kol., 2015)

Rezistence k inhibitorům EPSPS vznikla zřejmě jako důsledek nadměrného používání glyfosátu a jiných herbicidů na bázi EPSPS v kombinaci s nedostatečným rotováním plodin a používáním stejných herbicidů opakovaně na stejných pozemcích. To vedlo k výskytu mutantních rostlin, které produkují odolnou formu EPSPS, která se od běžné formy liší pouze malou změnou v aminokyselinové sekvenci, ale tato malá změna v enzymu brání herbicidům vazbu na něj a tím pádem i v jeho blokování (Nandula, 2010; Holec a kol., 2015).

Rezistence k inhibitorům EPSPS se vyskytuje u několika druhů plevelů, včetně druhů z čeledí pýr, kostřavy, merlíků a amarantů. Tento problém je nyní řešen změnou strategie používání herbicidů a rotací různých skupin herbicidů, aby se minimalizovala selekce odolných plevelů (Nandula, 2010).

3.10.5. Rezistence plevelů k inhibitorům ALS (acetolaktát-syntázy)

Inhibitory acetolaktátsyntázy (ALS) jsou skupinou herbicidů, které působí na enzym acetolaktát syntázu, který je zodpovědný za tvorbu aminokyselin. Při aplikaci herbicidů se tedy snižuje produkce aminokyselin a tím dochází k úhynu plevelů. Tyto herbicidy jsou často aplikovány na plochy s pěstovanými plodinami, jako jsou obiloviny a olejnaté plodiny, a jsou účinné proti širokému spektru trávovitých a širokolistých plevelů (Powles, 2010; Jursík, 2011).

Rezistence k ALS inhibitorům se vyvíjí způsobem podobným jako u jiných skupin herbicidů. Při nadměrném a opakovaném používání se některé plevelné rostliny mohou vyvinout mutace v genetickém kódu, které způsobují snížení citlivosti na herbicid. Tyto mutace se mohou vyskytovat v různých genech, které kódují různé proteiny, což může vést k různým úrovním rezistence (Powles, 2010).

Plevelné rostliny s rezistencí k ALS inhibitorům mohou být obtížněji ovladatelné, což zvyšuje náklady na kontrolu plevelů a může snížit výnosy plodin. Proto je důležité minimalizovat riziko vzniku rezistence a provádět řádné řízení plevelů, včetně střídání herbicidů s různými mechanismy účinku a kombinování herbicidů s jinými metodami kontroly plevelů (Powles, 2010).

3.11. Monitoring a testování herbicidní rezistence

Monitorování herbicidní rezistence je důležité pro efektivní a udržitelné využívání herbicidů v zemědělství. Herbicidní rezistence vzniká, když plevele vyvinou mechanismy, které jim umožňují přežít vystavení herbicidům, které by je jinak zabily. K tomuto vývoji může dojít při nadměrném nebo nesprávném používání herbicidů, což vede k výběru odolných populací plevelů.

Existují různé způsoby, jak monitorovat herbicidní rezistenci. Některé z nejčastěji používaných metod jsou: sběr vzorků plevelů, růstové testy, genetické testy, sledování vývoje populace plevelů a sledování herbicidního použití.

Testování herbicidní rezistence se provádí pomocí různých metod, které umožňují posoudit účinnost herbicidů a zjistit, zda jsou určité rostliny rezistentní. Některé z těchto

metod jsou: testování klíčivosti semen, testování účinnosti herbicidu na listech, testování enzymové aktivity, testování genetického základu a testování v terénu.

3.11.1. Sběr vzorků plevele

Sběr vzorků plevele je jedním z nejpoužívanějších způsobů, jak monitorovat herbicidní rezistenci. Tato metoda zahrnuje sběr vzorků plevele z různých oblastí pole, včetně oblastí, kde se používají herbicidy a oblastí, kde se nepoužívají.

Sběr vzorků by měl být proveden v plné zralosti rostlin, aby bylo možné získat co nejvíce informací o citlivosti plevele na herbicidy v průběhu celého vegetačního cyklu. Vzorky plevele by měly být sbírány před aplikací herbicidů a také po aplikaci herbicidů, aby bylo možné porovnat účinnost různých druhů herbicidů.

Sběr vzorků plevele může být velmi užitečný pro identifikaci oblastí, kde se vyskytuje rezistence na určité druhy herbicidů. Tyto informace mohou být použity k přizpůsobení používání herbicidů v oblastech s vysokou úrovní rezistence, což může pomoci zachovat účinnost herbicidů v zemědělství (Caseley et al., 2013).

Po sběru vzorků plevele se provede testování plevele na citlivost na různé druhy herbicidů. Tento test lze provést buď v laboratoři nebo na poli. Laboratorní testy se obvykle provádějí pomocí růstových testů, které měří úroveň rezistence plevele na herbicidy. Testování na poli může být provedeno porovnáním výsledků aplikace herbicidů na oblasti, kde se plevele pěstují a na oblasti, kde se nepěstují (Caseley et al., 2013).

3.11.2. Růstové testy

Růstové testy jsou jedním z nejčastěji používaných typů testů pro monitorování herbicidní rezistence u plevele. Jsou založeny na měření úrovně citlivosti plevele na určitý druh herbicidu ve sklenicích.

Při růstových testech se na testované plevele aplikují různé koncentrace herbicidů a sleduje se, jak plevele reagují. Výsledkem testu je zpravidla vytvoření křivky citlivosti plevele na herbicidy, která ukazuje, jaká koncentrace herbicidu je potřebná k úplnému zničení plevele.

Testy lze provést s různými typy herbicidů a různými druhy plevele. Tyto testy poskytují užitečné informace o úrovni rezistence plevele na konkrétní herbicidy, což

umožňuje zemědělcům a vědcům vyhodnotit účinnost různých herbicidů a přizpůsobit používání herbicidů v zemědělství (Caseley et al., 2013).

Nicméně, testy mají své limity. Některé druhy plevelů jsou obtížné k pěstování a testování, což může ovlivnit výsledky testů. Testy také nemusí zahrnovat faktory jako jsou podmínky růstu plevelů na poli, jako je teplota, vlhkost, konkurence a další faktory, které mohou ovlivnit účinnost herbicidů v reálných podmínkách. Proto se doporučuje kombinovat růstové testy s testováním na poli, aby se získaly co nejkomplexnější informace o úrovni herbicidní rezistence (Caseley et al., 2013).

Jednou z metod k posouzení účinnosti herbicidů proti určitým druhům rostlin je testování účinnosti herbicidu na listech. Tato metoda spočívá v aplikaci herbicidů na listy rostlin a sledování reakce rostlin na herbicidy.

Po aplikaci herbicidů se sleduje, jak rychle a v jakém rozsahu se objevuje poškození na listech a jak se rostlina celkově vyvíjí v průběhu několika dnů nebo týdnů. Rostliny se sledují i po určité době po aplikaci, aby bylo možné určit, jaký dlouhodobý vliv mají herbicidy na rostliny.

Testování účinnosti herbicidu na listech umožňuje rychle posoudit, jaký účinek mají herbicidy na rostliny, a zjistit, zda jsou určité rostliny citlivé nebo rezistentní na dané herbicidy. Tato metoda je obvykle rychlejší a méně nákladná než testování účinnosti herbicidů na celých rostlinách, ale poskytuje méně informací o účincích herbicidů v reálných podmínkách (Caseley et al., 2013).

3.11.3. Genetické testy

Genetické testy jsou dalším způsobem, jak monitorovat herbicidní rezistenci u plevelů. Tyto testy využívají analýzy genů, které jsou zodpovědné za rezistenci plevelů na určitý druh herbicidu (Christoffers, 1999).

Použití genetických testů může poskytnout výsledky rychleji a přesněji než růstové testy. Navíc, genetické testy mohou být provedeny s malým množstvím materiálu, což umožňuje testovat vzorky plevelů z různých oblastí nebo pozorovat změny v populaci plevelů v průběhu času (Christoffers, 1999).

Nicméně, genetické testy mají své limity. Například, některé druhy plevelů mohou mít více mutací nebo komplexní mechanismy pro vývoj rezistence, což může ovlivnit výsledky

testů. Také je třeba brát v úvahu náklady a technické požadavky genetických testů, které mohou být vysoké (Christoffers, 1999).

Pro získání co nejkompexnějšího pohledu na úroveň herbicidní rezistence v populaci plevele se doporučuje kombinovat genetické testy s jinými metodami, jako jsou růstové testy a testy na poli.

Testování genetického základu se používá k analýze DNA vzorků a zjištění genetických informací o jednotlivcích nebo populacích. Existuje mnoho různých metod testování genetického základu, které jsou často používány pro účely diagnostiky, léčby a výzkumu (Christoffers, 1999).

Jednou z nejběžnějších metod testování genetického základu je PCR (polymerázová řetězová reakce), která umožňuje amplifikaci malého množství DNA do množství, které lze snadno analyzovat. Tato metoda se používá pro detekci mutací, klonalitu buněk a genetické testování na různých úrovních (Caseley et al., 2013; Christoffers, 1999).

Další metody zahrnují sekvencování DNA, které umožňuje přesné určení sekvence nukleotidů v DNA vzorku. Tato metoda se používá k diagnostice genetických chorob, identifikaci mutací, analýze vztahů mezi jednotlivci a mnoho dalších účelů.

Jednou z dalších metod testování genetického základu je genotypování, což je proces analýzy genetických variant v jednotlivých genech. Tato metoda se používá pro diagnostiku a genetické testování, ale také pro výzkum populací a vztahů mezi genetickými variantami a fenotypovými charakteristikami (Christoffers, 1999 ;Caseley et al., 2013).

V posledních letech se rozvíjí také technologie, které umožňují analýzu velkého množství genetických dat současně, jako jsou například mikročipy pro genotypování a celogenomové sekvencování (WGS). Tyto technologie umožňují rychlé a přesné analýzy genetických dat a mohou být použity pro výzkum v různých oblastech (Caseley et al., 2013).

Testování genetického základu se používá v mnoha oblastech, jako je například medicína, farmakologie, výzkum genomiky a mnoho dalších oblastí, kde je potřeba analýza genetických dat a vztahů mezi genetickými variantami a fenotypovými charakteristikami (Christoffers, 1999).

3.11.4. Sledování vývoje populace plevele

Sledování vývoje populace plevele je důležitou součástí monitorování herbicidní rezistence. Tento proces zahrnuje sběr dat o výskytu a druzích plevele v různých oblastech, stejně jako sběr informací o používaných herbicidech a o jejich účinnosti na různé druhy plevele. Tyto informace umožňují zemědělcům a výzkumníkům vyvíjet účinnější strategie pro boj proti plevele a minimalizovat dopady herbicidní rezistence na zemědělskou produkci.

Existují různé metody pro sledování vývoje populace plevele, včetně vizuálního pozorování a mapování, sběru dat prostřednictvím mobilních aplikací a geografických informačních systémů (GIS), stejně jako monitorování výskytu plevele pomocí družicových a leteckých snímků (Caseley et al., 2013).

Vizuální pozorování a mapování jsou běžné metody pro sledování výskytu plevele. Tyto metody zahrnují vizuální sběr informací o druzích plevele v poli a následné zpracování dat, aby bylo možné vytvořit mapu výskytu plevele. Tyto mapy umožňují zemědělcům a výzkumníkům sledovat změny v populaci plevele v průběhu času a určit, zda se v dané oblasti vyskytuje rezistence na určité herbicidy.

Sběr dat prostřednictvím mobilních aplikací a GIS umožňuje efektivnější a přesnější sběr informací o výskytu plevele a jeho druzích. Tyto aplikace umožňují uživatelům zaznamenávat a nahrávat informace o výskytu plevele v reálném čase a ukládat je do centralizovaného systému, kde mohou být analyzovány (Caseley et al., 2013).

Monitorování výskytu plevele pomocí družicových a leteckých snímků je další metoda, která umožňuje sledovat změny v populaci plevele na velkých územích. Tyto snímky umožňují výzkumníkům identifikovat oblasti s vysokou hustotou plevele a určit, zda jsou tyto oblasti ohrožené rezistencí na herbicidy.

3.11.5. Sledování herbicidního použití

Sledování herbicidního použití je důležitou součástí zemědělského hospodářství a ochrany životního prostředí. Herbicidy jsou chemikálie, které se používají k hubení plevelů a dalších nežádoucích rostlin. Tyto chemikálie jsou však také potenciálně škodlivé pro životní prostředí a lidské zdraví, protože mohou způsobit znečištění vody a půdy, stejně jako ovlivnit ekosystémy.

Sledování herbicidního použití je nezbytné pro zajištění bezpečnosti a účinnosti těchto chemikálií. To může být provedeno několika způsoby, včetně zaznamenávání dávkování a použití herbicidů v denících a vytváření map herbicidního použití. Tyto informace umožňují zemědělcům a správcům půdy sledovat a spravovat použití herbicidů v jejich oblastech.

Další důležitou součástí sledování herbicidního použití je monitorování účinnosti použití těchto chemikálií. To může být provedeno sledováním výskytu a hustoty plevelů v průběhu času a porovnáním s úrovněmi, které byly zaznamenány před aplikací herbicidů. Pokud se výskyt plevelů nezmírní nebo se zvýší, může to znamenat, že byly použity nevhodné herbicidy nebo byla aplikace provedena neúčinně (Caseley et al., 2013).

Sledování herbicidního použití také umožňuje odhalit potenciální problémy s používáním těchto chemikálií. Například, pokud se zjistí, že herbicidy jsou aplikovány na oblasti, kde by neměly být, nebo v nedostatečném množství, může to vést k neúčinnosti aplikace nebo k nechtěnému znečištění životního prostředí.

Existuje také několik dalších opatření, která mohou být přijata pro snížení rizik spojených s herbicidním použitím. Zemědělci a správci půdy by měli být dobře informováni o bezpečném používání herbicidů a měli by dodržovat správné postupy pro skladování a aplikaci těchto chemikálií. Kromě toho by měli zvažovat použití alternativních metod pro kontrolu plevelů, jako jsou mechanické nebo biologické metody. Tyto alternativy mohou být méně agresivní k životnímu prostředí a mohou být účinné pro kontrolu plevelů v některých situacích. Celkově je sledování herbicidního použití důležitým krokem k ochraně životního prostředí a zajištění bezpečnosti a účinnosti použití herbicidů (Caseley et al., 2013).

3.11.6. Testování klíčivosti semen

Testování klíčivosti semen je jednoduchá a rychlá metoda pro testování herbicidní rezistence, která umožňuje odhadnout citlivost rostliny na různé koncentrace herbicidů. Tato metoda se používá nejen pro zjištění herbicidní rezistence, ale také pro hodnocení kvality semen a vlivu různých faktorů na klíčivost.

Pro testování klíčivosti semen se používají sterilní petriho misky, které jsou naplněny agarovým médiem obohaceným o různé koncentrace herbicidů. Semena se následně umístí na povrch agarového média. Je důležité zajistit, aby semena byla umístěna rovnoměrně a na správnou hloubku (Caseley et al., 2013).

Po umístění semen se petriho misky uzavřou a umístí se do vhodného prostředí pro klíčení. Teplota a světelné podmínky se volí podle požadavků dané rostliny. Následně se sleduje průběh klíčení semen a zaznamenává se, jak rychle a v jakém množství semena klíčí.

Výsledky testování klíčivosti semen mohou být ovlivněny mnoha faktory, jako jsou teplota, světelné podmínky, vodní režim a kvalita semen. Je důležité zajistit standardizované podmínky, aby bylo možné srovnávat výsledky z různých testů.

Tato metoda se často používá jako první screeningový test pro odhad herbicidní rezistence. Pokud se při této metodě zjistí, že jsou rostliny rezistentní, mohou být použity další metody testování pro potvrzení rezistence a pro detailnější analýzu (Caseley et al., 2013).

3.11.7. Testování enzymové aktivity

Testování enzymové aktivity se používá k posouzení účinnosti herbicidů a jejich vlivu na enzymy v rostlinách. Enzymy jsou speciální proteiny, které katalyzují chemické reakce v buňkách a tkáních rostlin. Herbicidy mohou ovlivnit enzymovou aktivitu a způsobit poruchy v metabolismu rostlin, což může vést k jejich úhynu (Matzrafi, 2014).

Testování enzymové aktivity obvykle zahrnuje izolaci enzymů z rostlin a následnou analýzu jejich aktivity pomocí různých biochemických a analytických metod. V průběhu testování se mohou měřit různé parametry, jako je rychlost enzymatické reakce, substrátová specifita nebo citlivost enzymů na inhibitory.

Pro testování enzymové aktivity se používají různé typy enzymů, v závislosti na druhu rostlin a herbicidu, který se má testovat. Například pro testování účinnosti herbicidů na rostlinách s C4 metabolismem se obvykle používají enzymy jako pyruvátfosfát dikináza (PPDK) nebo ribulóza-1,5bisfosfát karboxyláza/oxygenáza (RuBisCO) (Matzrafi, 2014; Caseley et al., 2013).

Testování enzymové aktivity je důležitou metodou pro posouzení účinnosti herbicidů a identifikaci mechanismů, kterými herbicidy působí na rostliny. Tyto informace jsou důležité pro vývoj nových herbicidů a pro prevenci vzniku rezistence rostlin na herbicidy (Matzrafi, 2014).

3.11.8. Testování v terénu

Testování herbicidní rezistence v terénu se používá k zjištění, zda jsou populace rostlin rezistentní na používaný herbicid. Tato metoda testování se provádí na polních kulturách a na úrovni polních porostů. Zemědělci a výzkumníci používají tuto metodu k určení úrovně rezistence rostlin na herbicidy a k přizpůsobení svých zemědělských postupů. Testování herbicidní rezistence v terénu se obvykle provádí na menších plochách, aby se minimalizovalo riziko šíření rezistentních rostlin do okolních oblastí (Caseley et al., 2013).

Testování výskytu rezistence se provádí tak, že se odebere vzorek rostlin z pole a laboratorně se zjistí, zda jsou rezistentní na používaný herbicid. Tyto testy se používají k identifikaci oblastí, kde se vyskytují rezistentní populace rostlin, což umožňuje zemědělcům a výzkumníkům přizpůsobit své postupy a vyhnout se vzniku dalších rezistentních populací.

Testování účinnosti herbicidů se provádí tak, že se ošetří určitá oblast herbicidy a pozoruje se, jak se rostliny chovají. Pokud se vyskytnou rezistentní rostliny, není herbicid účinný a je třeba najít nový herbicid nebo změnit zemědělské postupy (Caseley et al., 2013).

Testování herbicidní rezistence v terénu je důležitým nástrojem pro zajištění účinnosti herbicidů a prevenci vzniku rezistentních populací rostlin. Správné používání herbicidů a prevence vzniku rezistence jsou důležité pro udržení produktivity a zajištění dostatečného zásobování potravinami pro rostoucí světovou populaci (Caseley et al., 2013).

3.12. Ekonomické dopady rezistence

Plevelé konkurují zemědělským plodinám o vodu, živiny a sluneční světlo, což snižuje výnosy zemědělských plodin. Některé druhy plevelů mohou také vytvářet toxiny nebo narušovat růst zemědělských plodin, což může dále snižovat výnosy.

Herbicidní rezistence může mít vážné ekonomické dopady na zemědělství a celou společnost. Zemědělci se musí vypořádat s rostoucími náklady na ochranu a náklady na alternativní způsoby kontrolních postupů, když se běžné herbicidy stávají méně účinnými.

Herbicidní rezistence může vést k snížení výnosů zemědělských plodin. Pokud se běžné herbicidy stávají méně účinnými, rostou rizika výskytu plevelů, které mohou snižovat množství a kvalitu zemědělských plodin.

Zemědělci se musí snažit kontrolovat šíření herbicidní rezistence a zároveň hledat nové způsoby kontrolních postupů, aby minimalizovali ztráty způsobené plevely. To může zahrnovat kombinaci různých herbicidů, rotaci plodin nebo mechanické odstraňování plevelů (Panell et al., 2016).

Celkově lze říci, že snížení výnosů zemědělských plodin způsobené herbicidní rezistencí může mít vliv na celou potravinovou produkci a dodávky potravin. To může mít dopad na spotřebitele, kteří se mohou setkat s omezenou nabídkou a vyššími cenami potravin.

Zvýšené náklady mohou spočívat v použití nových herbicidů, které jsou účinnější proti herbicidní rezistenci, nebo v kombinaci různých herbicidů, které jsou méně náchylné k vývoji rezistence. Mohou to být také náklady na nové technologie pro kontrolu plevelů, jako jsou například roboti nebo drony, které mohou pomoci přesně aplikovat herbicidy na postižené oblasti a minimalizovat tak jejich spotřebu.

Zemědělci se také mohou rozhodnout pro alternativní způsoby kontroly plevelů, jako je mechanické odstraňování nebo rotační oseední plán. Tyto postupy však mohou být nákladnější než použití herbicidů (Panell et al., 2016).

Výroba a distribuce herbicidů jsou nákladné procesy, a také používání více herbicidů může zvýšit náklady na ošetření plodin. To může vést k výraznému zvýšení nákladů na zemědělskou produkci a může snižovat ziskovost zemědělců.

Náklady na použití více herbicidů také mohou vést ke zvýšení cen zemědělských produktů pro spotřebitele. Pokud se náklady na výrobu zemědělských plodin zvýší, zemědělci mohou být nuceni zvýšit ceny, aby pokryli své náklady a udrželi si své zisky.

Celkově lze říci, že potřeba používat více herbicidů kvůli herbicidní rezistenci může mít negativní dopad na ziskovost zemědělců a na konečné ceny pro spotřebitele. Je důležité hledat alternativní způsoby kontroly plevelů, aby se minimalizovala potřeba používat více herbicidů a snížily se tak náklady na výrobu zemědělských plodin.

Herbicidní rezistence může také vést k omezení výběru herbicidů pro kontrolu plevelů. Pokud se plevele stávají rezistentními vůči běžně používaným herbicidům, mohou být zemědělci nuceni používat herbicidy s jiným způsobem působení nebo s jinými aktivními složkami (Panell et al., 2016).

Výběr nových herbicidů může být omezený kvůli regulatorním omezením, což může znamenat, že nové herbicidy nejsou k dispozici v dostatečném množství nebo jsou nákladnější. V některých zemích mohou být určité herbicidy zakázány kvůli obavám o životní prostředí a zdraví, což může vést k ještě většímu omezení výběru.

Ekonomika rezistence plevelů zvažuje, zda by zemědělci měli investovat do preventivních opatření, nebo zda by měli zvládnout rezistentní populace plevelů, když se na jejich polích objeví. Ekonomické studie ukázaly, že je optimální odložit vznik rezistence vůči herbicidům pouze tehdy, pokud dodatečné náklady na preventivní strategii nejsou příliš

vysoké ve srovnání s náklady na strategii bez prevence, náklady na vznik rezistence jsou vysoké a pravděpodobnost vzniku rezistence je vysoká. Ekonomických studií na toto téma v kontextu evropského zemědělství bylo provedeno méně, ale jedna studie v Anglii ukázala, že náklady na rezistenci jsou přibližně 180 GBP na hektar, zatímco náklady na konkrétní strategii oddálení rezistence byly odhadnuty na přibližně 91 GBP na hektar. Alternativní metody regulace plevelů, jako jsou operace kultivace půdy a používání konkurenceschopných odrůd, mají rozporuplné účinky a jsou v průměru méně účinné při snižování hustoty plevelů než herbicidy. Informovanost zemědělců o problematice rezistence vůči herbicidům je zásadní, ale nedávný průzkum mezi dánskými zemědělci ukázal, že ačkoli o problému vědí, mají problém rozlišit herbicidy s různými způsoby účinku. Nedávná studie simulovala ekonomické a environmentální dopady přijetí GMHT kukuřice v EU a zjistila, že velká většina zemědělců v EU by tuto technologii přijala, pokud by nebyla vyžadována strategie proti rezistenci. V případě přítomnosti rezistence vůči herbicidům by se potenciální přijetí výrazně snížilo, ale technologie by byla stále atraktivní pro velkou část zemědělců. Zavedení technologie GMHT v EU by mělo být doprovázeno odpovídajícími pokyny pro řízení, aby se zachovaly její přínosy v dlouhodobém horizontu (Panell et al., 2016).

Herbicidní rezistence způsobuje zemědělcům používajícím chemickou ochranu ekonomické ztráty, ať již přímé (snížením výnosu v důsledku selhání ochrany nebo nutností používání nákladnějších alternativních herbicidů či nechemických metod ochrany), či nepřímé, z důvodu používání preventivních metod a modifikátorů rizika v systému integrované ochrany. Ztráty (nebo vícenáklady) na úrovni podniku se liší podle typu a plevele, mechanismu a intenzity rezistence a také plodiny, ve které se rezistentní plevel vyskytuje a škodí. V obilninách, ve kterých se v ČR vyskytuje nejvíce rezistentních populací plevelů, vznikají při nejběžnějším výskytu rezistence chundelky metlice vůči ALS inhibitorům vícenáklady ve výši 300-800 Kč/ha na použití téměř vždy nákladnějších alternativních herbicidů s jiným mechanismem účinku. Předpokládáme-li, že „ALS rezistencí“ chundelky metlice je v menší či větší míře zasaženo 5 % ploch ozimých obilnin, tj. cca 50 tis. ha, lze celorepublikové podnikové ztráty v důsledku rezistence odhadnout na min. 25 mil. Kč (Soukup a kol., 2020).

3.13. Prevence vzniku rezistence a antirezistentní strategie

Předpokladem pro zavedení a používání antirezistentních strategií je vyhodnocení rizika vzniku rezistence. Používání antirezistentních strategií s sebou nese vícenáklady, ať již z důvodu změn v osevních postupech, způsobech zpracování půdy, či volby nákladnějších přípravků. Uplatňování antirezistentních strategií umožňuje zpomalit vývoj rezistence omezením selekčního tlaku a prodloužit tak životnost přípravku, tj. zachovat jeho použitelnost do budoucna (Soukup a kol., 2021).

Prevence vzniku herbicidní rezistence je klíčová pro udržení účinnosti herbicidů a ochranu zemědělských plodin před konkurenčními plevely. Následující jsou některé z hlavních preventivních opatření:

- a) Omezovat používání herbicidů pouze na doporučené množství výrobcem. Používání vysokých i nízkých dávek herbicidů může výrazně přispět k vzniku herbicidní rezistence.
- b) Používat různé druhy herbicidů. Používání stejného herbicidu opakovaně na stejném místě může vést k vzniku rezistence.
- c) Používat herbicidy s různými mechanismy účinku. Použití herbicidů s různými mechanismy účinku může pomoci minimalizovat riziko vzniku herbicidní rezistence.
- d) Používat kombinované přípravky. Používání herbicidů s různými mechanismy účinku v jednom přípravku může snížit riziko vzniku rezistence.
- e) Dodržovat doporučené postupy pro aplikaci herbicidů. Používání správných dávek, správného času aplikace a správné aplikace techniky může pomoci minimalizovat riziko vzniku herbicidní rezistence.
- f) Použití herbicidů s nižší selektivitou, které mohou být použity jen na určité plodiny a nemají škodlivý vliv na okolní rostliny.
- g) Použití herbicidů v kombinaci s jinými postupy kontroly plevelů, jako je mechanické odstraňování, krycí plodiny nebo biologická kontrola.
- h) Použití geneticky modifikovaných plodin, které jsou odolné vůči herbicidům a umožňují selektivní kontrolu plevelů.

Výrazné omezení rizika a prodloužení životnosti přípravku lze dosáhnout jeho používáním podle zásad integrované ochrany, v kombinaci s preventivními opatřeními a nechemickými metodami ochrany. Za nejúčinnější modifikátory agronomického rizika je

považováno vhodné střídání plodin, které brání shiftu problematických druhů ve společenstvech a brzdí rozvoj rezistence v populaci a rovněž hlubší zpracování půdy, které přispívá k přirozenému úbytku semen v půdní zásobě včetně vyselektovaných rezistentních jedinců, důsledná regulace plevelů v meziporostním období mechanickými zásahy i používáním neselektivních herbicidů a mnoho dalších agronomických zásahů specifických podle specifických místních podmínek a způsobu hospodaření. Paradoxně by měly být preventivní metody – modifikátory rizika využívány více a cíleněji, pokud jsou používány modernější, účinnější, ale z pohledu vzniku rezistence rizikovější herbicidní skupiny, jako jsou inhibitory ALS nebo ACCázy (Soukup a kol., 2020; Upadhyaya & Blackshaws, 2007).

Mezi finančně nenáročné a efektivní metody, jak předcházet herbicidní rezistenci je dodržování zásad správné agronomické praxe. Patří mezi ně používání ideální rozteče řádků, vyvážená výživa, setí v agrotechnických lhůtách. Vyvážený a zdravý porost minimalizuje schopnost plodiny konkurovat plevelům. V žádném případě nesmí dojít k vysemenění rezistentních plevelů do půdní zásoby. Mezi další zásady správné zemědělské praxe patří používání co nejpestřejších osevních postupů. Střídáním plodin zvyšuje flexibilitu při výběru různých postupů zpracování půdy. Díky změnám v obdělávání půdy a herbicidům je pravděpodobnější, že se vyhnete soustavnému upřednostňování stejných druhů plevelů a tím se sníží tlak na selekci rezistence (Mikulka a kol., 2021).

3.14. Management herbicidní rezistence u významných jednoděložných plevelů

Z hospodářského pohledu je v současné době nejčastějším a nejzávažnějším problémem v ČR rezistence plevelných trav vůči inhibitorům ALS. Za jejím rozšířením stojí celá řada příčin, ale především dlouhodobé a nekritické používání oblíbených širokospektrálních herbicidů ze skupiny sulfonylmočovín a triazolopyrimidinů proti chundelce metlici a psárce polní (Soukup a kol., 2021; Harker & O'Donovan, 2013).

3.14.1. Mechanické metody

Aby se zabránilo rozšiřování jednoděložných plevelů, je důležité dodržovat osevní postup a vyhnout se sledu 2-3 ozimých plodin. Klíčení obilky chundelky metlice je nejlepší z vrchních vrstev ornice, takže bezorebné zpracování půdy není příliš vhodné, protože obilky

zůstávají na povrchu půdy a lépe klíčí. Zaklopení obilek hlouběji do půdy zabrání jejich vzcházení a konkurence s pěstovanou plodinou. Kromě toho je účinnou nechemickou metodou ochrany opakované vláčení prutovými nebo síťovými branami v raných růstových fázích chundelky metlice. To pomůže omezit šíření této trávy a chránit pěstované plodiny (Náměstek, 2008; Mikulka, Kneifelová, 2005; Harker & O'Donovan, 2013).

Opakované vláčení podmítek po vzejití plevelů je účinnou metodou, která výrazně omezuje růst jednoletých semenných plevelů. Použití orby umožňuje zaklopit pýr, zatímco podzimní orba může stimulovat klíčení semen a následné zmrznutí. Je důležité dodržovat určitý odstup mezi mechanickými zákroky, jako je smykování, vláčení a plečkování, protože příliš časté zákroky mohou vést ke snižování půdní zásoby semen.

Účinným opatřením, které může významně omezit zaplevelení sveřepem, je kvalitní předseťová příprava půdy. Při té je třeba zajistit, aby všechny vzešlé rostliny sveřepu byly mechanicky potlačeny do takové míry, aby nemohly pokračovat v růstu. Intenzivního zpracování lze dosáhnout např. pomocí vířivých bran nebo jiných aktivních strojů pro předseťovou přípravu půdy. Šíření sveřepů můžeme také významně omezit zařazením jarní plodiny, nejlépe okopaniny (Harker & O'Donovan, 2013; Jabran & Chauhan, 2018).

3.14.2. Chemické metody

Pokud se nejedná o rezistentní populace, je chundelka metlice k mnoha herbicidům citlivá a její regulace je snadná. K dispozici máme široký výběr přípravků s různými mechanismy účinku. V České republice jsou pro regulaci chundelky registrovány mnohé účinné látky z různých chemických skupin herbicidů, přičemž mezi nejpoužívanější patří sulfonylmočoviny ze skupiny inhibitorů ALS, substituované močoviny ze skupiny inhibitorů PS II a dinitroaniliny, které fungují jako inhibitory stavby mikrotubulů. V ozimých obilninách a ozimé řepce jsou pro účinnou regulaci chundelky obzvláště vhodné preemergentní a časně postemergentní aplikace, které obvykle poskytují vysokou účinnost.

Nejúčinnější je provést ošetření proti chundelce metlici již na podzim v co nejnižší růstové fázi, kdy je k herbicidům nejcitlivější. Vysokou a stabilní účinnost má v tomto období např. účinná látka flufenacet (obsažena v herbicidech Battle, Cadou, Cougar Forte, Fence, Defi Evo), která inhibuje dělení buněk v kořenových a růstových meristematických pletivech. Z půdních herbicidů můžeme dále použít prosulfcarb (Boxer, Defi Evo, Roxy), účinnou látku, která blokuje prodlužování řetězců mastných kyselin a je u ní nízké riziko vzniku

rezistence, či pendimethalin (Malibu, Stomp, Trinity) aplikovaný preemergentně. Všechny tyto zmiňované účinné látky lze většinou spolehlivě použít i tam, kde byly potvrzeny výskyty rezistence k inhibitorům ALS, ACCázy či inhibitorům fotosystému II (PSII). Jejich nevýhodou je, že jsou určeny pro použití v podzimním období a je třeba je aplikovat v raných růstových fázích chundelky (Košnarová a kol., 2022; Harker & O'Donovan, 2013).

V lokalitách a na pozemcích, kde se objevila rezistence pouze k inhibitorům ALS, lze na chundelku metlici i psárku polní dosáhnout výborné účinnosti s herbicidem Axial Plus (úč.l. pinoxanen) na bázi inhibitorů ACCázy. Výhodou je, že Axial Plus dobře účinkuje až do počátku sloupkování chundelky metlice a lze jej použít i později na jaře, pokud je zjištěno selhání účinnosti z důvodu rezistence dříve použitého přípravku. Vzhledem k tomu, že pinoxaden je z pohledu vzniku rezistence také poměrně rizikovou látkou, neměl by být používán paušálně ani na ALS rezistentní populace, protože mnohé z nich mají částečně založenou i metabolickou rezistenci, která by s postupem času zasáhla i tuto látku (Soukup a kol., 2021). Za příznivých povětrnostních podmínek vykazují dobrou účinnost také flumioxazin (Sumimax) a beflubutamid (Beflex). Při vysoké intenzitě zaplevelení chundelkou či při horších aplikačních podmínkách, jsou nejvhodnější tank mix kombinace či směsné přípravky, obsahující dvě účinné látky působící na chundelku (Cougar Forte, Legato Plus, Trinity, Bizon). Většinu výše uvedených herbicidů lze použít také preemergentně. Pro dosažení vysoké účinnosti však musí být půda dobře zpracovaná, bez hrud a organických zbytků na povrchu půdy, přičemž především v aridních oblastech nemusí mít tento aplikační termín dostatečnou účinnost (Jursík a kol., 2018; Jabran & Chauhan, 2018).

Psárka polní je v České republice významným plevelem pouze v určitých lokalitách. Nejvíce se vyskytuje v jižních Čechách a prakticky u všech testovaných vzorků z těchto oblastí byla prokázána rezistence alespoň k jedné účinné látce ze skupiny inhibitorů ALS. U několika dalších populací se vyskytovala mnohonásobná rezistence k ALS inhibitorům a pinoxadenu či fenoxapropu nebo k ALS inhibitorům a chlorotoluronu. Poměrně vysoké účinnosti (85 %) u těchto rezistentních populací dosahovaly účinné látky prosulfocarb (inhibitor VLCFA) a diflufenican (inhibitor enzymu fytoendesaturázy – PDS) a je možné je v těchto zasažených oblastech k regulaci psárky doporučit (Košnarová a kol., 2018).

U psárky polní bývá problém v tom, že její populace mívají často metabolicky založenou rezistenci k ALS a ACCase inhibitorům, samotné postemergentní herbicidy nemívají očekávaný efekt a je vhodné jejich účinek posílit na podzim aplikovaným herbicidem Defi Evo s účinnou látkou prosulfocarb. Prosulfocarb patří do skupiny tzv. inhibitorů syntézy lipidů, které jsou považovány za málo rizikové z pohledu vzniku rezistence. Bez ohledu na

širokou nabídku postemergentních herbicidů určených pro aplikaci na jaře, by měly mít prosulfocarb (herbicide Defi Evo nebo Boxer), případně flufenacet své místo mezi sortimentem herbicidů používaných proti plevelným trávám (Soukup a kol., 2021; Harker & O'Donovan 2013; Jabran, & Chauhan, 2018).

Sveřep jalový se nejvíce se vyskytuje na pozemcích, kde se uplatňují minimalizační technologie zpracování půdy, které přispívají k jeho šíření. V poslední době se však začíná objevovat i na polích, kde se oře, ale nepoužívá glyfosát. Ošetření podmítka glyfosátem je vysoce efektivní a výrazně snižuje zaplevelení následně zaseté ozimé obilniny sveřepem. Nejvíce používané herbicidy k regulaci sveřepu jsou přípravky obsahující účinné látky propoxycarbazon, pyroxsulam, mesosulfuron a sulfosulfuron. Všechny tyto účinné látky však patří do skupiny inhibitorů acetolaktátsyntázy (ALS) a v České republice již byla u několika populací sveřepu jalového potvrzena křížová rezistence ke všem těmto uvedeným účinným látkám a objevují se postupně populace další, což velmi komplikuje jeho regulaci. Na podzim je možné sveřep ošetřit účinnou látkou flufenacet (Cadou), nejlépe v kombinaci s diflufenicanem a beflubutamidem. Tyto půdní herbicidy však vyžadují ke spolehlivé účinnosti dostatek srážek a také aplikaci v rané růstové fázi. Ošetření flufenacetem je třeba provést ihned po vzejití sveřepu (Jabran & Chauhan, 2018; Jabran. & Chauhan, 2018).

4. Závěr

Závěrem lze říci, že řízení herbicidní rezistence u významných jednoděložných plevelů představuje významnou výzvu pro zemědělskou produkci a ochranu životního prostředí. Klíčovým krokem je prevence vzniku rezistence, která by měla být založena na udržování genetické rozmanitosti plevelů, rotaci herbicidů s různým mechanismem účinku, využívání nechemických metod kontroly plevelů a optimalizaci agrotechniky. V případě, že již došlo k výskytu rezistence, je nutné co nejdříve přijmout opatření k minimalizaci jejího šíření a zachování účinnosti dostupných herbicidů. Pro správné řízení herbicidní rezistence je nezbytné spolupracovat na mezinárodní úrovni a aktivně podporovat výzkum v oblasti řízení herbicidní rezistence a rozvoj nových technologií pro kontrolu plevelů.

V práci byly zmíněny nejvýznamnější jednoděložné plevele s herbicidní rezistencí, a to chundelka metlice, psárka polní a sveřep jalový. U těchto plevelů byl popsána mimo jiné biologie, škodlivost a regulace. Práce se dále věnuje problematice herbicidní ochrany a velká část je věnována herbicidní rezistenci, její příčinám, vývoji a jejím hlavním mechanismům. Práce dále rozebrala rezistenci k významným skupinám herbicidů a dále se věnovala monitoringu a testování herbicidní rezistence. Ke konci se práce zabývala ekonomickými dopady herbicidní rezistence, prevencí a antirezistentními strategiemi a velmi důležitým managementem herbicidní rezistence.

5. Zdroje

Beckie H J, Harker K N. 2017. Our top 10 herbicide-resistant weed management practices. *Pest Management Science* 73: 1045–1052.

Beckie H J. 2006. Herbicide-resistant weeds: management tactics and practices. *Weed Technology*, 20(3), 793-814.

Buhler D D. 1998. *Weed biology and management*. Springer Science & Business Media.

Caseley J C, Cussans G W, Atkin R K. 2013: *Herbicide resistance in weeds and crops*, Elsevier

Cobb A H, Reade J P H. 2010. *Herbicides and Plant Physiology*. 2nd edition.

Christoffers M. 1999. Genetic Aspects of Herbicide-Resistant Weed Management. *Weed Technology*, 13(3), 647-652. doi:10.1017/S0890037X00046340

Devine M D, Eberlein C V. 1997. Physiological, biochemical and molecular aspect of herbicide resistance based on altered target sites. In: Roe, R.M., Buton, J.D., Kuhr, R.J. (eds): *Herbicide activity. Toxicology, Biochemistry and Molecular Biology*, IOS Press, Amsterdam.

Devine M D, Shukla A. 2000. Altered target sites as a mechanism of herbicide resistance. *Crop Protection*, 19, str. 881-889, 2000.

Délye C, Délos M. 2013. ABC transporters and weed resistance to herbicides. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(9), 6314-6329.

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

Gressel J. 2002. *Molecular biology of weed control*. CRC press.

- Grossmann K. 2010. Mode of Action of Herbicides. In *Herbicides and Environment* (pp. 29-63). Springer, Dordrecht.
- Hall L M, Beckie H J, Wolf T M. 1999 (reprinted 2014). *How herbicides work: Biology to Application*, Edmonton, Alberta: Alberta Agriculture, Food, and Rural Development, Publishing Branch, ISBN 0-7732-6131-1.
- Hamouzová K, Košnarová P, Soukup J. 2021. *Herbicidní rezistence: vývoj, prevence a management*, Syngenta, katedra agroekologie a rostlinné produkce ČZU v Praze.
- Harker K, O'Donovan J. 2013. Recent Weed Control, Weed Management, and Integrated Weed Management. *Weed Technology*, 27(1), 1-11. doi:10.1614/WT-D-12-00109.1
- Heap I. 2014. Global Perspective of Herbicide-Resistant Weeds. *Pest management science*. 70. 10.1002/ps.3696.
- Heap, I. 2008. [obrázek 4] International survey of herbicide-resistant weeds—survey results and criteria to add cases. In *Proceedings of the 16th Australian Weeds Conference. Brisbane: Queensland Weeds Society*. <http://www.caws.org.au/awc/2008/awc200810681.pdf>.
- Heap I. 2021. The international survey of herbicide resistant weeds. Online. (<https://www.weedscience.org>)
- Holec J a kol. 2015. Přehled vývoje rezistence rostlin k herbicidům. *Úroda*, 63(12), 38-44.
- Jabran K, Chauhan B. 2018. *Non-Chemical Weed Control*, Academic Press
- Jursík M, Holec J, Náměstek J. 2007. Chundelka metlice (*Apera spica-venti* (L.) P.B., Listy cukrovarnické a řepařské 126, č. 9-10, str. 276-280.
- Jursík M, Holec J, Hamouz P, Soukup J. 2011. *Plevelé: biologie a regulace*. Vyd. 1. České Budějovice: Kurent, 232 s. ISBN 978-80-87111-27-7.
- Kohout V. 1993. *Regulace zaplevelení polí*. Praha, Institut výchovy a vzdělávání

Kohout V. 1997. Plevelle polí a zahrad, Agrospoj, Praha 7-9, 26-33 s.

Kohout V a kol. 1996. Herbologie – plevelle a jejich regulace. Praha, ČZU, 115 s. ISBN 80-213-0308-5

Košnarová P, Soukup J, Hamouzová K, Hamouz P, Jursík, M. 2018. Současný stav herbicidní rezistence u travovitých plevelů v ČR, Česká zemědělská univerzita v Praze. Available from <https://uroda.cz/soucasny-stav-herbicidni-rezistence-u-travovitych-plevelu-v-cr/> (Accessed April 2018).

Košnarová P, Soukup J, Hamouzová K, Hamouz P, Jursík M. 2018. <https://uroda.cz/nepodcenujme-rezistenci-plevelu/>, Česká zemědělská univerzita v Praze. Available from <https://uroda.cz/nepodcenujme-rezistenci-plevelu/> (Accessed April 2022).

Liu T, Li J, Liu Z, Li M. 2019. Overview of Selective Herbicides for Weed Management in Agricultural Production. In Weed Biology and Control (pp. 203-222). Springer, Cham.

Mallik M A B, Senb S. 2018. Herbicides: Properties, Synthesis and Control of Weeds. In Advances in Plant Breeding Strategies: Agronomic, Abiotic and Biotic Stress Traits (pp. 127-174). Springer, Singapore.

Matzrafi M, Gadri Y, Frenkel E, Rubin B, Peleg Z. 2014. Evolution of herbicide resistance mechanisms in grass weeds, Plant Science, Volume 229, Pages 43-52, ISSN 0168-9452,

Mikulka J a kol. 1999. Plevelné rostliny polí, luk a zahrad. Praha, FarmářZemědělské listy, 160 s. ISBN 80-902413-2-8

Mikulka J, Chodová D, Martinková Z. 2015: Plevelle a jejich regulace.

Mikulka J, Kneifelová M a kol. 2005. Plevelné rostliny. Praha, Profi Press, 148 s. ISBN 80-86726-02-9

Mikulka J, Štrobach J. 2020. Biologie a regulace jednoděložných plevelů. ISBN: 978-80-7427-341-4

Mikulka J, Štrobach J. 2021 Jednoleté trávy v obilninách – rostoucí význam rezistence vůči herbicidům. Available from: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/ochrana-rostlin-a-pestovani/plevele/jednolete-travy-v-obilninach-rostouci-vyznam-rezistence-vuci-herbicidum>.

Monaco T J, Weller S C, Ashton F M. 2002. Weed Science: Principles and Practices (4th ed.). New York: Wiley.

Möllerová J. 2009. BOTANY.cz: Sveřep jalový [online]. O. s. Přírodovědná společnost, BOTANY.cz, [cit. 2020-04-05]. Available from <https://botany.cz/cs/bromus-sterilis/> .

Nandula V. 2010. Glyphosate Resistance in Crops and Weeds: History, Development, and Management. 10.1002/9780470634394.

Nováková K, Soukup J, Hamouz P, Náměstek J. 2005. Chundelka metlice (*Apera spica-venti* (L.) Beauv.) - Regulace výskytu v polních plodinách. Rostlinolékař, 5, str. 24-26.

Náměstek J. 2008. Biologie a geografické rozšíření chundelky metlice (*Apera spicaventi* ((L.) P.B.) v ČR a studium její senzitivity k vybraným herbicidům. Disertační práce, Katedra agroekologie a biometeorologie, ČZU Praha.

Pannell D, Tillie P, Rodríguez-Cerezo E, Ervin D, Frisvold G. 2016. Herbicide resistance: Economic and environmental challenges. *AgBioForum*. 19. 136-155.

Pfister K, Arntzen C J. 1979. The Mode of Action of Photosystem II-Specific Inhibitors in Herbicide-Resistant Weed Biotypes, *Zeitschrift für Naturforschung C*, vol. 34, no. 11, pp. 996-1009.

Polívka F. 1902. [obrázek 1-3] Názorná květena zemí koruny české, svazek 4. Available from <https://botanika.wendys.cz/kvetena/index.php3>

Powles S B. 2008. Evolved glyphosate-resistant weeds around the world: lessons to be learnt. *Pest Manag Sci.*;64(4):360-5. doi: 10.1002/ps.1525. PMID: 18273881.

Powles S B, Yu Q. 2010. Evolution in action: plants resistant to herbicides. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 317-347.

Price A. 2013. *Herbicides - Advances in Research*, InTech, ch. 4 & 12, ISBN: 978-953-51-0883-7

Hartzler R G, Owen M D K. 2015. Herbicide-resistant crops and weed resistance to herbicides, *Pest Management Science*, Vol. 71, No. 2, pp. 139-146.

Mesnage R, Zaller J. (2021). *Herbicides, Chemistry, Efficacy, Toxicology, and Environmental Impacts*, eBook ISBN: 9780128236758

Soukup J, Košnarová P, Hamouzová K, Hamouz P, Jursík M. 2020. Monitoring herbicidní rezistence a antirezistentní strategie, Česká zemědělská univerzita v Praze

Naranjo S E, Ellsworth P C, Nichols R W. 2015. Precision Pest Management-A Growing Role for Technology in Crop Protection, *Annual Review of Entomology*, Vol. 60, pp. 415-432.

Tharayil-Santhakumar N. 2003. Mechanism of Herbicide Resistance in Weeds. WeedScience.org.

Gaines T A, Duke S O, Morran S, Rigon C A G, Tranel P J, KÄLpper A, Dayan F E. (2020). Mechanisms of evolved herbicide resistance, *Journal of Biological Chemistry*, Volume 295, Issue 30

Upadhyaya M K, Blackshaw R E. 2007. *Non-chemical Weed Management: Principles, Concepts and Technology*, CABI

Vaněk O, Prokeš R, Dvořák P, Kučera L. 2018. Technologie aplikace herbicidů na polních kulturách, *Agrochémia*, Vol. 58, No. 4, pp. 112-117.

Venclová B. 2021: Podstata vzniku herbicidní rezistence a jak jí předcházet. Available from <https://uroda.cz/podstata-vzniku-herbicidni-rezistence-a-jak-ji-predchazet/> (Accessed April 2021).

Vila-Aiub M M, Neve P, Powles S B. 2009. Fitness costs associated with evolved herbicide resistance alleles in plants. *New Phytologist*, 184(4), 751-767.

Yu Q, Powles S B. 2014. Resistance to AHAS inhibitor herbicides: current understanding. *Pest Management Science*, 70(9), 1340-1350.

Yu Q, Han H, Cawthray G R, Wang S, Liu X, Powles S B. 2019. Herbicide resistance-endowing ACCase gene mutations in hexaploid wild oat (*Avena fatua*): insights into resistance evolution in a hexaploid species. *Pest Management Science*, 75(1), 46-54.

Zimdahl R L. 2018. *Fundamentals of Weed Science* (5th ed.). Academic Press.