ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů
katedra agroekologie a biometeorologie

Vliv používání herbicidů na druhové složení společenstev plevelů na orné půdě

Influence of herbicide use on composition of weed communities on arable land

.....

doktorská disertační práce

Autor: **Mgr. Markéta Mayerová**

Školitel: **prof. Ing. Josef Soukup, CSc.**

Školitel specialista: **doc. Ing. Jan Mikulka, CSc.**

Praha 2 0 1 8

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci ke státní doktorské zkoušce na téma „Vliv používání herbicidů na druhové složení společenstev plevelů na orné půdě “ vypracovala samostatně s použitím jen pramenů, které cituji a uvádím v přiložené bibliografii.

V Praze dne: 28.8.2018 Podpis:

Poděkování:
Děkuji zejména mému školiteli prof. Ing. Josefu Soukupovi, CSc. za odborné vedení, ochotu a cenné rady. Dále děkuji konzultantovi doc. Ing. Janu Mikulkovi, CSc. a všem pracovníkům pokusných stanic VÚRV, v.v.i. bez jejichž práce by můj výzkum nebyl možný. V neposlední řadě děkuji své rodině za porozumění a podporu během celého studia.

Obsah

Úvod 6
1. Literární přehled 7
1.1 Charakteristika plevelů a jejich klasifikace 7
1.2 Metody regulace zaplevelení 9
1.2.1 Nepřímé a mechanické (nechemické) metody 9
1.2.2 Herbicidní regulace plevelů 9
1.3 Faktory ovlivňující druhové spektrum plevelů na zemědělské půdě 13
1.3.1 Vliv klimatické změny 15
1.3.2 Vliv střídání plodin 16
1.3.3 Vliv zpracování půdy 17
1.3.4 Vliv chemické ochrany 18
1.4 Význam dlouhodobých polních pokusů 21
1.5 Vliv chemické ochrany na tvorbu výnosu 21
1.6 Úloha plevelných druhů pro biodiverzitu agroekosystémů 22
1.7 Hodnocení diverzity rostlinného společenstva 23
1.7.1 Metody hodnocení kvantitativního druhového složení 23
1.7.2 Druhová diverzita a indexy diverzity 24
2. Výzkumné hypotézy a cíl práce 27
3. Publikované práce 28
3.1 Vliv agrotechnických opatření na výnosy plodin v dlouhodobých polních pokusech 30
3.1.1 The influence of mineral fertilisers, farmyard manure, liming and sowing rate on winter wheat grain yileds. 30
3.1.2 Effect of chemical weed control on crop yields in different crop rotations in a long-term field trial 40
3.1.3 Dlouhodobý efekt herbicidního ošetření na výnos v osevních sledech 72
3.2 Changes in weed community composition in a long-term trial with different crop rotations and herbicide treatment 76
3.3 Effects of selective herbicide treatment on weed community in cereal crop rotation86
4. Sumární diskuse 110
5. Závěr 119

6. Seznam použité literatury 121
7. Obrazová příloha 134

Úvod

Plevelová společenstva jsou nedílnou, pro člověka často nežádoucí součástí agrofytocenóz. Přestože negativně ovlivňují plodiny, a to zejména snižováním výnosu a přenosem chorob či škůdců, mají i pozitivní ekologický význam. Jsou součástí koloběhu organických látek a živin v půdě, vytvářejí půdní pokryv zabraňující vysychání půdy, jsou zdrojem potravy pro živočichy, mnohé druhy plevelů jsou využívány jako léčivé rostliny. Je proto žádoucí, aby druhová diverzita plevelových společenstev byla co největší. Druhová pestrost s vyrovnaným zastoupením jednotlivých druhů zároveň vytváří lepší podmínky pro uplatnění přímých metod ochrany. Až do poloviny 20. století byla plevelová společenstva druhově velmi bohatá, jednotlivé druhy konkurovaly nejen kulturním plodinám, ale i sobě navzájem. Druhové spektrum plevelů v daných půdně klimatických podmínkách bylo více méně stabilní a významně se neměnilo. V souvislosti s nástupem intenzifikace zemědělství došlo během relativně krátké doby k významným změnám ve složení plevelových společenstev. Zjednodušování osevních postupů, zejména posun od jarních plodin k plodinám ozimým, podporuje výskyt jednoletých ozimých druhů, jako je např. chundelka metlice, heřmánkovec nevonný a rozrazily. Intenzivní používání herbicidů přispělo ke snížení druhové diverzity, což napomohlo k šíření obtížně regulovatelných, odolných druhů, kterým zmizela konkurence druhů citlivějších k herbicidům. Ke změnám ve společenstvech plevelů přispívá i herbicidní rezistence.

Mnoho studií se zabývá krátkodobým (2-10 letým) vlivem herbicidního ošetření na jednotlivé plevelné druhy v určité plodině. Vzhledem k velkému množství semen plevelů v půdní zásobě nelze v tak krátkodobém horizontu postihnout složení plevelového společenstva komplexně, neboť to se aktuálně mění jednak vlivem průběhu počasí ve sledovaném roce, jednak charakterem právě pěstované plodiny. Pro účely sledování dlouhodobých změn plevelových společenstev se proto velmi dobře hodí dlouhodobé polní pokusy, ve kterých je možné porovnat varianty dlouhodobě neošetřované herbicidy s variantami s různým herbicidním ošetřením.

1. Literární přehled

1.1 Charakteristika plevelů a jejich klasifikace

Plevele jsou synantropní druhy, které se během evolučního vývoje přizpůsobily svým životním cyklem kulturním plodinám. Jedná se zejména o druhy s krátkým životním cyklem (jednoleté) a s ruderální strategií, tzv. R - stratégové (Holzner, 1978; Lososová et Simonová, 2008). Úspěšnost plevelných druhů spočívá především v jejich plasticitě, schopnosti adaptace na změny životního prostředí, ať už se jedná o půdně klimatické změny nebo různé technologie pěstování plodin. Tyto změny ovlivňují např. fyziologii a růst plevelných druhů, jejich životní cyklus, schopnost reprodukce a šíření (Murphy et Lemerle, 2006). Plevele se adaptovaly k životu v agroekosystémech následujícími strategiemi: 1. Genetická variabilita v rámci druhů; 2. Somatický polymorfismus částí rostlin; 3. Časová adaptace v rámci společenstva; 4. Úspěšnost na různorodých lokalitách; 5. Diverzita společenstva na vyšší úrovni než druh (Dekker, 1997).

Plevelné druhy lze řadit do různých taxonomických skupin, ale v rámci těchto skupin stojí vedle sebe druhy se zcela odlišnými ekologickými vlastnostmi. Proto klasifikace plevelů vychází z jejich biologických vlastností, zejména z životního cyklu. Podle toho se plevele dělí do čtyř základních kategorií (Hron et Vodák, 1959; Deyl, 1964; Kohout, 1997; Monaco et al., 2002; Håkansson, 2003; Mikulka et Kneifelová, 2005; Jursík et al., 2011).

I. Plevele jednoleté

Životní cyklus probíhá během jednoho roku nebo za jedno vegetační období, rozmnožování pouze generativní. Podle doby vzcházení a přezimování tyto rostliny dále dělíme:

- Efemérní plevele

  Rostliny s velmi krátkým životním cyklem. Vzcházejí na podzim, v průběhu zimy nebo časně na jaře, svůj vývoj ukončují na jaře. Zaplevelují ozimy a víceleté pícniny, ale vzhledem k drobnému vzrůstu nejsou významnými plevely. Např. *Veronica hederifolia, Arabidopsis thaliana, Erophila verna.*

- Časně jarní plevele

  Klíčí při velmi nízkých teplotách, ale jsou schopny vzcházet i později. Zaplevelují jarní obilniny, luskoviny, okopaniny. Např. *Fallopia convolvulus, Galeopsis tetrahit, Sinapis arvensis*.

- Pozdně jarní plevele

  Vzcházejí při vyšších teplotách nad 10 °C, zaplevelují širokořádkové plodiny (okopaniny, zeleniny, kukuřice). Např. *Chenopodium album, Amaranthus powelii, Echinochloa crus-galli, Persicaria lapathifolia.*

- Ozimé plevele

  Patří sem velká část jednoletých plevelů. Rostliny vzcházejí do zimy, kterou přečkají ve fázi listové růžice. Na jaře pokračují ve vývoji, jejich semena jsou schopna klíčit během celé vegetační sezóny, proto zaplevelují všechny druhy plodin. Mezi nejrozšířenější patří např. *Galium aparine, Apera spica-venti, Tripleurospermum inodorum, Centaurea cyanus.*

II. Plevele dvouleté až víceleté rozmnožující se převážně generativně

V prvním roce rostliny vytvářejí listovou růžici, kterou přezimují. V následujícím roce vykvetou a produkují semena. Dvouleté druhy poté odumírají (*Daucus carota*), ostatní pokračují ve vývoji (*Taraxacum* sect. *Ruderalia, Plantago lanceolata* et *media, Rumex obtusifolius* et *crispus*). Zaplevelují víceleté plodiny a trvalé kultury.

III. Plevele vytrvalé rozmnožující se převážně vegetativně

Podle stanovištních podmínek jsou schopny množit se vegetativně i generativně. Podle hloubky, ve které zakořeňují, se rostliny dále dělí:

- Plevele mělčeji kořenící

  Orgány vegetativního rozmnožování jsou uloženy na povrchu půdy nebo v ornici. Šíření těchto plevelů lze proto potlačovat zpracováním půdy. Z této skupiny jsou nejnebezpečnější plevele s pevnými a tuhými oddenky (*Elytrigia repens*), které mají silnou konkurenční schopnost. Méně významná je skupina s plazivými kořenícími lodyhami (*Potentilla anserina, Ranunculus repens*), plevele s měkkými a křehkými výběžky (*Stachys palustris*) a plevele vytvářející hlízy a cibule (*Lathyrus tuberosus, Bulboschoenus planiculmis*).

- Plevele hlouběji kořenící

  Kořenový systém proniká do hlubokých vrstev půdy až do podorničí, kde vytváří systém vertikálních a horizontálních výběžků. Tyto plevele nelze regulovat zpracováním půdy. Patří sem plevele vytvářející oddenky (*Aegopodium podagraria, Equisetum arvense*) a plevele vytvářející kořenové výběžky (*Cirsium arvense, Sonchus arvensis, Convolvulus arvensis*)

IV. Plevele poloparazitické a parazitické

- Parazitické plevele

  Nezelené rostliny, které jsou zcela závislé na hostitelské rostlině (*Cuscuta trifolii, Orobanche* spp.)

- Poloparazitické plevele

  Zelené rostliny, které se vyživují autotrofně i heterotrofně, od hostitele odebírají vodu a minerální látky (*Melampyrum arvense, Euphrasia officinalis*)

1.2 Metody regulace zaplevelení

Způsoby potlačování plevelů na orné půdě se měnily a vyvíjely spolu s rozvojem poznání a technologickým pokrokem. Až do poloviny 20. století převažovaly metody nepřímé a mechanické, které byly po objevení herbicidních látek zatlačeny do pozadí.

1.2.1 Nepřímé a mechanické (nechemické) metody

Nepřímé metody jsou pracovní postupy, které působí preventivně a měly by vést k redukci zaplevelení. Patří sem čištění osiva, používání čistých statkových hnojiv a zejména vhodné střídaní plodin (osevní postupy) a zpracování půdy (podmítka, orba).

Kultivační zásahy prováděné v průběhu vegetace plodiny označujeme za mechanické metody. Patří sem ruční pletí a okopávka, vláčení a plečkování.

1.2.2 Herbicidní regulace plevelů

Specifické pesticidy užívané pro regulaci plevelů se nazývají herbicidy (MONACO et al., 2002). Tyto chemické látky narušují určitý fyziologický proces v rostlině a tím zabraňují jejímu dalšímu vývoji. Působí většinou jako inhibitory enzymu či skupin enzymů, které katalyzují některou z reakcí při biosyntéze organických sloučenin. Herbicid se váže na určitý protein se specifickým místem účinku („target site“). Takovýchto míst je využíváno relativně málo, 15-20 (Cobb et Kirkwood, 2000). Způsob, jakým herbicid inhibuje určitý biochemický proces v rostlině, nazýváme mechanismus účinku herbicidu. Právě podle místa působení účinné látky a mechanismu účinku byla zavedena standardizovaná klasifikace herbicidů HRAC (Herbicide Resistance Action Committee), která dělí herbicidy na 15 základních skupin (A-P) + nezařaditelné herbicidy (Z) (Cobb et Kirkwood, 2000; Monaco et al., 2002; Jursík et al., 2011; Heap, 2015).

A. Inhibitory acetyl CoA karboxylázy

Acetyl CoA karboxyláza je jeden z enzymů, podílejících se na biosyntéze mastných kyselin, katalyzuje transkarboxylaci acetyl-CoA na malonyl-CoA. Je přítomna v chloroplastech a cytoplazmě buněk dělivých pletiv. Při inhibici tohoto enzymu dochází k porušení tvorby buněčných membrán. Herbicidy z této skupiny působí na široké spektrum jednoletých trávovitých plevelů, ve vyšší dávce i na vytrvalé druhy, např. *Elytrigia repens*. Některé přípravky lze použít jen ve dvouděložných plodinách (*fluazifop* – Fusilade, *propaquizafop* – Garland), jiné i v obilninách (*fenoxaprop* – Puma, *pinoxaden* – Axial).

B. Inhibitory acetolaktát syntázy (ALS inhibitory)

Acetolaktát syntáza katalyzuje biosyntézu esenciálních aminokyselin s rozvětveným řetězcem (valin, leucin, izoleucin). Inhibicí ALS dochází k zastavení tvorby těchto aminokyselin, následně proteinů a dále k inhibici syntézy DNA. To vše v konečném důsledku vede k zastavení buněčného dělení. Herbicidy z této skupiny patří do těchto chemických skupin:

- Sulfonylmočoviny

  Působí na jednoděložné i dvouděložné plevele a jsou vůbec nejpoužívanější herbicidní skupinou, zejména v porostech obilnin a kukuřice. To způsobilo vznik rezistentních populací některých plevelů (např. *Apera spica-venti*).
- Imidazolinony

  Působí na široké spektrum plevelů, používají se v hrachu a pelušce.
- Triazolopyrimidiny

  Časné jarní aplikace v ozimých obilninách proti dvouděložným i jednoděložným plevelům.
- Triazolonony

  Např. *thiencarbazone*, který zvyšuje účinnost širokospektrálního přípravku Adengo na trávovité plevele v kukuřici.
- Sulfonylamino carbonyl-triazolinony

  Regulace trávovitých plevelů (*Elytrigia repens*, *Alopecurus myosuroides*) v ozimé pšenici.

C. Inhibitory fotosystému II (PS II inhibitory)

Tyto herbicidy se váží na tzv. D1 (Q_b) transportní protein, čímž zabraňují přenosu elektronů přes tylakoidní membránu chloroplastů ve fotosystému II. Dochází

k zastavení fotosyntézy a růstu rostliny. Do této skupiny patří herbicidy různých chemických skupin. Problematické je užívání triazinů, uracilů a substituovaných močovin, které se vyznačují dlouhou perzistencí v půdě.

- C1 – triaziny, triazinony, uracily, pyridazony, fenylkarbamáty – převažuje zajména kořenový příjem, široké spektrum účinku.
- C2 – substituované močoviny – regulace *Apera spica-venti* a některých dvouděložných plevelů v obilninách (*chlortoluron, isoproturon*), ošetření kukuřice proti dvouděložným plevelům (*terbuthylazine*). Jsou často součástí širokospektrálních herbicidů (např. Maraton).
- C3 – nitrily, fenylpyridaziny, benzothiadizoly – kontaktní herbicidy s účinkem na dvouděložné plevele.

D. Inhibitory fotosystému I (PS I inhibitory)

Zachycují volné elektrony putující řetězcem přenašečů ve fotosystému I., vznikají volné, nestabilní radikály a sledem dalších reakcí nakonec dochází k narušení buněčných membrán. Neselektivní herbicidy (*diquat, paraquat*).

E. Inhibitory syntézy porfyrinů (PPO inhibitory)

Jedná se o herbicidy, které inhibují poslední část syntézy chlorofylů, a to enzymatický systém protoporfyrinogen-oxidázu (PPO). Dochází k peroxidaci lipidů v buněčných membránách a poškození chloroplastů. Jsou to buď kontaktní herbicidy s účinkem na jednoleté a dvouděložné plevele, nebo herbicidy s kombinovaným půdním a listovým příjmem (*bifenox*), které se aplikují preemergentně.

F. Inhibitory syntézy karotenoidů

- F1 – Inhibitory fytoendesaturázy (PDS)

  V důsledku inhibice enzymu fytoendesaturázy dochází k narušení syntézy karotenoidů (mevalonátový cyklus), následné fotooxidaci a rozpadu chlorofylu. Jedná se zejména o půdní herbicidy s preemergentní aplikací.
- F2 – Inhibitory syntézy p-hydroxyfenyl pyruvát dioxygenázy (HPPD inhibitory)

  V důsledku inhibice enzymu HPPD dochází k narušení biosyntézy karotenoidů, porušení chlorofylu a zastavení tvorby asimilátů. Široké spektrum účinku na dvouděložné jednoleté plevele a trávovité plevele především v kukuřici a máku.
- F3 – Inhibitory syntézy diterpenů

  Působí na počátku mevalonátového cyklu, přičemž dochází k narušení syntézy karotenoidů i chlorofylu. Účinek na dvouděložné plevele.

G. Inhibitory 5-enolpyruvylšikimát-3-fosfát syntázy (EPSP) inhibitory

Aromatické aminokyseliny (fenylalanin, tyrosin a tryptofan) vznikají tzv. šikimátovou cestou v chloroplastech zelených rostlin za přítomnosti enzymu EPSP. Patří sem širokospektrální herbicidy s účinnou látkou *glyphosate* a *sulphosate*. Existují významné rozdíly v citlivosti jednotlivých druhů plevelů k účinné látce *glyphosate.* Velmi citlivé jsou např. *Amaranthus* spp. a *Thlaspi arvense*, vyšších dávek je potřeba pro potlačení *Viola arvensis, Cirsium arvense* a *Geranium* spp. Velmi odolný je *Convolvulus arvensis, Equisetum arvense* je tolerantní.

H. Inhibitory glutamin syntetázy (GS)

Glutamin syntetáza je nejdůležitější enzym při zabudování amoniaku do struktury aminokyselin při vzniku glutaminu. Narušením reakce dochází v buňce k hromadění amoniaku, který poškozuje tylakoidní membrány a tím dochází k rozpadu chloroplastů. Účinná látka *glufosinate* je neselektivní herbicid přijímaný jen listy.

I. Inhibitory dihydropterát syntázy (DHP)

J. Neexistuje

K. K1 - Inhibitory stavby mikrotubulů

Herbicidy, které inhibují polymeraci jednotek tubulinu, vytváření mikrofilament a mikrotubulů nezbytných pro stavbu mitotického vřeténka při konečné fázi mitózy. Dochází k narušení zejména dělivých pletiv, jejich účinek je proto nejefektivnější v raných fázích vývoje. Díky působení na více místech buňky se předpokládá nízké riziko vzniku rezistence. Patří sem jedny z nejstarších herbicidů - dinitroaniliny (nitroderiváty anilinu).

K2 – inhibitory mitozy

Patří sem chemická skupina karbamáty, které inhibují buněčné dělení.

K3 – Inhibitory syntézy mastných kyselin s dlouhým řetězcem (VLCFA)

Narušují syntézu mastných kyselin s dlouhým řetězcem a tím i syntézu lipidů, vosků a kutinu. Působí zejména na klíčící jednoděložné i dvouděložné plevele, používají se tedy preemergentně. Jedná se o látky z chemické skupiny acetamidů.

L. Inhibitory syntézy celulózy

Chemické látky ze skupiny nitrilů a benzamidů, které inhibují biosyntézu buněčné stěny.

M. *„uncoupling“* Narušení membrány

Dinitrofenoly inhibují proces oxidativní fosforylace, což vede k narušení membrány a následnému odumírání.

N. Inhibitory prodlužování řetězců mastných kyselin

Herbicidy této skupiny inhibují multienzymový komplex acyl-CoA elongasu, čímž je přerušena syntéza dlouhých řetězců mastných kyselin, následně vosku, kutinu a suberinu. Regulace dvouděložných i trávovitých plevelů.

O. Syntetické auxiny (regulátory růstu)

Mechanismus účinku těchto herbicidů je podobný jako u rostlinných růstových hormonů. V důsledku aplikace syntetických auxinů dochází k narušení fytohormonální hladiny rostliny, což způsobuje poruchy metabolismu a růstu rostliny. Jsou přijímány listy, rozváděny floémem a velmi špatně rostlinou odbourávány. Používají se zejména k regulaci dvouděložných plevelů v obilninách a kukuřici. Účinné látky pocházejí ze čtyř chemických skupin:

- Fenoxykyseliny – *2,4-D, MCPA, MCPB*
- Benzoové kyseliny – *dicamba*
- Piridin-karboxylové kyseliny – *picloram, clopyralid, fluroxypyr*
- Quinolin-karboxylové kyseliny – *quinmerac*

1.3 Faktory ovlivňující druhové spektrum plevelů na zemědělské půdě

Změny ve složení společenstev plevelů jsou výsledkem komplexu interakcí faktorů životního prostředí (např. půdní a klimatické podmínky, nadmořská výška) a agrotechnických postupů (výběr zemědělských plodin, zpracování půdy, hnojení, metody regulace zaplevelení) (LÉGÈRE et al., 2005; PYŠEK et al., 2005). Díky vícečetným interakcím mezi agrotechnikou, biotickými a abiotickými faktory zahrnujícími i změny počasí v daném období, je v globálním měřítku často těžké vybrat konkrétní faktor či faktory, které ovlivnily změnu v zastoupení určitého druhu či druhů v čase a prostoru. Naopak v měřítku menším, jako je např. pole nebo louka, lze posuny ve složení populací plevelů způsobené změnami zemědělské praxe vysledovat (Håkansson, 2003; Murphy et Lemerle, 2006). Přestože některé fytocenologické průzkumy naznačují, že environmentální faktory mají větší vliv na složení plevelových společenstev než agrotechnika (Pinke et al., 2012), jiní autoři přikládají větší význam typu plodiny, neboť složení plevelového společenstva je ovlivňováno agrotechnikou včetně metod

regulace plevelů, která je specifická pro různé typy plodin (Fried et al., 2008; Lososová et Cimalová, 2009; Nowak, et al. 2015).

Druhovými změnami plevelových společenstev v měřítku jednotlivých států se zabývalo mnoho autorů. Velmi dobře jsou zmapovány změny v severských státech (Håkansson, 2003; Salonen et al., 2012). Např. na finských polích sledovali Hyvönen et al. (2003) změny v zastoupení plevelů v jarních obilninách v letech 1982-1999, kde významně stouplo zastoupení druhů *Chenopodium album, Galium spurium* a *Cirsium arvense*. V Dánsku proběhlo hodnocení změn plevelových společenstev během posledních 50 let (Andreasen et Stryhn, 2008; Andreasen et Streibig, 2010), stejně tak ve Velké Británii (Potts et al., 2010; Marshall et al., 2003). Cirujeda et al. (2011) se zabývali dlouhodobými změnami ve Španělsku, kde došlo k významnému posunu od dvouděložných druhů k trávovitým plevelům a celkovému poklesu průměrného počtu druhů na všech polích. Nárůst výskytu trávovitých plevelů rezistentních k herbicidům zaznamenali také Šilc et Čarni (2005) na slovinských polích, kde zároveň došlo k ústupu efemerních a basofilních druhů. Keller et al. (2014) sledovali změny na německých polích s kukuřicí v letech 1981-2011. Vlivem převažujícího pěstování kukuřice a intenzivního používání herbicidů zde došlo k posunu směrem k termofilním a jednoletým, pozdně jarním druhům a zároveň k dominanci problematických druhů (*Echinochloa crus-galli, Chenopodium album*). Storkey et al. (2010) sledovali dlouhodobý vliv intenzifikace zemědělství na posun v druhovém složení plevelových společenstev na polích Velké Británie. Hnojení dusíkem a herbicidní aplikace měly negativní vliv na vzácné druhy s těmito vlastnostmi: nízký vzrůst, velká semena, pozdní kvetení. Naopak abundance obvyklých, běžných druhů zůstala na stejné nebo i vyšší úrovni.

O situaci v České republice vypovídá např. práce Lososové et Simonové (2008), která hodnotí změny druhového složení synantropní vegetace. V plevelových a ruderálních společenstvech stoupla od počátku 20. století průměrná početnost neofytů na úkor archeofytů a původních druhů. Na počátku 20. století převládaly CR - stratégové, v roce 2005 C - stratégové. Cimalová et Lososová (2009) hodnotí vliv přírodních podmínek (nadmořská výška, teplota, srážky a pH půdy) spolu s agrotechnikou na druhové složení polních plevelů. Potvrzují hypotézu, že v rámci regionálního stupně je význam plodiny a zvolené agrotechniky důležitější než klimatické podmínky. Pokud hodnotíme složení společenstva z globálního pohledu, pak klimatické a edafické faktory jsou významnější než vliv plodiny (Lososová et al., 2004). Naopak Šilc (2008) ve své studii diverzity plevelových populací na Slovinsku v letech 1937-2004 zdůrazňuje hlavní význam faktoru polní plodiny. To lze vysvětlit jižnější

polohou Slovinska, protože význam faktoru plodiny stoupá s gradientem sever-jih (Holzner, 1978). Významný vliv způsobu hospodaření a nadmořské výšky na druhovou diverzitu plevelů potvrzují také Kolářová et al. (2013). K zajímavému zjištění došli Pyšek et al. (2005), kteří srovnali druhové složení plevelů v letech 1955-2000 na stanovištích s různou nadmořskou výškou (mírný až chladný region versus teplý region). Na počátku studie byla druhově bohatší pole, která spadala do chladnějšího regionu, ale na konci studie zde druhová diverzita významně poklesla. Mohlo to být způsobeno tím, že ve vyšších nadmořských výškách došlo k intenzifikaci zemědělství až během sledovaného období, a proto zde došlo ke snížení počtu druhů až později. Vybrané plochy v řepařské výrobní oblasti České republiky hodnotili Tyšer et al. (2009). S odstupem 30 let byl zaznamenán významný pokles pokryvnosti plevelů o 85 % a významné změny ve složení agrofytocenóz. Zejména ústup množství druhů (např. *Raphanus raphanistrum, Arabidopsis thaliana, Aphanes arvensis, Neslia paniculata*) a nástup druhů jako *Apera spica-venti a Echinochloa crus-galli.* Změnami v zastoupení vytrvalých plevelů se zabývali také Mikulka et al. (2009). V polovině 90. let 20. století byl zjištěn vysoký nárůst výskytu druhů *Cirsium arvense, Elytrigia repens, Artemisia vulgaris.* Autoři tento nárůst přičítají změnám v osevních postupech, vysokému podílu obilnin a řepky a zejména minimalizačním technologiím zpracování půdy. V souvislosti s minimalizačními technologiemi v České republice uvádějí také nárůst druhů *Bolboschoenus laticarpus* a *Bolboschoenus planiculmis*, které se v minulosti na českých polích vyskytovaly minimálně.

1.3.1 **Vliv klimatické změny**

Během celé historie Země dochází k méně či více zásadním klimatickým změnám, v posledním 50-100 letech i výraznějším vlivem lidské činnosti. Tyto změny se projevují na druhovém složení rostlinných společenstev, tedy i na zastoupení plevelových druhů na různých stanovištích. Významu klimatické změny se věnuje množství prací, např. Andreasen et al. (1996), Pyšek et al. (2005), Šilc et Čarni (2005), Lososová et Simonová (2008). Většina prací udává zvýšení zastoupení termofilních druhů v chladnějších oblastech střední a severní Evropy a zároveň šíření některých teplomilných plevelů z nížin až do podhorských oblastí, například *Echinochloa crus-galli, Amaranthus retroflexus* et *powelii, Setaria viridis* a další. Zvýšením průměrné teploty vysvětlují Ziska et Runion (2007) posuv plevelového spektra směrem k C4 rostlinám. To potvrzuje také práce Satrapové et al. (2013), která sleduje schopnost šíření C4 rostlin (*Echinochloa crus-galli* a *Amaranthus retroflexus*) do vyšších nadmořských výšek České republiky v souvislosti se zvýšením teploty v těchto oblastech. Lze

tedy očekávat zvýšení výskytu těchto druhů v obilnářské a bramborářské výrobní oblasti (Satrapová et Soukup, 2014). Výše uvedené skutečnosti přispívají k šíření invazivních druhů v České republice (Jehlík, 1998; Holec et al., 2004).

1.3.2 **Vliv střídání plodin**

Střídání plodin bylo po dlouhou dobu jednou z hlavních metod regulace plevelů na orné půdě (Freyer et Makepeace, 1977; Fisjunov, 1984; Mikulka et Kneifelová, 2005). Díky vzájemné kompetici plodin a plevelných druhů bylo vhodným střídáním plodin s různým charakterem (ozimy, jařiny, okopaniny, víceleté plodiny) docíleno víceméně vyrovnaného zastoupení plevelných druhů (Lemerle et al., 2001; Håkansson, 2003). Osevní postupy, které zahrnují rostliny s odlišným životním cyklem, přinášejí větší diverzitu plevelových společenstev s menším množstvím dominantních a obtížných druhů (Cardina et al., 1998) a snižují množství semen plevelů v půdní bance semen (Koocheki et al., 2009). Jakékoliv narušení této rovnováhy vede k dominanci určitých druhů plevelů. Např. v obilninách pěstovaných několik let po sobě dominují trávovité plevele (Blackshaw, 1994; Blackshaw et al., 2001; Koocheki et al., 2009), širokolisté plevele mají naopak tendenci šířit se v hrachu (Lemerle et Murphy, 2000). Lejins et Lejina (2007) zjistili 7,4 krát větší zastoupení vytrvalých plevelů (zejm. *Elytrigia repens*) v osevních systémech s vysokým podílem obilnin v porovnání se střídavými systémy. Trendem posledních let v zemědělství mírného pásma je zjednodušování osevních postupů, zejména posun od jarních či víceletých plodin k ozimým jednoletým plodinám, což má za následek ústup jarních plevelných druhů a rozvoj druhů jednoletých ozimých, jako např. *Apera spica-venti*, *Tripleurospermum inodorum*, *Veronica persica* a *Viola arvensis*. Pokles pěstování žita a lnu významně snížil výskyt druhů vázaných na tyto plodiny, např. *Cuscuta epilinum*, *Silene linicola*, *Lolium remotum* nebo *Bromus secalinus* (Barrett et al., 1983). Dodržování správného střídání plodin je jedním z hlavních nástrojů potlačování plevelů i v ekologickém zemědělství, kde není povoleno používat herbicidy. Zařazení víceletých pícnin do osevního postupu s jednoletými plodinami tak vede k narušení vývoje plevelových společenstev a redukci zaplevelení i v systému ekologického hospodaření (Anderson, 2010). Význam osevních postupů při potlačování plevelů dokládá také práce Bellindera et al. (2004), která se zabývá vlivem osevních postupů na půdní zásobu semen plevelů. Na konci dvouletého experimentu se ukázalo, že u všech osevních postupů sice došlo ke zvýšení množství semen v půdě i ke zvýšení diverzity, ale toto navýšení bylo nejnižší jednak u osevního postupu s kukuřicí a jednak u osevního postupu s vojtěškou a jetelem. Přestože u kukuřice byly použity

preemergentní i postemergentní herbicidy, množství semen plevelů bylo srovnatelné s luskovinami, kde nebyly použity ani herbicidy, ani orba. Luskoviny mají zřejmě schopnost potlačit plevele pomocí kompetice a alelopatie.

Často dochází k vlivu interakcí osevních postupů s dalšími faktory, zejména se způsobem zpracování půdy a herbicidním ošetřením. Např. hustota zaplevelení monokultury pšenice se zvyšuje použitím mělkého zpracování půdy (10-12cm) v porovnání s konvenční orbou až o 76 % a u dvouletého osevního postupu řepka ozimá-pšenice ozimá dokonce o 187 % (Seibutis et Feiza, 2008). Studie dlouhodobého vlivu různých faktorů na dynamiku plevelů ukazuje na vyšší vliv střídání plodin než technologie zpracování půdy (Derksen et al., 1996). Kombinací efektu osevních postupů, různých technologií zpracování půdy a herbicidní aplikace na vývoj plevelových společenstev se zabývá práce Streita et al. (2003), který zjistil významně větší vliv plodiny a doby aplikace herbicidu (preemergentní a postemergentní) než technologie zpracování půdy. Naopak Demjanová et al. (2008) uvádějí v kukuřici větší vliv zpracování půdy na druhové složení plevelů než vliv předplodiny. Poznání výše uvedených interakcí je důležité při hledání reakce plevelových společenstev na různé agrotechnické zásahy a zlepšení metod regulace zaplevelení při současném snížení množství používaných herbicidů.

1.3.3 **Vliv zpracování půdy**

Stejně jako střídání plodin, tak i zpracování půdy bylo v době před objevením herbicidů hlavní metodou regulace zaplevelení (Håkansson, 2003; Mikulka et Kneifelová, 2005). Pro regulaci plevelů je velmi významná podmítka, která umožňuje zaklopení vypadlých semen a poškození vytrvalých plevelů. Současně zabraňuje ztrátám na vlhkosti a umožní klíčení plevelů z povrchových vrstev. Hluboká orba pak spolehlivě zaklopí posklizňové zbytky rostlin, kořeny či kořenové výběžky vytrvalých plevelů, které v podmínkách hlubokého zaklopení nejsou schopny reprodukce (Hance et Holly, 1990; Jursík et al., 2011).

Nejdůležitější změnou bylo zavedení minimalizačních technologií do zemědělské praxe, které s sebou přineslo na jedné straně pozitiva – snížení ekonomických nákladů, zabránění erozi a utužení půdy, na straně druhé přispělo k negativním změnám ve složení plevelového spektra. Většina prací uvádí posun spektra směrem k vytrvalým druhům a jednoletým trávovitým druhům nebo anemochorním druhům (Sprenger et al., 2002; Thomas et al., 2004; Murphy et Lemerle, 2006; Mikulka et al., 2009). Légère et al. (2005) a Légère et Samson (1993) zkoumali druhové složení plevelných druhů v půdní zásobě semen, nezjistili

však rozdíly v druhovém bohatství a vyrovnanosti druhů mezi různou intenzitou zpracování půdy. Vliv absence zpracování půdy (no tillage) byl zřejmě zredukován dalšími agroekologickými faktory (Derksen et al., 1995). K podobným závěrům dochází i Légère et Derksen (2000). Také studie Winklera a Zelené (2005), která se zabývá vlivem rozdílného zpracování půdy na druhové spektrum plevelů v ozimé řepce, potvrzuje, že způsob zpracování půdy ovlivňuje plevelné druhy jen jako jeden z faktorů (vysvětluje 4,9 % celkové variability dat), který působí současně s mnoha jinými faktory.

1.3.4 **Vliv chemické ochrany**

V posledních 60 letech se staly herbicidy hlavním nástrojem regulace plevelů a zásadně změnily selekční tlak do té doby vyvíjený na plevelová společenstva (Haas et Streibig, 1982). Nabídka herbicidů se postupně rozšiřovala a měnila. Ve 40. letech byly zavedeny syntetické auxiny určené k potlačení širokolistých plevelů v obilninách. Jejich opakované používání však přispělo k rozšíření trávovitých plevelů (*Apera spica-venti, Avena fatua*), ale i odolných dvouděložných druhů, jako např. *Tripleurospermum inodorum*, *Veronica* spp., *Viola arvensis*, *Galium aparine* a *Lamium amplexicaule* (Hance et Holly, 1990; Murphy et Lemerle, 2006). Přestože početnost některých citlivých plevelů, např. *Sinapis arvensis*, *Raphanus raphanistrum*, *Capsella bursa pastoris* a *Thlaspi arvense* dočasně poklesla, z dlouhodobého pohledu se jejich početnost v Evropě zásadně nezměnila, a to díky semenům produkovaným přeživšími jedinci (Hume, 1987). V 50. letech byly objeveny triaziny a substituované močoviny, jejichž opakované používání spolu se zvýšeným podílem obilnin a kukuřice v osevních postupech přispělo k nárůstu četnosti vytrvalých plevelů (*Cirsium arvense*, *Elytrigia repens*) a šíření rezistentních populací druhů *Chenopodium album* nebo *Amaranthus retroflexus* (Andreasen et Streibig, 2010). Významným pokrokem v regulaci plevelů v obilninách bylo v 80. letech zavedení sulfonylmočovin s širokým spektrem účinku (jednoděložné i dvouděložné plevele) v nízkých dávkách. Jejich mnohaleté, velkoplošné používání také přispělo k určitým změnám plevelových společenstev a vzniku rezistentních populací *Apera spica-venti* a *Alopecurus myosuroides* (Murphy et Lemerle, 2006). I když vliv sulfonylmočovin nemusí být jednoznačný, jak dokládá studie Hyvönena et al. (2003), která ukazuje, že přes dlouhodobé používání sulfonylmočovin ve Finsku nebyl v letech 1980-90 zaznamanán zvýšený výskyt druhů odolných k sulfonylmočovinám (*Galium spurium* a *Viola arvensis*).

Grundy et al. (2010) sledovali rozdíly v dávce a načasování aplikace herbicidů v podmínkách minimalizační technologie zpracování půdy. Nejvyšší diverzity dosáhlo

společenstvo plevelů na neošetřené kontrole a variantách ošetřovaných preemergentně. U všech použitých herbicidů se druhová diverzita zvyšovala spolu se snížením doporučené dávky herbicidu. Na variantách ošetřovaných postemergentně byla druhová diverzita nejnižší a zároveň nejvyšší index dominance (Berger-Parker). Dlouhodobá aplikace poloviční dávky často vede k postupnému zvýšení zaplevelení a zvýšenému výskytu některých druhů, jako např. *Apera spica-venti, Viola arvensis, Centaurea cyanus* (Pallut et Moll, 2008). Mnoho prací se zabývá interakcemi aplikovaných herbicidů s agrotechnikou a jejich vlivem na zaplevelenost a druhovou diverzitu. Efekt ukončení herbicidního ošetření v různých osevních postupech zkoumali Gulden et al. (2011). U všech osevních postupů došlo ke zvýšení počtů semen na m^2, přičemž nižší hustota byla zaznamenána u osevního postupu se zařazenou víceletou plodinou. Co se druhového složení semenné banky týká, byla diverzita významně ovlivněna pěstovanou plodinou v rámci obou osevních postupů. V porovnání se stále ošetřovanou kontrolou nelze konstatovat, že by se diverzita významně zvýšila, změnilo se ale zastoupení jednotlivých druhů v závislosti na plodině a osevním postupu.

Vliv herbicidního ošetření na plevelová společenstva dokumentují také práce, které se zabývají rozdíly mezi konvenčním a ekologickým hospodařením. Tyšer et al. (2008) uvádějí více než dvojnásobné zvýšení počtu druhů u obilnin v ekologickém hospodaření, v okopaninách byly zaznamenány rozdíly ještě větší. To dokládá i diverzita vyjádřená Shannon-Wienerovými indexy, které jsou ve všech případech významně vyšší u ekologického hospodaření. K podobným závěrům došli např. José-María et Sans (2011) nebo Albrecht (2005), který uvádí více než čtyřnásobné zvýšení hustoty půdní zásoby semen po třech letech přechodu z konvenčního na organické zemědělství. Tato změna zároveň vedla ke zvýšení zastoupení pozdně jarních plevelů, vytrvalých a dvouděložných druhů, což bylo způsobeno nástupem mechanické regulace a změnou osevních postupů. V porovnání s konvenčním hospodařením je v systémech hospodaření s nízkými vstupy (bez herbicidního ošetření a hnojení pouze hnojem) druhová diverzita významně vyšší. V konvenčních systémech převažují travovité druhy odolné k herbicidům, zatímco v systémech s nízkými vstupy širokolisté druhy citlivé k herbicidům (Rassam et al., 2011).

Obecně lze konstatovat, že opakované používání herbicidů s podobným mechanismem účinku vedlo k ústupu druhů citlivých k těmto herbicidům a šíření odolných druhů, přičemž celkové zaplevelení nekleslo (Mahn, 1984; Mikulka et Chodová, 2000; Mikulka et Kneifelová, 2005; Murphy et Lemerle, 2006). Každá skupina herbicidů ovlivňuje plevelová společenstva jinak, přičemž opět dochází k interakcím se zvolenou agrotechnikou (Murphy et

Lemerle, 2006). V praxi ovšem málokdy dochází k aplikaci herbicidu se stejnou účinnou látkou na stejné lokalitě po dlouhou dobu, plevelové společenstvo je zároveň ovlivňováno dalšími faktory. Je proto obtížné určit konkrétní skupinu herbicidů jako hlavní mechanismus dlouhodobých změn plevelového společenstva a predikovat budoucí trendy (Fried et al., 2008). Nicméně z krátkodobého pohledu aplikace a načasování konkrétního herbicidu podporuje odolné druhy potlačením konkurence citlivých druhů (Grundy et al., 2010; Rotchés-Ribalta et al., 2017). Bàrberi et al. (1997) a Hawes et al. (2010) uvádějí, že chemická kontrola plevelů vede ke snížení druhové diverzity plevelového společenstva. V protikladu s výše uvedenými závěry jsou studie, které naznačují nejednoznačný vliv herbicidního ošetření na druhovou diverzitu. Derksen et al. (1995) hodnotili vliv aplikace herbicidů v interakci s technologií zpracování půdy. Herbicidní ošetření druhovou diverzitu nesnížilo, a na rozdíl od Grundyho (2010) nebyly zaznamenány rozdíly mezi preemergentním a postemergentním ošetřením. Naopak jako významný se ukázal vliv zpracování půdy. Rozdíly ve složení plevelového společenstva mezi jednotlivými technologiemi zpracování půdy byly významné před aplikací herbicidů, ale po aplikaci rozdíly zmizely. Herbicidní aplikace tak zřejmě inhibuje změny, které by nastaly vlivem různých způsobů zpracování půdy. Ulber et al. (2010) nezjistili signifikantní vliv herbicidního ošetření na druhové bohatství plevelového společestva v krátkodobém polním pokusu. Hume (1987) uvádějí, že 35letá kontinuální aplikace 2,4-D nezpůsobila signifikantní změny ve složení plevelového společenstva, změnilo se ale početní zastoupení jednotlivých druhů. Mayor et Dessaint (1998) neuvádějí významné rozdíly v druhovém složení semenné banky mezi mechanickou, integrovanou a pouze chemickou ochranou proti plevelům. Ačkoliv počet semen signifikantně rostl na parcelách s mechanickou kontrolou a klesal na parcelách ošetřovaných pouze chemicky, nebyl pozorován signifikantní rozdíl v Shannonově indexu diverzity mezi jednotlivými strategiemi ošetření, ani mezi jednotlivými roky. De Mol et al. (2012) nezjistili korelaci mezi druhovým složením plevelového společenstva a aplikovanými herbicidy v kukuřici. Vzhledem k uvedeným pracem je zřejmé, že vliv herbicidního ošetření na plevelová společenstva není zcela jednoznačný a zasluhuje si podrobnější výzkum. Krátkodobé pokusy a sledování nejsou k tomuto účelu příliš vhodné a často přinášejí zkreslené závěry, protože nelze v krátkodobém horizontu odfiltrovat vliv dalších faktorů, zejména významný vliv počasí v daném roce (Stoate et al., 2001).

1.4 Význam dlouhodobých polních pokusů

Dlouhodobé polní pokusy představují zdroj informací o dlouhodobých účincích jednotlivých agrotechnických opatření (např. minerální a organické hnojení, zpracování půdy, ochrana rostlin, osevní postupy a odrůdy) na půdní prostředí, výnosové trendy jednotlivých plodin a v neposlední řadě reakci celého agroekosystému včetně plevelového společenstva na konkrétní opatření (Körschens, 2006; Richter et al., 2007). Také umožňují zhodnotit vliv faktorů, které se mění velmi pomalu a silně závisejí na změnách počasí v jednotlivých letech (Moss, 2004), a srovnat mezi sebou oblasti s různými půdně klimatickými podmínkami. Mezi nejstarší pokusy v Evropě patří pokusy založené v 19. století v britském Rothamstedu a v německém Halle. Od 50. let 20. století byly dlouhodobé polní pokusy zakládány i v České republice a jejich velká část je provozována Výzkumným ústavem rostlinné výroby (VÚRV), v.v.i. (Madaras et Lipavský, 2009). Jedná se o pokusy, které jsou celosvětově uznávané: Polní výživářský pokus v Praze-Ruzyni (založen 1955), Výživářský osevní postup VOP (založen 1955 na lokalitách Ivanovice, Čáslav, Lukavec), Polyfaktoriální polní pokus s různými úrovněmi hnojení založený v roce 1979 na 10 lokalitách (přehled pokusů viz Lipavský et al., 2005). Masivní rozšíření používání herbicidů v zemědělství od 50. let minulého století vedlo v roce 1972 k založení dlouhodobého polního pokusu na dvou pokusných stanicích VÚRV, v.v.i. - Pernolec a Hněvčeves. Tento pokus umožnil sledovat vliv dlouhodobé herbicidní aplikace na plevelové společenstvo a výnosové trendy jednotlivých plodin s ohledem na změny počasí a změny v odrůdové skladbě plodin. Ačkoliv existuje mnoho observačních studií plevelové vegetace v rámci Evropy i České republiky (Lososová et al., 2004; Fried et al., 2008; Pinke et al., 2012; Kolářová et al., 2013), polní pokusy zaměřené na sledování dlouhodobého vlivu chemické ochrany na agrofytocenózu či tvorbu výnosu jsou ojedinělé. Pokus vedený ve VÚRV, v.v.i. je proto svým způsobem unikátní a jeho vyhodnocení přináší přesvědčivé závěry.

1.5 Vliv chemické ochrany na tvorbu výnosu

Zaplevelení způsobuje v konvenčním zemědělství výnosové ztráty průměrně 34 %, což je více než způsobují choroby a škůdci (Zwerger et al., 2004; Oerke, 2006). Pokles výnosu i kvality sklizených plodin je zapříčiněn vysokou konkurenceschopností mnoha plevelných druhů (Hance et Holly, 1990) a významně se liší mezi jenotlivými regiony v závislosti na klimatických podmínkách, ale i na dostupnosti chemické ochrany rostlin či uplatňování zásad

dobré zemědělské praxe. Největší potenciální výnosové ztráty jsou zejména ve vysoce produkčních systémech a tropických a subtropických oblastech, kde klimatické podmínky usnadňují šíření škodlivých organismů (Oerke, 2006).

Pro jednotlivé plodiny jsou výnosové ztráty vlivem zaplevelení různé, protože každá plodina má jiné konkurenční schopnosti (van Heemst, 1985). Ječmen a žito jsou více konkurenceschopné než pšenice (Mason et al., 2007), luskoviny, jako např. hrách, se vyznačují nízkou konkurenceschopností v počátečních růstových fázích (Corre-Hellou et al., 2011). Harker et al. (2001) uvádějí pokles výnosu díky zaplevelení v jednotlivých plodinách v tomto pořadí: ječmen jarní < řepka ozimá < hrách. Konkurenceschopnost plodin a výnosové ztráty jsou závislé také na odrůdě a na průběhu počasí v jednotlivých letech, protože plodiny i plevelné druhy reagují na klimatické podmínky (Andrew et al., 2015). Je proto vhodné vyhodnotit vliv vybraných faktorů na výnosy v dlouhodobém horizontu.

Význam chemické ochrany rostlin při tvorbě výnosu vzrostl se zjednodušováním osevních postupů a nástupem minimalizačních technologií zpracování půdy. Stasinskis (2009) uvádí významný vliv herbicidního ošetření (61,4 %) na výnos pšenice v porovnání se zpracováním půdy (9,5 %) a předplodinou (2 %). Gianessi (2013) označil herbicidy jako hlavní faktor zvyšující výnosy u kukuřice a soji v USA, stejně tak Keller et al. (2014, 2015) potvrdili dlouhodobý nárůst výnosu pšenice ozimé a kukuřice vlivem chemické ochrany. Existují ale i studie, které zpochybňují vliv herbicidní aplikace na zvýšení výnosů, např. Gaba et al. (2016). Ačkoliv aplikace herbicidů v redukovaných dávkách nemusí v krátkodobém horizontu představovat zvýšení zaplevelení a snížení výnosů (Salonen, 1993; Boström et Fogelfors, 2002; Kudsk et Streibig, 2003; Kudsk 2008), v dlouhodobém horizontu vede ke zvýšení hustoty zaplevelení méně citlivými druhy a v konečném důsledku ke snížení výnosů (Pallut et Moll, 2008; Hossard et al., 2014).

1.6 Úloha plevelných druhů pro biodiverzitu agroekosystémů

Plevelová společenstva tvoří nedílnou součást agrofytocenóz a kromě negativního vlivu na tvorbu a kvalitu výnosu plodin přispívají k udržení celkové biodiverzity na zemědělské půdě (Marshall et al., 2003). Aktuální studie ukazují, že zvýšená diverzita plevelů má pozitivní vliv na trvale udržitelné fungování agroekosystémů (Albrecht, 2003). Mnoho plevelových druhů je důležitými medonosnými rostlinami, např. rody *Taraxacum* nebo *Lamium* (Gabriel et Tscharntke, 2007), některé jsou zdrojem potravy pro fytofágní hmyz, čímž nepřímo ovlivňují diverzitu ptačích populací (Franke et al., 2009). Jiné druhy jsou

hostiteli specializovaných polyfágních druhů, jejichž výskyt podporuje přežití predátorů škůdců hmyzu, zejména střevlíkovitých (Storkey et Westbury, 2007). V neposlední řadě mohou porosty nízkých plevelů působit jako prevence proti erozi, zejména v širokořádkových plodinách (Weil, 1982). Nové přístupy v ochraně rostlin tak spočívají v hledání rovnováhy mezi dostatečnou rostlinnou produkcí a zachováním uspokojivé druhové rozmanitosti (Marshall et al., 2003). Cílem je efektivní kontrola vysoce kompetitivních, problematických druhů jako např. *Galium aparine*, které se významně podílejí na ekonomických ztrátách, a zachování co nejvyššího podílu plevelových druhů s přínosem pro biodiverzitu agroekosystémů. Práce Ulber et al. (2010) a Jonese et Smithe (2007) naznačují, že cílené ošetření selektivními herbicidy by se mohlo stát nástrojem pro účinné potlačení nežádoucích druhů, které následně povede k uvolnění niky pro málo kompetitivní, ale biodiverzitu zvyšující druhy.

1.7 Hodnocení diverzity rostlinného společenstva

Rostlinné společenstvo je definované jako soubor jedinců a populací rostoucích společně na určitém stanovišti, ovlivňovaných svým prostředím a zpětně jej modifikujících a ovlivňujících se navzájem (Pyšek, 1996). Druhové složení společenstva lze vyjádřit jednak kvalitativně - seznam druhů přítomných ve společenstvu na dané studijní ploše, jednak kvantitativně - kvantitativní zastoupení jednotlivých druhů. Toto zastoupení vyplývá z hustoty populací jednotlivých druhů a z velikosti jejich nadzemních orgánů, které určují pokryvnost a množství biomasy populací daných druhů (Moravec et al., 1994). Druh, jehož populace převládá, je označován jako dominanta (dominant species) či edifikátor dle Braun-Blanqueta et Pavillarda (Moravec et al., 1994). V agrofytocenózách je tímto dominantním druhem pěstovaná plodina. Druh, který v kvantitativním zastoupení následuje za dominantou, je označován jako subdominanta nebo kodominanta. V agrofytocenózách se jedná o jeden nebo většinou více plevelných druhů s vysokým zastoupením.

1.7.1 Metody hodnocení kvantitativního druhového složení

Kvantitativní zastoupení jednotlivých druhů v rostlinném společenstvu závisí na početnosti jejich populací a na velikosti jejich jedinců. Tím je určena biomasa populace a prostor, který ve společenstvu zaujímá. Tento prostor pak lze vyjádřit pokryvností populace (Moravec et al., 1994).

Početnost populací

Početnost (abundance) populace určitého druhu je vyjádřena počtem jedinců na analyzované ploše. Pro odhad početnosti bylo zavedeno několik stupnic, např. Braun – Blanquetova (stupně 5 – 1, od druhů velmi hojných po ojedinělé).

Pokryvnost populací

Pokryvnost populace určitého druhu ve společenstvu je definována jako vertikální projekce jejích nadzemních orgánů na analyzovanou plochu vyjádřená v procentech celkové analyzované plochy (Moravec et al., 1994). Pro stanovení pokryvnosti se používají různé metody přímé (bodová, liniová, grafická) a nepřímé. Přímou metodou je odhad pokryvnosti, při kterém se používají různé stupnice pokryvnosti. Nejpřesnější jsou stupnice, které kombinují pokryvnost a početnost, přičemž vyšší stupně vyjadřují pokryvnost, nižší stupně početnost druhových populací s nízkou pokryvností. Často užívaná je stupnice Braun – Blanquetova a Dominova (pro střední Evropu modifikovaná Domin – Hadačova).

Pokryvnost / výskyt	Braun – Blanquetova st.	Dominova st.
ojediněle	r	+
minimální pokryvnost/vzácně velmi roztroušeně	+	1 2
do 5% / roztroušeně	1	3
5 – 15 %	2	4
15 – 25 %	2	5
25 – 33 %	3	6
33 – 50 %	3	7
50 – 75 %	4	8
75 – 90 %	5	9
90 – 100 %	5	10

1.7.2 **Druhová diverzita a indexy diverzity**

Druhová rozmanitost společenstva obecně závisí na jeho druhovém bohatství. Podle Oduma (MORAVEC et al., 1994) vyjadřuje diverzitu společenstva poměr počtu druhů k počtu jedinců:

$$I_{\text{div.}} = S/I$$

kde S = počet druhů, I = počet jedinců. V případě monocenózy by se index blížil nule.

Podle Whittakera (1972) se diverzita rozlišuje na alfa, beta a gama diverzitu. Alfa diverzita vyjadřuje diverzitu na nejnižší prostorové úrovni. Vyjadřuje počet přítomných druhů v rámci jednoho společenstva či stanoviště. Beta diverzita popisuje rozdílnost v druhovém složení mezi vzorky, a to podél určitého gradientu (ekologického, prostorového, časového) nebo variabilitu mezi vzorky bez ohledu na směr nějakého gradientu v souvislosti se změnami některého z faktorů prostředí. Čím méně společných druhů srovnávané vzorky obsahují, tím je beta diverzita vyšší. Gama diverzita vyjadřuje celkovou druhovou bohatost regionu (Huston, 1994).

Druhová diverzita společenstev se skládá ze dvou složek: druhová bohatost (species richness) – počet druhů ve vzorku a druhová vyrovnanost (species evenness) – relativní zastoupení jednotlivých druhů ve vzorku. Druhová diverzita se vyjadřuje prostřednictvím různých indexů, které se na úrovni alfa diverzity liší právě tím, zda kladou větší důraz na bohatost nebo vyrovnanost. Ve fytocenologii se používá zejména Simpsonův index a Shannon - Wienerův index.

Simpsonův index (D) vyjadřuje pravděpodobnost, že dva náhodně vybraní jedinci budou patřit ke stejnému druhu. Zdůrazňuje dominanci druhu, dává větší váhu druhům běžným na úkor vzácných. Měří v podstatě opačnou vlastnost, než je diverzita (Pielou, 1975).

$$D = \sum_{i=1}^{S} p_i^2$$

kde S = celkový počet druhů, p_i = n_i / N, n_i = počet jedinců druhu *i*, N = celkový počet jedinců ve společenstvu.

Se zvyšující se diverzitou hodnota indexu klesá, proto se často používá jeho komplementární nebo reciproká forma (S_D).

$$S_D = 1 - D \text{ nebo } S_D = 1 / D$$

Shannon – Wienerův informační index (H´) vyjadřuje nejistotu, se kterou lze předpovědět, jakého druhu bude náhodně vybraný jedinec ze vzorku. Nejistota klesá s klesajícím počtem druhů a s klesající vyrovnaností. V ideálním společenstvu se stejnou abundancí pro všechny druhy by index dosahoval maximální hodnoty (H'_{max}).

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} p_i . \ln p_i$$

kde S = celkový počet druhů, p_i = n_i / N, n_i = počet jedinců druhu *i*, N = celkový počet jedinců ve společenstvu.

Ze Shannonova – Wienerova indexu byl odvozen ***index vyrovnanosti (E)***, který vyjadřuje procentuální podíl hodnoty H' pro určité společenstvo z maximálně možné hodnoty tohoto indexu (H'_{max}) pro daný počet druhů (S) (Pielou, 1966):

$$E = H' / H'_{max} * 100 \quad H'_{max} = \ln S$$

Vyrovnanost může dosahovat hodnot v rozmezí od 0 do 1, přičemž hodnoty 0 indikují společenstvo extrémně nevyrovnané (dominováno jedním druhem) a hodnoty blížící se 1 společenstvo extrémně vyrovnané (maximální druhová diverzita, žádný druh nedominuje) (Booth et al., 2003).

Beta diverzita se vyjadřuje pomocí mnohorozměrných indexů podobnosti. Nejstarším indexem je ***Jaccardův index (IS_J)***, který porovnává počet druhů v jednotlivých společenstvech (*A, B*) s počtem druhů společným oběma *c*:

$$IS_J = (c / A + B - c) * 100$$

Podobný je ***Sørensenův index (IS_S)*** :

$$IS_S = (2c / A + B) * 100$$

2. Výzkumné hypotézy a cíl práce

Vědecké hypotézy:

1. Chemická ochrana proti plevelům je významným agrotechnickým opatřením přispívajícím k zajištění výnosů a jejich dlouhodobému růstu. Dosažený přírůstek výnosu se liší v závislosti na stanovištních podmínkách a pěstované plodině.

2. Druhové složení plevelových společenstev je charakteristické pro určité půdně klimatické podmínky, ale je výrazně ovlivňováno pěstovanými plodinami a používaným způsobem regulace plevelů. Dlouhodobé používání herbicidů s určitým spektrem účinku působí na druhovou diverzitu plevelových společenstev, neboť vede k ústupu citlivějších druhů a k nárůstu výskytu odolnějších druhů.

Cíle práce:

1. Na základě analýzy výnosových dat z dlouhodobých polních pokusů kvantifikovat dlouhodobý vliv agronomických opatření včetně chemické ochrany proti plevelům na tvorbu výnosu. Stanovit výnosové ztráty vlivem zaplevelení pro různé plodiny v rozdílných osevních postupech v různých půdně klimatických podmínkách.

2. Na základě analýzy dat z dlouhodobých polních pokusů stanovit vliv používání různých typů herbicidů a absence ochrany na druhové složení plevelových společenstev v rozdílných půdně klimatických podmínkách a osevních postupech. Porovnat krátkodobý vliv různých strategií ošetření selektivními herbicidy na účinnost ochrany a druhovou diverzitu plevelových společenstev.

3. Publikované práce

Seznam publikovaných prací:

Madaras, M., Mayerová, M., Kumhálová, J., Lipavský, J. 2018. The influence of mineral fertilisers, farmyard manure, liming and sowing rate on winter wheat grain yileds. Plant, Soil and Environment. 64 (1). 38-46.

Mayerová, M., Madaras, M., Soukup, J. 2018. Effect of chemical weed control on crop yields in different crop rotations in a long-term field trial. Crop Protection. (in press).

Mayerová, M., Mikulka, J., Madaras, M., Soukup, J. 2017. Dlouhodobý efekt herbicidního ošetření na výnos v osevních sledech. Úroda. 65 (10). 18-20.

Mayerová, M., Mikulka, J., Kolářová, M., Soukup, J. 2017. Changes in weed community composition in a long-term trial with different crop rotations and herbicide treatments. Julius-Kühn-Archiv. 458. 58-66.

Mayerová, M., Mikulka, J., Soukup, J. 2018. Effects of selective herbicide treatment on weed community in cereal crop rotation. Plant, Soil and Environment. 64 (10). (in press).

Tato kapitola je tématicky rozdělena do tří částí. První část se zabývá vlivem různých faktorů na tvorbu výnosu plodin v dlouhodobých polních pokusech. Podkapitola 3.1.1 je věnována vlivu minerálního a organického hnojení, vápnění a hustototy výsevku na výnos zrna pšenice ozimé v polyfaktoriálním, téměř 30 letém, polním pokusu na čtyřech pokusných stanicích VÚRV, v.v.i. (Kostelec, Hněvčeves, Pernolec, Humpolec). Navazují podkapitoly 3.1.2 a 3.1.3, ve kterých je zkoumán dlouhodobý efekt herbicidního ošetření a osevních postupů na výnos pěti plodin (brambory, hrách, pšenice ozimá, ječmen jarní, řepka ozimá) ve více než 40 letém polním pokusu na dvou lokalitách (Pernolec, Hněvčeves). Tento pokus je rozdělen na dvě části podle uplatňovaných osevních postupů: zjednodušený osevní postup se 75 % obilnin a pestrý s 50 % obilnin včetně okopanin. V pokusu jsou použity 3 varianty ošetření proti plevelům: (1) neošetřená kontrola, (2) růstové herbicidy (pouze u zjednodušeného osevního postupu), (3) cílené ošetření kombinací herbicidů.
Druhá část popisuje dlouhodobé změny plevelového společenstva na orné půdě v závislosti na chemickém ošetření, osevních postupech a pěstovaných plodinách. Zdrojem dat pro tento výzkum byl výše popsaný dlouhodobý herbicidní pokus VÚRV, v.v.i. v Pernolci a Hněvčevsi.

Poslední část práce se zabývá možností využití selektivních herbicidů jako nástroje pro účinnou regulaci plevelů při současném zachování uspokojivé druhové rozmanitosti plevelového společenstva. Data byla čerpána z krátkodobého polního pokusu v Praze-Ruzyni s různými strategiemi chemického ošetření: (1) nízkonákladové, po dlouhou dobu používané herbicidy s užším spektrem účinku, (2) moderní herbicidy se třemi účinnými látkami a širším spektrem účinku.

3.1 Vliv agrotechnických opatření na výnosy plodin v dlouhodobých polních pokusech

3.1.1 The influence of mineral fertilisers, farmyard manure, liming and sowing rate on winter wheat grain yileds.

doi: 10.17221/703/2017-PSE

The influence of mineral fertilisers, farmyard manure, liming and sowing rate on winter wheat grain yields

Mikuláš MADARAS[1,*], Markéta MAYEROVÁ[1], Jitka KUMHÁLOVÁ[2], Jan LIPAVSKÝ[1]

[1]*Division of Crop Management Systems, Crop Research Institute, Prague, Czech Republic*
[2]*Department of Machinery Utilization, Faculty of Engineering, Czech University of Life Sciences Prague, Prague, Czech Republic*
**Corresponding author: madaras@vurv.cz*

ABSTRACT

Madaras M., Mayerová M., Kumhálová J., Lipavský J. (2018): The influence of mineral fertilisers, farmyard manure, liming and sowing rate on winter wheat grain yields. Plant Soil Environ., 64: 38–46.

The influence of mineral fertilisers, liming, farmyard manure and sowing rate on the winter wheat grain yields was studied in a long-term field experiment at 4 sites under different soil and climatic conditions in the Czech Republic. A total of 135 partial fraction-factorial experiments were performed between 1980 and 2013 and evaluated using a statistical model with linear and quadratic terms for each factor. Yield trends demonstrated remarkable influence of fertilisation at two sites of lower starting productivity. Here, grain yields increased by 50% and 25% since the trial commencement, while the rate of yield increase was low at more productive sites. Yields were the most frequently influenced by nitrogen (N) fertilisation, uniformly at all sites. N response curves were strongly curvilinear, but these differed between sites and were affected by preceding crops. The relative frequency of statistically significant influences decreased in the following order: N (significant at $\alpha < 0.05$ in 89% of all partial trials) > sowing rate (29%) > phosphorus (22%) > farmyard manure (15%) > potassium (12%) > liming (8%). This order and the frequencies of these influences are discussed with regard to relevant site and soil conditions.

Keywords: *Triticum aestivum*; long-term field trials; seeding density; soil productivity; nutrients

Gradual changes in soil productivity can only be measured by long-term monitoring or field experiments. Long-term agro-ecosystem experiments help evaluation of the cropping system effects on soil quality, sustainability of these systems and provide early warning indication of threats to future crop production (Richter et al. 2007). Fertilisation is one of the most important intensification factors significantly effecting crop yield and quality (Černý et al. 2010). Edmeades (2003) contended that nutrient inputs can increase crop production by 300–400% and are essential in maintaining long-term sustainability. A long-term Broadbalk wheat experiment confirmed a strong yield response to nitrogen fertilisation with the curvilinear character of nitrogen (N) response curve (Brentrup et al. 2004). Jaakkola and Yli-Halla (2008) reported a significant decrease in cereal yields after 30 years with N fertilisation not balanced with phosphorus (P) and potassium (K) fertilisers. Moreover, yield and its response to fertilisers depend on preceding crops, and the results from a Hungarian long-term experiment (Berzsenyi et al. 2000) showed that yields of wheat cropped in monoculture were always lower than in crop rotation. Simultaneously, significantly higher yields were obtained at high NPK fertilisation rates, especially in rotations with a high proportion of cereals. The combined application of organic manure and inorganic fertiliser was an

Supported by the Ministry of Agriculture of the Czech Republic, Projects No. RO0417 and QJ1610547.

doi: 10.17221/703/2017-PSE

efficient way of fertilising (Berzsenyi et al. 2000). Fertiliser effectiveness may differ due to locally – specific conditions of field trials (Černý et al. 2010). Therefore, it is difficult to draw general conclusions and recommendations concerning effective fertilisation. Long-term yield records from the experiments performed at diverse sites can improve the fertilisation recommendations. The objective of this study is to use robust long-term field data to evaluate the effect of basic agronomic measures on the winter wheat grain yields in different soil and climatic conditions.

MATERIAL AND METHODS

Field trials. Fraction-factorial field fertilisation experiments (FFFE) were established in 1979 at 10 sites. Winter wheat grain yield data used for this study were recorded from trials active until 2013 at the Czech Republic Hněvčeves, Kostelec nad Orlicí, Humpolec and Pernolec sites (Table 1).

FFFE's were designed to specify the influences of six independent agronomy measures – nitrogen, phosphorus and potassium mineral fertilisation, farmyard manure (FYM), liming and sowing rate on the growth of common field crops. FFFEs are based on the fraction-factorial experimental design of a central scheme of the second order in incomplete blocks (Cochran and Cox 1957). Medium levels of all factors reflected standard (optimal) crop-specific cropping practice and excess levels were expected to limit crop growth by excess nutrient or very high stand density. Fertilising and liming had five levels: zero (0%) – lower (58%) – medium (100%) – higher (142%) and excess (200%). Sowing rate was utilised as a factor until 1990 in a modified range from basal 40–75% of the medium level depending on crop type to the 140–200% excess range. Medium levels of fertiliser and sowing rates are shown in Table 2. Ammonium nitrate and sulphate, superphosphate and potassium chloride were used as N, P and K mineral fertilisers. Wheat was usually sown between September 24th and October 10th and the sowing rate ranged from 200 to 700 germinated seeds per m^2. Lime was applied each 4 to 8 years in the medium rate calculated to reach the optimal soil reaction, which was 7.0 for Hněvčeves and Kostelec, 6.5 for Pernolec and 6.0 for Humpolec.

At each site, the trial comprised 4 fields with 56 plots (5 × 12 m) per field and 47 treatments were employed. Details of the FFFE design are described in Madaras and Lipavský (2009). Crops were grown in an 8-year crop rotation (Table 2). The crop rotation was phased in four fields at individual sites so that the same crop appeared in the same crop sequence on each site in the two-year period. Conventional tillage up to 25 cm depth was used for soil cultivation and 12 winter wheat cultivars were grown during the evaluated period; each for approximately 5–7 years. After two complete rotations, alternative crops such as oilseed rape and pea were also included and crop rotation was changed in some fields. The sowing

Table 1. Characteristics of the experimental sites and soil properties at the experiment commencement

Site	Location		Altitude (m a.s.l.)	Temperature (°C)	Precipitation (mm)	Soil	C_{ox} (%)	pH	Available nutrient	
	latitude	longitude							P_{Egner}	$K_{Schachschabel}$
									(mg/kg)	
Hněvčeves	50.31	15.72	265	8.2	573	Orthic Luvisol on loess, clay-loam	1.0	6.4	73	120
Kostelec	50.12	16.19	290	7.6	681	Orthic Luvisol on loess, sandy-loam	1.1	6.3	62	119
Humpolec	49.55	15.35	525	6.5	667	Stagno-gleyic Cambisol on paragneiss, sandy-loam	1.7	6.1	27	212
Pernolec	49.77	12.68	530	7.1	559	Stagno-gleyic Cambisol on orthogneiss, sandy-loam	1.1	6.0	71	185

doi: 10.17221/703/2017-PSE

Table 2. Crop rotation in experiments and application rates (medium factor levels) for crop-plants

Year	Crop – plant	N*	P	K	Farmyard manure (10^3 kg/ha)	Sowing rate (seeds/ha)
		(kg/ha)				
1	Clover + oat/alfalfa + oat#	40	60	100	–	16 kg + 2.0×10^6
2	Clover/alfalfa#	–	–	–	–	–
3	Winter wheat	100	40	70	–	4.5×10^6
4	Silage maize	175	50	150	40	8.0×10^4
5	Winter wheat	125	40	70	–	4.5×10^6
6	Spring barley	90	40	50	–	4.5×10^6
7	Potato/sugar beet#	150	50	150	40	8.5×10^4
8	Spring barley	60	40	50	–	4.5×10^6

*the total amount of nitrogen (N). N application was divided into 3 doses for winter wheat (50% before sowing, 17% in early spring, 33% in spring). – factor not used. #Potato and clover were planted in Humpolec and Pernolec

rate factor was not used after 1995 and a uniform sowing rate of 4.5×10^6 germinated seeds/ha was applied to follow the previous medium level. The factorial fertilisation scheme for the remaining five factors continued until 2013. Therefore, the yield records were not excluded from our evaluation.

Data processing and statistics. The winter wheat grain yields at standard 86% dry matter moisture recorded from 1980 to 2013 were used, and the database for analysis comprised 135 partial trials, which provided 7560 individual plot records. Yield time trends were evaluated by simple linear regression. Each field trial was evaluated separately to determine the experimental factor effects. The method proposed by Cochran and Cox (1957) was employed; briefly, the statistical evaluation of the data was based on the model, which enables estimation of linear and quadratic effects and the interactions between factor pairs. The statistical significance of each factor or each factor pair interaction was tested at $\alpha < 0.05$ and only statistically significant equation members were used in the final model equation. When a particular model did not prove the factor's statistical significance, either alone or in an interaction, the factor's influence on yields in that model was regarded as zero. Models lacking significance were discarded and yield prediction curves were generated from each of the remaining models. The obtained values were then averaged according to the preceding crop and the experimental site, and final results were graphed for visual assessment. Results on factor pair interactions are not shown here; they will be reported and discussed in the separate paper.

RESULTS AND DISCUSSION

Yield trends. A remarkable increase in winter wheat grain yields was recorded in Kostelec and Humpolec, i.e. at lower productivity sites (Figure 1). Mean yields increased by 50% in Kostelec and by 25% in Humpolec between the first and the last crop rotation. Fertilisation clearly gradually enhanced soil fertility by increasing soil quality, and this was supported by the research results from Christensen (1997), Johnston (1997) and Edmeades (2003). During the experimental period, the fertiliser effect was combined with the introduction of new more productive wheat cultivars with better nutrient use efficiency and/or better structure and higher component yield capacity (Mladenov et al. 2011, Sanchez-Garcia et al. 2012, Cormier et al. 2016). This resulted in an increasing difference between non-fertilised controls and the most productive treatments. The rate of yield increase was only 13% in Hněvčeves. Even excess N did not bring substantial additional yield increase. Hejcman and Kunzová (2010) and Černý et al. (2010) recorded that the N yield effect is often lower at sites with higher natural soil fertility. Specific decreasing trends were recorded in Pernolec, where mean yields dropped by 9% after the first rotation. Only the most intensive fertilisation maintained yields at the starting level and the yields at unfertilised treatments decreased immediately after the experiment set-up. These experimental fields were most likely intensively fertilised before 1979, as the starting yields were quite high for these climatic and soil conditions.

doi: 10.17221/703/2017-PSE

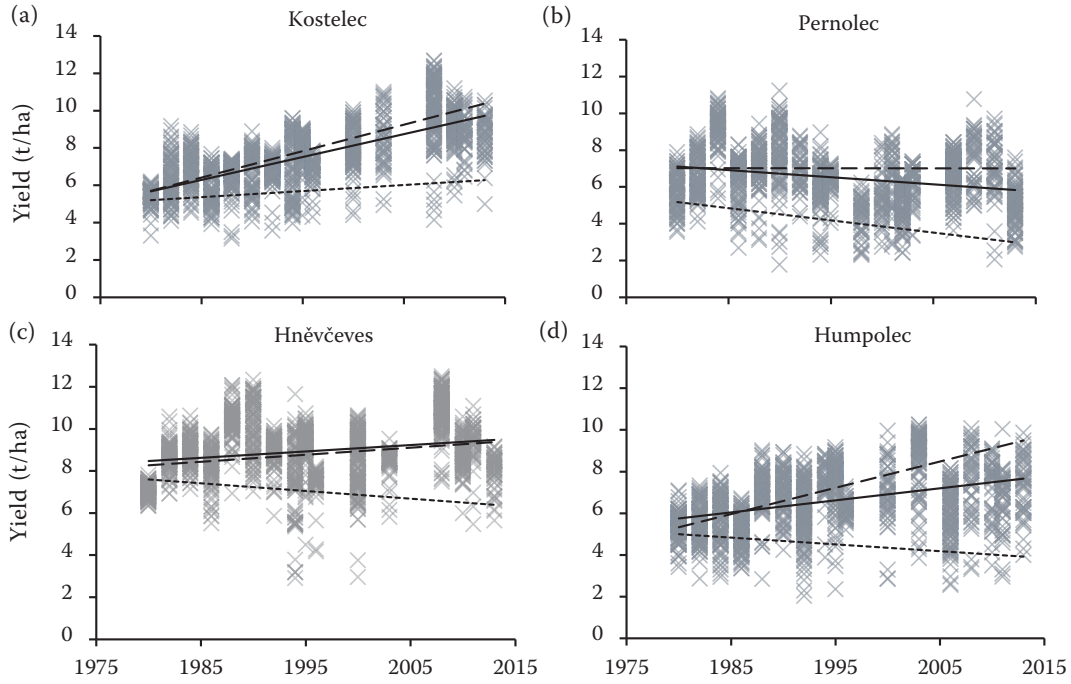


Figure 1. Winter wheat grain yields over the experimental period, with trends for average annual yields (solid), non-fertilised control (dotted) and the most productive treatment (dashed)

The average influence of experimental factors on wheat grain yields is quantitatively expressed in Figure 2; Figure 3 highlights the influence only for the partial trials where factors were significant. These graph curves are therefore steeper because they not flattened by a large number of

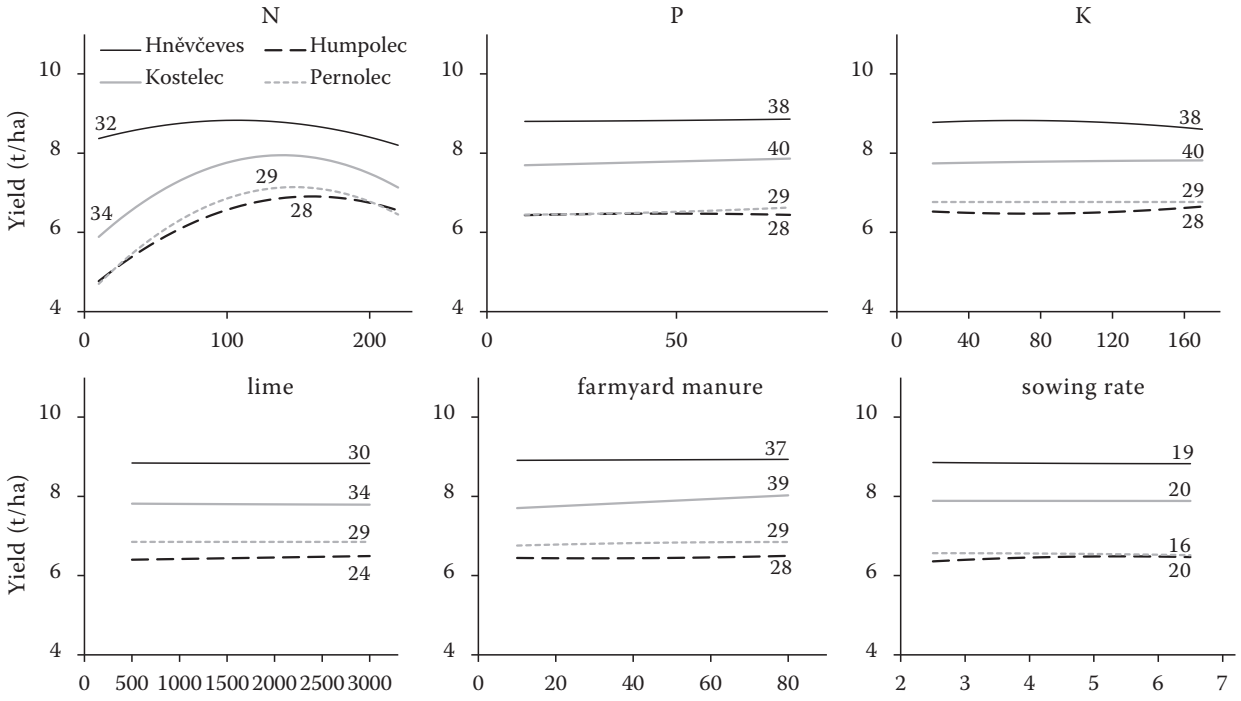


Figure 2. Average influence of N, P, K and lime (kg/ha), farmyard manure (t/ha) and sowing rate (10^6 germinated seeds) on winter wheat grain yields in the whole dataset. Numbers next to curves show number of partial trials participating at the average model curve calculation. For each factor graph, other factors were set to their medium values in the model

doi: 10.17221/703/2017-PSE

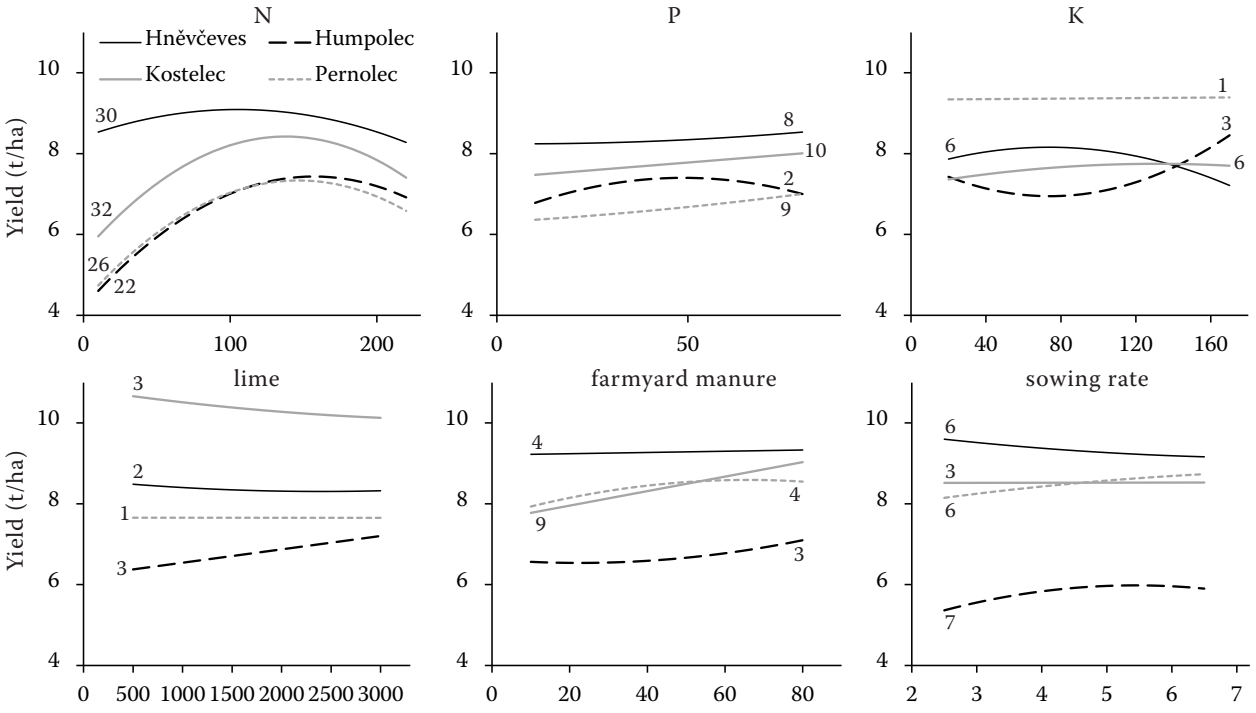


Figure 3. Influence of N, P, K and lime (kg/ha), farmyard manure (t/ha) and sowing rate (10^6 germinated seeds) on winter wheat grain yields in cases when factor effects were statistically significant at $P > 0.05$. Numbers next to curves show number of partial trials participating at the average model curve calculation. For each factor graph, other factors were set to their medium values

non-significant cases. Within the partial trials performed, each factor was used from 16 to 40 times at each site, while the statistical significance was confirmed from 1 to 32 times at each factor and site combination (Table 3). These numbers are important for the relevance of the quantitative results presented in Figures 2 and 3. The higher is the percentage of significant cases, the higher is the result relevance.

Nitrogen. N was statistically significant in 89.4% of all partial trials and in 100% of trials performed in last 8 years (Table 3). A quadratic member was significant for 66% of all calculated yield models, resulting in a strongly curvilinear N response curves. N fertilisation can increase yields by an average of 2 t/ha; however N effect was strongly site-dependent with the curve rather flat for Hněvčeves and steeper for other sites. Site yield potential was in the order: Hněvčeves > Kostelec > Pernolec ≈ Humpolec, but the maximum yields obtained were in the reverse order – at 110 kg N/ha for Hněvčeves, 130 kg N/ha for Kostelec, 145 kg N/ha for Pernolec and 170 kg N/ha for Humpolec. High N application rates caused occasional wheat lodging, resulting in lower grain yields. The shift in curve peaks can be explained by increased nitrate leaching in the climatic gradient from warmer to colder sites. Results obtained from international long-term experiments showed different optimum N application rates, highlighting the strong effect of local soil and climate conditions (Brentrup et al. 2004). N leaching strongly depends on N supply, crop type and soil and climatic conditions (Heumann et al. 2013). N losses are also connected with autumn and winter precipitation, and are higher on light-textured soils (Cameron et al. 2013). Results from other Czech long-term experiments by Kunzová and Hejcman (2009) and Hejcman and Kunzová (2010) confirmed that grain yields on less productive soils were strongly dependent on N application rates. In addition, Sieling et al. (2005) and Hejcman and Kunzová (2010) recorded a statistically significant influence of the preceding crop on grain yield, and Rahimizadeh et al. (2010) reported that the preceding crop affects wheat N uptake and use efficiency. This research supports our finding that the preceding crops have a substantial effect on the N response curve (Figure 4).

Sowing rate. The next most important factor was sowing rate, and its statistical significance

doi: 10.17221/703/2017-PSE

Table 3. Overview of the influence of six experimental factors on winter wheat grain yields at experimental sites

Site	Period	Nitrogen		Phosphorus		Potassium		Liming		FYM		Sowing rate	
		n_{total}	$\frac{n_{\alpha<0.05}}{x\ (x^2)}$	n_{total}	$\frac{n_{\alpha<0.05}}{x\ (x^2)}$	n_{total}	$\frac{n_{\alpha<0.05}}{x\ (x^2)}$	n_{total}	$\frac{n_{\alpha<0.05}}{x\ (x^2)}$	n_{total}	$\frac{n_{\alpha<0.05}}{x\ (x^2)}$	n_{total}	$\frac{n_{\alpha<0.05}}{x\ (x^2)}$
Kostelec	1980–2013	34	32 (21)	40	10 (0)	40	6 (1)	34	3 (1)	39	9 (0)	20	3 (0)
Hněvčeves	1980–2013	32	30 (18)	38	8 (4)	38	6 (5)	30	2 (1)	37	4 (0)	19	6 (2)
Humpolec	1980–2013	28	22 (14)	28	2 (2)	28	3 (3)	24	3 (0)	28	3 (1)	20	7 (2)
Pernolec	1980–2013	29	26 (20)	29	9 (1)	29	1 (0)	29	1 (0)	29	4 (2)	16	6 (1)
All sites	1980–2013	123	110 (73)	135	29 (7)	135	16 (9)	117	9 (2)	133	20 (3)	75	22 (5)
Kostelec	2007–2013	9	9 (6)	9	2 (0)	9	1 (0)	9	1 (0)	9	2 (0)	–	–
Hněvčeves	2007–2013	9	9 (5)	9	2 (1)	9	1 (0)	8	0 (0)	9	2 (0)	–	–
Humpolec	2007–2013	4	4 (2)	4	2 (2)	4	2 (2)	4	2 (0)	4	1 (0)	–	–
Pernolec	2007–2013	6	6 (3)	6	1 (0)	6	0 (0)	6	1 (0)	6	0 (0)	–	–
All sites	2007–2013	28	28 (17)	28	7 (3)	28	4 (2)	27	4 (0)	28	5 (0)	–	–

n_{total} – number of partial trials including the factor; $n_{\alpha<0.05}$ – number of partial trials in which the factor significantly influenced yields; x^2 – number of partial trials in which a quadratic member was statistically significant; FYM – farmyard manure

was observed in 29.3% of cases. Sowing rate influence was less frequently noted in Kostelec than at other sites and it increased yields on average by 0.2 t/ha in the experimental range applied. In addition, while the effect of increasing sowing rate was positive in colder sites providing + 0.5 t/ha in significant cases, and slightly negative in Hněvčeves, the most consistent results were es-

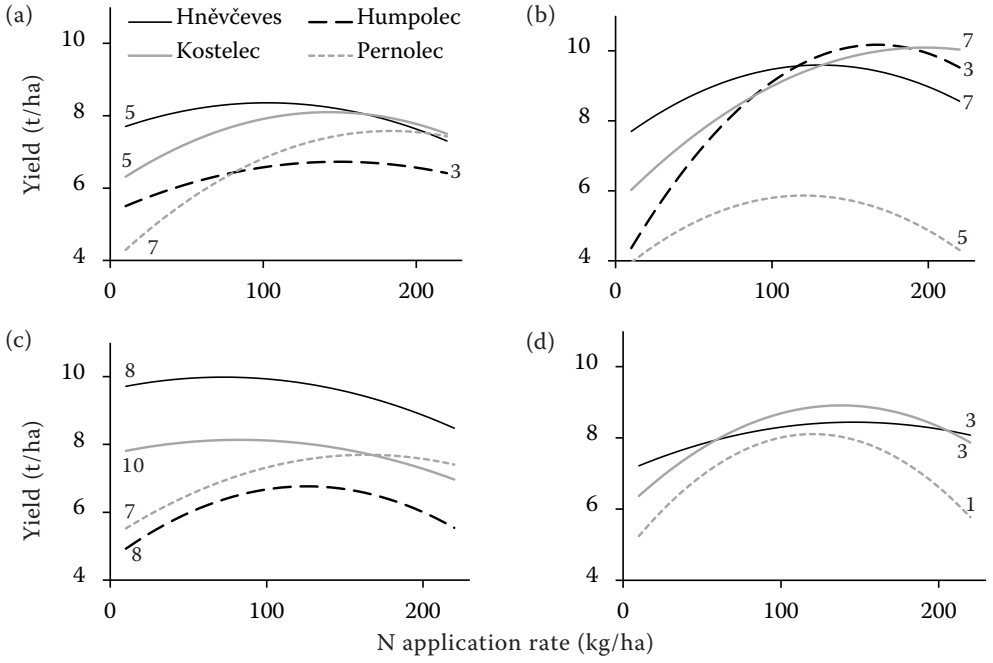


Figure 4. Average influence of nitrogen (N) fertilisation on winter wheat grain yields for different preceding crops ((a) silage maize; (b) oilseed rape; (c) alfalfa/clover; (d) pea). Numbers next to curves show number of partial trials participating at the average model curve calculation. For each factor graph, factors other than N were set to their medium values

doi: 10.17221/703/2017-PSE

tablished in Humpolec where 6 of 7 significant cases achieved a positive effect. At other sites, positive and negative cases were equally recorded, thus confirming that the effect of sowing rate differs in different environments and conditions (Geleta et al. 2002). Compensatory mechanisms for yield components usually lead to yields being unaffected in the range of 300 to 500 germinated seeds/m^2 (Gaile et al. 2017). The mutual compensation of yield-forming components produces equal final stand density (Stephen et al. 2005) and the lower plant number per m^2 is compensated by a higher number of offshoots. Goodling et al. (2002) reported a low-sowing-rate effect in N-deficient wheat cropping, and this may also be relevant for other nutrients. The Kostelec soil nutrient limitation recorded in our research is confirmed by a steep yield increase when fertilisation began and this could have initiated conditions where the sowing rate did not affect yields in the tested range.

Phosphorus. P influence was significant in 21.5% of all partial trials; however only in 7% in Humpolec. P effect was positive for all sites except Humpolec over the rate of 50 kg P/ha, where it was curvilinear and negative. On average, P fertilisation increased yields by approximately 0.5 t/ha. Humpolec soil had the lowest starting available P content of all sites. The only two significant results recorded for this site are therefore rather surprising although available P level of 27 mg/kg may still be sufficient to supply wheat plants. These two cases were recorded in last 8 years of the evaluated period (Table 3), indicating that soil available P at underbalanced treatments might have fallen enough to increase P effect on yields. Guggenberger et al. (2000) reported that clay fraction is important in short-term P turnover, and while the low clay content in Humpolec soil may be positive for P release, P may also be adsorbed more readily in soils with higher clay content. Thus, differences in soil type significantly influence P dynamics (Blake et al. 2000). The meta-analysis reported by Valkama et al. (2009) highlighted that P fertilisation significantly increased crop yields by 11%, but this depended strongly on soil texture and organic matter content and its beneficial effect decreased in the following order: organic soils > coarse-textured mineral soils > clay soils.

Farmyard manure. FYM influence was significant in 15.0% of cases, and its fertilisation effect was linear. FYM increased yields by approximately 0.75 t/ha in the range of applied rates; with the most frequent influence of 23.1% of trials observed in Kostelec. The effect there was the most intensive, with expected yield increase by 1.5 t/ha. Nutrients released from manure had a beneficial effect for Kostelec plant growth because of its low initial soil fertility, and the nutrient effect was therefore much higher than in soils with higher available nutrients. Černý et al. (2010) and Berzsenyi et al. (2000) reported that FYM application had a lower effect on yield increase than NPK fertilisation. On the contrary, Johnston's (1997) Rothamsted results recorded the greatest crop yields on plots treated with manure, but FYM was applied here annually and at a higher rate than in our experiment. Results from 14 international field trials indicated no significant differences between manures and mineral fertilisers in their long-term effects on crop productivity; even the lower bulk density and higher porosity, hydraulic conductivity and aggregate stability relative to fertilised soils were reported in manured soils (Edmeades 2003).

Potassium. In most cases, potassium (K) fertilisation had no significant effect on yield, and this finding is supported by Khan et al. (2014). The significant effect of K fertilisation was more frequent at Kostelec and Hněvčeves, with their loess-derived soils and 15.4% of statistically significant cases, than at the remaining two sites with gneiss-derived soils. The gneiss at our sites contains a high percentage of K-bearing micas, resulting in higher soil K content, while the total K in the loess-derived soils is much lower (Madaras et al. 2010). The quantitative effects of K fertilisation are inconsistent in some significant cases (Figure 3); K fertilization increased yields in Kostelec by approximately 0.5 t/ha also in the excess rates while in Hněvčeves rates over 70 kg N/ha exerted a strong negative effect. The yield reduction due to KCl application is explained by both KCl's high salt index (Khan et al. 2014) and Mg deficiency induced by high K supply (Römheld and Kirkby 2010). In contrast to these two sites, Humpolec high K rates had occasional clearly positive effect on yields (N = 3), more frequently in last 8 years of the experiment.

Liming. Haynes and Naidu (1998) and Kisić et al. (2004) reported that liming of acid soils improves crop growth and yields. However, soil pH at our experimental sites is within the 5.5–6.5 optimum wheat range, which ensures both crop growth and

doi: 10.17221/703/2017-PSE

optimum nutrient availability (Islam et al. 1980). The pH very rarely fell under 6.0 at untreated control plots, and therefore slightly acidic pH range is most likely the reason that the effect of soil reaction control by lime was rarely observed; only in 7.7% of trials. Although soil acidification with pH levels less than 5.0 can occur due to the long-term use of N fertilisers, there was no reduction in winter wheat yield (Schroder et al. 2011).

Yields were most frequently influenced by N and much less responsive to other factors. The effect of N was much stronger than for other factors and it had a parabolic shape in contrast to the linear and very flat effects of the other factors, which signals weak or negligible influence. Fertiliser doses at or above the tested excess levels therefore did not affect higher yields but they might have contributed to water and soil pollution due to leaching. Finally, our results confirmed the profound role of climatic and edaphic site characteristics and the effects of preceding crops on the shape of response curves.

Acknowledgements

We thank Dr Raymond J. Marshall for the language review and M.Sc. Wiktor Rafal Żelazny and Dr Lukáš Kotík for the statistical analysis.

REFERENCES

Berzsenyi Z., Győrffy B., Lap D.Q. (2000): Effect of crop rotation and fertilisation on maize and wheat yields and yield stability in a long-term experiment. European Journal of Agronomy, 13: 225–244.

Blake L., Mercik S., Koerschens M., Moskal S., Poulton P.R., Goulding K.W.T., Weigel A., Powlson D.S. (2000): Phosphorus content in soil, uptake by plants and balance in three European long-term field experiments. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 56: 263–275.

Brentrup F., Küsters J., Lammel J., Barraclough P., Kuhlmann H. (2004): Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems. European Journal of Agronomy, 20: 265–279.

Cameron K.C., Di H.J., Moir J.L. (2013): Nitrogen losses from the soil/plant system: A review. Annals of Applied Biology, 162: 145–173.

Cochran W.G., Cox G.M. (1957): Experimental Designs. New York, John Wiley and Sons, 611.

Cormier F., Foulkes J., Hirel B., Gouache D., Moënne-Loccoz Y., Le Gouis J. (2016): Breeding for increased nitrogen-use efficiency: A review for wheat (*T. aestivum* L.). Plant Breeding, 135: 255–278.

Černý J., Balík J., Kulhánek M., Čásová K., Nedvěd V. (2010): Mineral and organic fertilization efficiency in long-term stationary experiments. Plant, Soil and Environment, 56: 28–36.

Edmeades D.C. (2003): The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: A review. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 66: 165–180.

Gaile Z., Ruza A., Kreita D., Paura L. (2017): Yield components and quality parameters of winter wheat depending on tillering coefficient. Agronomy Research, 15: 79–93.

Geleta B., Atak M., Baenziger P.S., Nelson L.A., Baltenesperger D.D., Eskridge K.M., Shipman M.J., Shelton D.R. (2002): Seeding rate and genotype effect on agronomic performance and end-use quality of winter wheat. Crop Science, 42: 827–832.

Gooding M.J., Pinyosinwat A., Ellis R.H. (2002): Responses of wheat grain yield and quality to seed rate. The Journal of Agricultural Science, 138: 317–331.

Guggenberger G., Christensen B.T., Rubaek G.H. (2000): Isolation and characterization of labile organic phosphorus pools in soils from the Askov long-term field experiments. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 163: 151–155.

Haynes R.J., Naidu R. (1998): Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: A review. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 51: 123–137.

Hejcman M., Kunzová E. (2010): Sustainability of winter wheat production on sandy-loamy Cambisol in the Czech Republic: Results from a long-term fertilizer and crop rotation experiment. Field Crops Research, 115: 191–199.

Heumann S., Fier A., Haßdenteufel M., Höper H., Schäfer W., Eiler T., Böttcher J. (2013): Minimizing nitrate leaching while maintaining crop yields: Insights by simulating net N mineralization. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 95: 395–408.

Christensen B.T. (1997): The Askov long-term field experiments. Arcives of Agronomy and Soil Science, 42: 265–278.

Islam A.K.M.S., Edwards D.G., Asher C.J. (1980): pH optima for crop growth – Results of a flowing solution culture experiment with six species. Plant and Soil, 54: 339–357.

Jaakkola A., Yli-Halla M. (2008): Thirty years of growing cereal without P and K fertilization. NJF Report, Nordic Association of Agricultural Scientists, 4: 17–19.

Johnston A.E. (1997): The value of long-term field experiments in agricultural, ecological, and environmental research. Advances in Agronomy, 59: 291–233.

Khan S.A., Mulvaney R.L., Ellsworth T.R. (2014): The potassium paradox: Implications for soil fertility, crop production and human health. Renewable Agriculture and Food Systems, 29: 3–27.

Kisić I., Mesić M., Bašić F., Butorac A., Vađić Ž. (2004): The effect of liming and fertilization on yields of maize and winter wheat. Agriculturae Conspectus Scientificus, 69: 51–57.

doi: 10.17221/703/2017-PSE

Kunzová E., Hejcman M. (2009): Yield development of winter wheat over 50 years of FYM, N, P and K fertilizer application on black earth soil in the Czech Republic. Field Crops Research, 111: 226–234.

Madaras M., Koubová M., Lipavský J. (2010): Stabilization of available potassium across soil and climatic conditions of the Czech Republic. Archives of Agronomy and Soil Science, 56: 433–449.

Madaras M., Lipavský J. (2009): Interannual dynamics of available potassium in a long-term fertilization experiment. Plant, Soil and Environment, 55: 334–343.

Mladenov N., Hristov N., Kondic-Spika A., Djuric V., Jevtic R., Mladenov V. (2011): Breeding progress in grain yield of winter wheat cultivars grown at different nitrogen levels in semiarid conditions. Breeding Science, 61: 260–268.

Rahimizadeh M., Kashani A., Zare-Feizabadi A., Koocheki A.R., Nassiri-Mahallati M. (2010): Nitrogen use efficiency of wheat as affected by preceding crop, application rate of nitrogen and crop residues. Australian Journal of Crop Science, 4: 363–368.

Richter D.D.Jr., Hofmockel M., Callaham M.A.Jr., Powlson D.S., Smith P. (2007): Long-term soil experiments: Keys to managing earth's rapidly changing ecosystems. Soil Science Society of American Journal, 71: 266–279.

Römheld V., Kirkby E.A. (2010): Research on potassium in agriculture: Needs and prospects. Plant and Soil, 335: 155–180.

Sanchez-Garcia M., Álvaroa F., Martín-Sánchez J.A., Sillero J.C., Escribano J., Royo C. (2012): Breeding effects on the genotype × environment interaction for yield of bread wheat grown in Spain during the 20th century. Field Crops Research, 126: 79–86.

Schroder J.L., Zhang H.L., Girma K., Raun W.R., Penn C.J., Payton M.E. (2011): Soil acidification from long-term use of nitrogen fertilizers on winter wheat. Soil Science Society of American Journal, 75: 957–964.

Sieling K., Stahl C., Winkelmann C., Christen O. (2005): Growth and yield of winter wheat in the first 3 years of a monoculture under varying N fertilization in NW Germany. European Journal of Agronomy, 22: 71–84.

Stephen R.C., Saville D.J., Drewitt E.G. (2005): Effects of wheat seed rate and fertiliser nitrogen application practices on populations, grain yield components and grain yields of wheat (*Triticum aestivum*). New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 33: 125–138.

Valkama E., Uusitalo R., Ylivainio K., Virkajärvi P., Turtola E. (2009): Phosphorus fertilization: A meta-analysis of 80 years of research in Finland. Agriculture, Ecosystems and Environment, 130: 75–85.

Received on November 11, 2017
Accepted on December 20, 2017
Published online on January 16, 2018

3.1.2 **Effect of chemical weed control on crop yields in different crop rotations in a long-term field trial**

*Manuscript
Click here to view linked References

Effect of chemical weed control on crop yields in different crop rotations in a long-term field trial

Markéta Mayerová [a,b*], Mikuláš Madaras [a], Josef Soukup [b]

[a] Division of Crop Management Systems, Department of Agricultural Soil Science and Pedobiology, Crop Research Institute, Drnovská 507, 161 00 Prague, Czech Republic

[b] Department of Agroecology and Biometeorology, Faculty of Agrobiology, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 129, 165 21 Prague, Czech Republic.

[*] Corresponding author. *E-mail address*: mayerova@vurv.cz (M.Mayerová).

Abstract

The study is based on data from a long-term field experiment of extent and duration seldom found in weed science. Yield losses from weed infestation of individual crops and crop rotations were studied in a field trial conducted since 1972 at two sites in the Czech Republic. The ongoing trial comprises multi-crop and simple crop rotations with 50 and 75% cereals, respectively. Three herbicide treatments were used: (1) untreated; (2) synthetic auxins (MCPA; 2,4-D; only in simple crop rotation) and (3) targeted herbicide combinations, including sulfonylureas, triazines, ureas, and synthetic auxins. Crop yields and weather data were recorded during the trial period and the effects of herbicide application on yield were determined for crop rotation. Yield losses in untreated controls increased in the following order: spring barley < winter wheat < pea < oilseed rape < potato. Because of the limited weed control spectrum, the use of synthetic auxins had lower yield effect than targeted herbicide combinations. Yields tended to increase over time in treated plots for almost all crops at the more productive Hněvčeves site, while stagnation or even decrease were observed in untreated plots. The mean treatment effect steadily increased as the experiment progressed,

raising from 4.9% in 1972-1985 to 76.9% in 2006-2016. Dependent on individual crops and crop rotation, herbicide treatment ensured 13 to 50% higher crop yields than untreated plots. Treatment with targeted herbicide combinations reduced the negative impact of simple crop rotation on weed infestation and ensured sufficient crop yields.

Keywords: crop rotation; crop yield; herbicides; long-term field trial; weather; weed population

1. Introduction

Weed infestation in crop production systems reduces both yield and quality (Hance and Holly, 1990) by competition between the crop and weeds for water, nutrients, light and carbon dioxide, and also by allelopathy (Monaco et al., 2002). Overall, weeds reduce major crop potential yields up to 34%; a greater reduction than from diseases and pests (Oerke, 2006). German studies also indicated that weeds cause the highest yield losses of all noxious organisms in conventional farming (Zwerger et al., 2004). However, crop yield loss varies greatly in different situations. Bridges (1992) compared crop losses caused by weeds in United States production systems with and without herbicides. Yield reductions were similar across different grain crops and the geographic locations in herbicide treated systems, while they varied substantially in the absence of herbicides. In temperate climates such as Northwest Europe and parts of North America, the loss is markedly lower because losses are minimised due to the common use of pesticides and good agricultural practice of the farmers. The overall loss potential is especially great in high productivity regions and in tropical and subtropical areas where weather conditions favour pest development (Oerke, 2006).

Yield losses also vary because crops have different competitive ability against weeds (van Heemst, 1985). Crop competitiveness is a genetic trait influenced by genotype, crop management, and environment (Asif et al., 2014). Barley (*Hordeum vulgare* L.) and rye (*Secale cereale* L.) are generally more competitive than wheat (*Triticum aestivum* L.) (Mason et al. 2007) while grain legumes such as pea (*Pisum sativum* L.) compete poorly with weeds in early growth stages (Corre-Hellou et al., 2011). Harker (2001) reported crop yield losses in the order of spring barley < canola (*Brassica* L. spp.) < pea in central Alberta in weedy plots compared with weed-free plots. Moreover, competitive ability and yield losses vary among cultivars and years due to both crop and weed species response to environmental conditions

(Andrew et al., 2015), and it is therefore appropriate to evaluate the long-term impact of the main influencing factors.

Asif et al. (2014) reported that species composition and weed density were the major determining factors in crop competitiveness. Some authors found a linear negative correlation between crop yield and densities of weed species or the total weed infestations (Stasinskis, 2009; Vanaga and Lapins, 2000), but non-linear models are also appropriate to predict yield losses (Ali et al., 2013).

Stasinskis (2009) presented the highest impact of herbicide use (64.1%) on winter wheat yield compared to soil tillage (9.5%) and the preceding crop (2.0%). The importance of chemical weed control increases with simplification of crop rotations and reduced soil tillage. Herbicides were identified as the main factor on increasing wheat yield in Canada and corn and soybean yields in United States (Gianessi, 2013). Similarly according to Keller et al. (2014, 2015) long-term yield increase in winter wheat and maize was possibly due to chemical weed control. Neither the progress in agrotechnology nor the introduction of high-yielding cultivars would have had significant impact on yield without effective weed control. Although reduced herbicide application may not cause short-term increase in weed infestation and yield loss (Boström and Fogelfors, 2002; Kudsk and Streibig, 2003; Kudsk, 2008; Salonen, 1993), it leads to long-term higher densities in less sensitive species and significant consequent yield losses (Hossard et al., 2014; Pallut and Moll, 2008).

Crop yield is influenced not only by agrotechnology and the use of fertilizers and pesticides, but also by site and climate conditions (Chloupek at al., 2003). Long-term field trials have enabled monitoring of temporal yield trends and assessment of factors that change slowly and depend strongly on the weather in particular years (Moss, 2004). Most Czech Republic long-term field trials have been conducted by the Crop Research Institute in Prague and have provided important information for agriculture and environmental science (Madaras

and Lipavský, 2009). Widespread use of herbicides in agriculture in the second half of the last century initiated foundation of the Herbicide Field Experiment at two sites in 1972. This trial enabled evaluation of the effect of long-term herbicides use on changes in weed populations and provided unique data on crop yields and other valuable information. Although trial data was continuously evaluated, current statistical methods and modern software now enable more complete assessment. The aim of this study was to determine yield losses caused by weeds for various crops and rotations under more than 40-year influence of different herbicide treatments. We focussed on two hypotheses while analysing the dataset from the field experiment: (1) yield is positively affected by herbicide treatment and (2) the effect of herbicides on yield is uneven across different crops.

2. Materials and Methods

2.1. Experimental site

The long-term field trial has been conducted since 1972 at two experimental stations of the Crop Research Institute in the Czech Republic; Hněvčeves (50.31487 N, 15.71612 E, sugar beet growing region) and Pernolec (49.77053 N, 12.68099 E, potato growing region). The long-term climatic and soil characteristics are listed in Table 1. The determined available nutrients of 20cm soil samples taken after crop harvest with approximately five-year intervals from each site are listed in Table S.2. Based on soil analyses, mineral fertilisers were applied to ensure adequate plant-available nutrient contents.

The trial was established in two different crop rotation systems (CR) with specific cereal percentages: (1) multi-crop CR (MCR) with 50% cereals and 50% broadleaf crops (winter wheat - oilseed rape - winter wheat - root or tuberous crops - spring barley - pea) and (2) simple CR (SCR) with 75% cereals and 25% legumes (winter wheat - spring barley- spring barley - pea). Three herbicide treatments were used: (1) untreated control; (2) synthetic auxins in simple crop rotation (MCPA; 2,4-D in cereals and bentazone in pea) and (3) targeted

herbicide combinations according to observed weed infestation. At the start of the field experiment and during the 1980s photosystem II inhibitors (especially triazines) were mostly used. Afterwards ALS inhibitors (especially sulfonylureas) prevailed in cereals and microtubule inhibitors or ACCase inhibitors in pea. Photosystem II inhibitors were mostly used for potato and synthetic auxins together with mitosis inhibitors (metazachlor) for oilseed rape. Herbicides were always applied at the 2 to 6-leaf crop stage. No other weed management was applied. The experiment was carried out as a split-plot design with five combinations of crop rotation (main plots) and herbicide treatments (sub-plots): MCR*untreated, MCR*targeted, SCR*untreated, SCR*auxins and SCR*targeted; with four replications of each combination. The $100m^2$ (10m by 10m) plots were established 10m from field boundaries and separated from each other by 1 to 2m stripes in order to avoid interactions between treatments. Field trial complied with good experimental practice (GEP) standards. Standard (optimal) crop-specific cropping practice recommended for experimental sites was conducted in all plots throughout the trial: conventional tillage up to 20-25 cm depth; N, P, K, Mg, Ca crop fertilisation according to soil analyses; fungicide and insecticide treatment when needed.

The crop cultivars were chosen for suitability to local temporal climate and soil conditions. This was based on the recommendations of the Central Institute for Supervising and Testing in Agriculture (http://eagri.cz/public/web/en/ukzuz/portal/) and their wide use in practice at certain period of time. Improved high-yielding cultivars were introduced throughout the experiment. Long-straw wheat varieties (Mironovská, Jubilar) were used at trial commencement, high-yielding short-straw varieties (Regina, Hana) were introduced after the 1980's. Varieties with powdery mildew resistance and higher grain weight per spike (Bohemia, Sakura, Sulamit) were planted from 2000. The parameters of Czech wheat varieties are described in Dvořáček et al. (2014). The original Czech Diamant spring barley variety was

used at trial commencement. Following planted varieties have had better malting quality (Jersey, Sebastian, Bojos). Semi-leafless pea varieties (Eso, Zekon, Gotik) were introduced after the 1990's. These had reduced lodging and lower yield losses from diseases. Potato varieties were not changed as often. Radka, the most widely cultivated local variety was used until the 1990's. Subsequent Ditta and Adéla varieties had higher yields and higher resistance to blight and viral diseases. Hybrid varieties of oilseed rape (Artus, NK Octans) were used after 1995.

2.2. Data collection

Weed species composition and weed density were assessed at the beginning of the trial and annually. Weed data was recorded at the 2 to 6-leaf crop stage before post-emergence herbicide application. Plant species and the numbers in four randomly placed sampling quadrates ($0.25m^2$, 0.5m by 0.5m) in each plot were identified and counted. Densities in the four squares were aggregated to provide $1m^2$ samples. To eliminate the edge effect, only the central 22 m^2 area of each experimental plot was harvested. The harvested product of grains was cleaned, dried when necessary, weighed and converted to standard moisture (14% for cereals and pea and 12% for oilseed rape). Dry matter was determined by drying until constant weight was achieved at 105°C. Potato tuber fresh matter yield was established by direct field weighing. Daily meteorological data was recorded during the trial period, with the following six descriptive meteorological characteristics selected for weather impact evaluation: total rainfall during March-June, May-June, and July, and average temperatures in May, January-February, and March-July (Figure S.1).

2.3. Statistical analysis

157 Yield data were not available for all years, so analysis was conducted on data for the five
158 most frequently cultivated crops: winter wheat, spring barley, pea, potato, and oilseed rape.
159 Temporal yield trends were determined by standard linear regression (Meloun and Militký,
160 (2004); with year the independent variable and yield per plot the dependent variable.
161 The effects of chemical weed control were evaluated using a mixed-effect linear model,
162 which was fitted for each crop rotation and crop species. Yield was transformed to a ratio
163 scale, i.e. it had a continuous characteristics and the ratio of two yield values had meaningful
164 interpretation. Since yield cannot be negative, it can only approximately be modelled using
165 the normal distribution. We used the logarithmic transformation to remove the non-negativity
166 constraint. By comparing the yields on the logarithmic scale, the model described
167 multiplicative (yield ratios) rather than additive (yield differences) effects of the experimental
168 treatment.
169 The only independent variable of interest (fixed variable) was the treatment. Additional
170 (random) variables were introduced to reflect the structure of the experiment and the fact that
171 observations were not independent (Boisgontier and Cheval, 2016). Yields from plots
172 established at the same locality were expected to be more similar than yields from plots at
173 different localities (spatial correlation). Similarly, yields obtained from the same plot in
174 subsequent years showed more agreement than when different plots were compared (temporal
175 correlation). Finally, yields obtained from plots exposed to the same weather conditions
176 (i.e. representing the same ombination of year and locality) were expected to be more similar
177 than yields obtained from plots affected by different weather patterns (spatio-temporal
178 correlation). For this reason, the models included effects of plots, of plot:locality, and
179 plot:locality:year combinations:

180 $$\log yield_{t,l,p,y} = \alpha + \beta_{t} + a_{l} + b_{l,p} + c_{l,p} + \varepsilon_{t,l,p,y},$$

where $yield_{t,l,p,y}$ – yield under the treatment *t*, at the locality *l*, at the plot *p*, in the year *y*; α – baseline yield; β_t – fixed effect of the treatment *t* on the yield; a_l – random effect of the locality *l* on the yield; $b_{l,p}$ – random effect of the plot *p* at the locality *l* on the yield; $c_{l,p}$ – random effect of the year *y* at the locality *l* on the yield; $\varepsilon_{t,l,p,y}$ – residual associated with the combination of the treatment *t*, the locality *l*, the plot *p*, and the year *y*.

In addition to the individual model per-crop, a model covering all crops was fitted for each crop rotation by converting the yields of all crops into Cereal Units (CU). This enabled assessment of weed management influence on crop yields across all crop species. The CU is based on the animal feeding value, a relevant function of agricultural products. CU conversion factor is determined by the metabolizable energy content of different agricultural products and compared to the barley benchmark (1 tonne of barley grains equals to 1 tonne CU). Methodology and CU conversion factors following Brankatschk and Finkbeiner (2014) were used to calculate the CU.

Model assumptions were then checked by visual analysis of the distribution of residuals. To assess the homoscedasticity assumption the values of the residuals with respect to the model-predicted values were plotted. Lack of evident relationship between the two measures indicates that the assumption is sound. For the model errors normality assumption, the quantiles of the residuals were graphically compared with the normal distribution quantiles. The degree of normality violation is indicated by the deviation of the obtained pattern from a straight line. Traditionally, statistical tests were used for model diagnostics. However, the visual approach is preferred by the modern statistics (Kozak and Piepho, 2018). Each model goodness-of-fit was assessed using the marginal (only fixed effects considered) and conditional (all effects considered) R^2 according to Nakagawa and Schielzeth (2013).

The fitted models enabled estimation of mean multiplicative treatment effects with their 95% confidence intervals. This dimensionless value represents a percentage difference between the yield obtained from a treated experimental plot and the yield from the untreated control.

We then assessed weather influence on observed yield patterns by Principal Component Analysis using the example of spring barley in the simple crop rotation data because this provided the greatest number of data points. To mitigate the confounding effect of weather factors and experimental treatments, a linear model describing the relationship between a random multiplicative plot effect and yield was fitted and values of residuals extracted by calculating the differences between predicted and observed yields. All analyses were conducted by STATISTICA 12 (StatSoft, Tulsa, OK, USA) and R (R, 2016).

3. Results and Discussion

3.1. Weed species composition.

The long duration of the trial enabled the observation of changes in species occurrences and densities. In 1972, the average weed density and number of different weed species before herbicide treatment were 198 plants m^{-2} of 21 species at Pernolec and 86 plants m^{-2} of 11 species at Hněvčeves. At the beginning of the trial, the following species dominated at Pernolec: *Viola arvensis* Murray, *Erophila verna* L., *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh, *Myosotis arvensis* L., *Veronica* spp. L., *Polygonum aviculare* L. and *Apera spica-venti* (L.) P.Beauv. (Table 2); and the Hněvčeves site was dominated by *Thlaspi arvense* L., *Papaver rhoeas* L., *Lamium* spp. L., *Stellaria media* (L.) Vill., *Veronica* spp. L. and *Fallopia convolvulus* (L.) Á. Löve (Table 3). A total 53 different species at Pernolec and 29 at Hněvčeves were identified over the experimental period.

In the last monitored years, the average weed density in winter wheat was significantly higher in untreated plots than in treated plots at both sites and crop rotations. Simple crop

229 rotation showed higher weediness than multi-crop rotation in both untreated and herbicide-
230 treated plots. It is in agreement with Koocheki et al. (2009) who found that rotation of sugar
231 beet-winter wheat caused 28% reduction in the weed seed bank compared to wheat
232 monoculture. Treatment with synthetic auxins affected only a limited weed spectrum and the
233 weed densities were only slightly lower than in untreated plots, while the lowest weed
234 numbers were recorded after the targeted herbicide combinations (Tables 2, 3). The role of
235 experimental site in interaction between multi-crop rotation and targeted herbicide application
236 remained unclear. Although we found a synergism of these factors at both localities, the
237 decrease of weed density was much stronger at Pernolec site with lower productivity (90%)
238 than in Hněvčeves (only 26%) compared to untreated plots. This difference between the two
239 localities can in part be explained by intensive crop management in Hněvčeves. The fields of
240 this site received high fertiliser inputs and there was excessive herbicide use during the 10
241 years that preceded the trial, therefore initial weed density was low. Changes in weed flora
242 composition were determined and described in detail in Mayerová et al. (2018). Tables 2 and
243 3 demonstrate differences in winter wheat weed community composition at the beginning of
244 the trial and the present. Major changes observed in Pernolec were: (1) poor, less competitive
245 species receded or disappeared in all treatments - *Myosotis arvensis* L., *Raphanus*
246 *raphanistrum* L., *Scleranthus annuus* L. and *Erophila verna* L.; (2) the density of competitive,
247 winter annual species increased in untreated plots - *Tripleurospermum inodorum* (L.)
248 Sch.Bip., *Centaurea cyanus* L., *Veronica* spp. L., *Spergula arvensis* L.; (3) the recorded
249 population densities in some species, such as *Apera spica-venti* (L.) P.Beauv., *Arabidopsis*
250 *thaliana* (L.) Heynh and *Stellaria media* (L.) Vill., resulted in no change in any treatment
251 during the experimental period. Major changes in Hněvčeves were: (1) increased density of
252 winter annual species in untreated controls - *Lamium purpureum* L., *Veronica* spp. L.,
253 *Stellaria media* (L.) Vill., *Papaver* spp. L., *Galium aparine* L. and (2) density increase

recorded in treated plots for the following winter and summer annual species: *Apera spica-venti* (L.) P.Beauv., *Fallopia convolvulus* (L.) Á. Löve, *Fumaria officinalis* L., *Tripleurospermum inodorum* (L.) Sch.Bip. and *Cirsium arvense* (L.) Scop.

3.2. Herbicide effects on yields

Herbicide use resulted in significantly higher yields than in untreated plots in both crop rotations and an increment of the yield on treated plot increased with time (Figure 1). This is confirmed by conditional R^2 from 0.73 to 0.94 for each crop:crop rotation model (Table 4). The yield increase varied with crop type. As Oerke (2006) and Asif et al. (2014), we found relative yield increase averaged over herbicide treatments in the following order: spring barley < winter wheat < pea < oilseed rape < potato. The average yield increases of spring barley in treated plots were: 13% (targeted, MCR), 15% (auxins) and 23% (targeted, SCR). Depending on spring barley variety, Didon and Boström (2003) reported 19 to 37% yield increase following herbicide application, but they did not confirm relationship between grain yields and barley varieties' ability to suppress weeds. In addition, Harker (2001) reported the lowest yield increase in spring barley (41%), compared to canola (67%) and pea (85%). Although some studies indicate that herbicide application rates can be reduced without negative effect on yields in more competitive crops such as spring barley (Boström and Fogelfors, 2002; Salonen, 1993), Hossard et al. (2014) estimated 5 to13% crop yield losses in winter wheat following 50% pesticide reduction (herbicides, insecticides, and fungicides). Moreover, the negative effect of long-term lack of herbicide treatment in our experiment resulted in greatly reduced barley yield.

Our experiment consistently minimised possible inappropriate impacts connected with herbicide use, including incorrect selection of herbicide and application timing. We found significant herbicide effects on winter wheat yield (Figure 1). This contrasts with Gaba et al.

(2016) who recorded no relationship between crop yields and herbicide use after one-year survey of 150 winter wheat fields on 30 French farms. Lotz et al. 1990 showed the negligible effect of herbicide application on yields of wheat grown after root crops, which is attributed to intensive weed suppression in the preceding growing season.

Our study shows that herbicide treatment affects dicotyledonous crop yields more than cereals. For example, the average potato tuber yield significantly increased by 50% in treated plots compared to untreated controls (Figure 1). Beltrano and Caldiz (1993) and Colquhoun et al. (2009) also reported tuber yield's strong dependence on weed infestation. Significant increase in tuber yield following weed suppression was also reported at 75% by Banaras (1993) and from 33 to 213% by Love et al. (1995). The average increases in pea and oilseed rape yields in treated plots in our experiment were 36 and 40%, respectively, and similar results were presented in a 2003 German survey, where estimations of average yield reductions without weed control were the highest in pea (75%) and winter wheat (50%), and the lowest were in spring cereals (20%) and potato (25%) (Zwerger et al., 2004).

Although synthetic auxin treatment alone had less effect than targeted herbicide combinations, this result was expected because synthetic auxins have a limited weed control spectrum and weed infestation was higher than in the plots with targeted herbicide combinations. High weed density of tolerant weeds, such as *Apera spica-venti*, *Veronica* spp., *Viola arvensis*, *Lamium* spp., and *Tripleurospermum inodorum* was recorded in plots treated with synthetic auxins (Tables 2, 3). In addition, targeted herbicide combination effects on yield did not differ between multi-crop and simple crop rotation, except for spring barley (Figure 1). In summary, the average yield increases expressed by the Cereal Unit in treated plots were 27% (targeted, MCR), 19% (auxins) and 30% (targeted, SCR) (Figure 1). Many authors reported a negative impact of simple crop rotation on weed infestation and troublesome weed species occurrence (Blackshaw, 1994; Cardina et al., 1998; Lejins and

304 Lejina, 2007). We confirmed this pattern in our trial; with higher weed infestation and higher
305 occurrence of species such as, *Veronica* spp, *Viola arvensis*, *Lamium* spp., *Tripleurospermum*
306 *inodorum* and *Apera spica-venti*, detected in simple crop rotations compared to multi-crop
307 rotations (Tables 2, 3). Nevertheless, the herbicide treatments suppressed weeds sufficiently
308 and ensured comparable yields.
309
310 *3.3. Trends over time*
311 Yield varied widely throughout our research. This was most likely due to fluctuating
312 annual weather (Figure S.1) because similar variability was documented in the Czech long-
313 term Crop Rotation Experiment (ICRE, Kunzová and Hejcman, 2009; Hejcman and Kunzová,
314 2010). Despite the high year-on-year variability and total increase in weed density,
315 remarkable temporal trends were observed in Hněvčeves, where treated plot yields
316 significantly increased. This increase was especially noted in spring barley (Figure 2), winter
317 wheat (Figure 3) and pea (Figure 4). In contrast, no annual yield increase was recorded for
318 herbicide treatments in Pernolec, even though the yield decrease was more marked in
319 untreated plots than treated ones (Figure 5). This temporal difference between sites can be
320 ascribed to soil fertility because Pernolec soil is more acidic and has less essential nutrients
321 than Hněvčeves (Table 1). The Pernolec soil also limits crop growth because its coarser
322 texture has less ability to maintain nutrients and water. Consequently, no increase in yield
323 was recorded there although weeds were controlled and more productive crop varieties were
324 introduced during the trial period. The ICRE results confirmed the great effect of site
325 conditions on crop yields. Here, the mean grain winter wheat yields of unfertilized treatment
326 decreased over 50 years on sandy-loamy Cambisol but increased on loamy Chernozem in the
327 Czech lowlands. This indicates the low natural fertility of sandy-loamy Cambisol (Hejcman
328 and Kunzová, 2010; Kunzová and Hejcman, 2009). In addition, Lithourgidis et al. (2006)

329 recorded high temporal variability of winter wheat yields in 25 years study in northern
330 Greece. They also recorded the great effect of soil type, where lower temporal variability of
331 yields occurred in clay loam soils than in loam soils. These effects could contribute to both
332 the greater annual variability and yield decrease over time in sandy loam soil at the Czech
333 Pernolec locality. Here, Pernolec is located in the rain shadow of Český Les mountains; with
334 resultant lower total rainfall than other national areas at similar altitude (Hrnčiarová et al.,
335 2009). This adds to reduced crop yields.

336 Keller et al. (2014, 2015) reported gradual long-term yield increases in winter cereals and
337 maize when weeds are controlled by herbicides, but no significant yield trends were detected
338 in the untreated control. Our crop rotations at both Hněvčeves and Pernolec proved that the
339 yield of investigated untreated crop had either stable or declining trend with no significant
340 yield changes recorded during the course of the experiment. Even after adopting the latest
341 agrotechnology including high-yielding cultivars of winter wheat (Elly,Sakura, Bohemia),
342 spring barley (Bojos, Sebastian) and pea (Eso, Zekon), no significant yield increase occurred
343 without effective weed control and ensuring sufficient soil nutrient reserves. Chloupek et al.
344 (2004) documented that mean yields in common crops increased from 0.76% to 1.53%
345 annually over 75 years in the Czech Republic. They also reported increased yield stability
346 over time, with lower dependence on individual site annual weather because of improved
347 high-yielding varieties, more suitable pesticides and mechanisation.

348 The gradual linear increase in multiplicative treatment effect recorded at the Hněvčeves
349 site (R^2 = 0.45), especially over the last 15 years, was an interesting phenomenon in our
350 research. The mean treatment effect steadily increased as the experiment progressed, raising
351 from 4.9% in 1972-1985 to 76.9% in 2006-2016 (Figure 6). This increase was due to
352 maximising yield potentials of the treated plots (Figures 2, 3 and 4), while yields in control
353 plots stagnated due to density of high competitive weed species, such as *Apera spica-venti*,

354 *Tripleurospermum inodorum*, *Veronica* spp., and *Centaurea cyanus* in Pernolec; and *Sinapis*
355 *alba*, *Stellaria media*, and *Galium aparine* in Hněvčeves. We suspect that the improvements
356 are also due the genetic progress taking place in these years. The newly introduced varieties
357 exhibited increasing yield potential, which could be expressed under the herbicide protection.
358 We further predict that the gradual increase in average temperatures is going to result in better
359 crop performance in properly treated plots. Chloupek et al. (2004) reported significant
360 increase of average temperature from 1920 to 2000 in the Czech Republic; with 0.087°C
361 annual increase over the last monitored decade. Moreover, mild winters can also exert higher
362 weed pressure of winter annual species, such as *Apera spica-venti*, *Tripleurospermum*
363 *inodorum*, *Veronica* spp., *Lamium* spp., in untreated plots (Figure S.1).
364
365 *3.4. Influence of climatic conditions*
366 Principal Component Analysis of climate effects on spring barley yield variability failed to
367 provide convincing patterns and showed low signal-to-noise ratio (Figures S.3, S.4). Our
368 findings are in contrast with Lundkvist and Fagerberg (1996) who found that model-estimated
369 spring barley yield variation was strongly influenced by weather conditions. On the other
370 hand, Tamm (2003) reported very low influence of weather conditions on spring barley yield
371 in European spring barley varieties. While weather influenced crops in occasional events,
372 these effects often could not be captured by mean temperature or total rainfall parameters; and
373 the significance of weather impact on crop yield was most likely reduced by effects from
374 other explanatory variables such as herbicide treatment, soil conditions or crop species and
375 varieties. Kieloch and Weber (2015) reported that soil properties affected yield variability of
376 barley varieties more than weather conditions, and that the sensitivity of individual varieties
377 differed. Křen et al. (2015) reported differences in annual yield stability in several spring
378 barley varieties. Weather and variety effects cannot be separated in our trial because we used

379 different barley varieties and each variety responds differently to soil and climate conditions.
380 For example, the Bojos variety has higher plasticity to environmental conditions than the
381 Sebastian variety (Křen et al. 2015). We consider that insignificant weather influence on
382 barley yields is caused by the different abilities of spring barley cultivars to compensate for
383 negative climate impacts. Higher spring barley multiplicative treatment effect (> 20%),
384 however, was observed more often in years with higher January and February temperatures,
385 and mild winters very likely promoted earlier germination from soil seed bank and higher
386 initial weed growth. Untreated controls were consequently subjected to greater competition
387 from weeds such as *Stellaria media* and *Veronica* spp. Many previously emerged weed plants
388 become more competitive than plants emerging after spring cultivation (Håkansson, 2003).
389
390 **4. Conclusions**
391 The study provides a comprehensive analysis of yield trends for major crops grown in diverse
392 crop rotations under long-term influence of various herbicide strategies. The main value of the
393 study lies in its extraordinarily long duration, which enabled a precise quantification of
394 chemical weed control effect over the decades of development in the fields of breeding and
395 technology. Although the effect of chemical weed control has been being recently questioned,
396 our analysis of the long yield time series clearly shows that herbicide treatments ensure the
397 increasing yield potential of all investigated crops. While in plots treated with herbicides
398 yields increased over time for almost all crops both in simple and multi-crop rotation, yield
399 stagnation or even decrease were observed in untreated plots. The largest yield difference
400 between treated and untreated plots was found in broadleaf crops, which are less competitive
401 at early growth stages. A lower, yet still very significant, effect was obtained for cereals.
402 Herbicide treatment had a stronger effect on yield in the simple crop rotation, where weeds
403 occurred at higher densities. This difference should be accounted for while combining simpler

herbicide strategies with simplified crop rotations because of the long-term risk of weed density increase and shifting of tolerant weed species.

5. Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Agriculture of the Czech Republic, projects Nos. RO0417 and QJ1610547. We thank Dr Raymond J. Marshall for language review of this article.

6. References

Ali A, Streibig JC, Andreasen C (2013) Yield loss prediction models based on early estimation of weed pressure. Crop Prot 53:125-131

Andrew IKS, Storkey J, Sparkes DL (2015) A review of the potential for competitive cereal cultivars as a tool in integrated weed management. Weed Res 55:239-248

Ali A, Streibig JC, Andreasen C (2013) Yield loss prediction models based on early estimation of weed pressure. Crop Prot 53:125-131

Asif M, Iqbal M, Randhawa HM, Spaner D (2014) Managing and Breeding Wheat for Organic Systems. Springer International Publishing. 76 p

Banaras M (1993) Impact of weed competition on potato production. Pakistan J Agric Res 14:64-71

Beltrano J, Caldiz DO (1993) Effects of johnsongrass (*Sorghum halapense* L.Per.) densities on potato (*Solanum tuberosum* L.) yield. Pesqui Agropecu Bras 28:21-24

Blackshaw RE (1994) Rotation affects downy brome (*Bromus tectorum*) in winter wheat (*Triticum aestivum*). Weed Technol 8:728-732

428 Boisgontier MP, Cheval B (2016) The anova to mixed model transition. Neurosci Biobehav
429 R 68: 1004-1005
430 Böstrom U, Fogelfors H (2002) Long-term effects of herbicide-application strategies on
431 weeds and yield in spring-sown cereals. Weed Sci 50:196-203
432 Brankatschk G, Finkbeiner M (2014) Application of the Cereal Unit in a new allocation
433 procedure for agricultural life cycle assessments. J Clean Prod 73:72-79
434 Bridges DC, ed (1992) Crop losses due to weeds in the United States. Lawrence KS: Weed
435 Science Society of America. 403 p
436 Cardina J, Webster TM, Herms CP (1998) Long-term tillage and rotation effects on soil
437 seedbank characteristics. Asp Appl Biol 51:213-220
438 Carter MR (1993) Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science,
439 Lewis Publishers, Boca Raton. 195 p
440 Chloupek O, Hrstkova P, Schweigert P (2004) Yield and its stability, crop diversity,
441 adaptability and response to climate change, weather and fertilisation over 75 years in the
442 Czech Republic in comparison to some European countries. Field Crops Res 85: 167-190
443 Colquhoun JB, Konieczka CM, Rittmeyer RA (2009) Ability of potato cultivars to tolerate
444 and suppress weeds. Weed Technol 23:287-291
445 Corre-Hellou G, Dibet A, Hauggaard-Nielsen H, Crozat Y, Gooding M, Ambus P, Dahlmann
446 C, von Fragstein P, Pristeri A, Monti M, Jensen ES (2011) The competitive-ability of pea-
447 barley intercrops against weeds and the interaction with crop productivity and soil N
448 availability. Field Crop Res 122:264-272
449 Didon UME, Boström U (2003) Growth and development of six barley (*Hordeum vulgare*
450 ssp. *vulgare* L.) cultivars in response to a model weed (*Sinapis alba* L.). J Agro Crop Sci
451 189:409-417

452 Dvořáček V, Hermuth J, Dotlačil L, Prohasková A, Hauptvogel P (2014) Changing
453 parameters of Czechoslovak obsolete and modern bread wheat cultivars (*Triticum aestivum*
454 L.) over 90 years. Genet Resour Crop Evol 61: 1159-1171
455 Gaba S, Gabriel E, Chadœuf J, Bonneu F, Bretagnolle V (2016) Herbicides do not ensure for
456 higher wheat yield, but eliminate rare plant species. Sci Rep 6:30112
457 Gianessi L (2013) The increasing importance of herbicides in worlwide crop production. Pest
458 Manag Sci 69:1099-1105
459 Håkansson S (2003) Weeds and Weed Management on Arable Land. CABI Publishing. Oxon.
460 274 p
461 Hance AJ, Holly K (1990) Weed Control Handbook: Principles. Blackwell Scientific
462 Publications. Oxford. 582 p
463 Harker KN (2001) Survey of yield losses due to weeds in central Alberta. Can J Plant Sci
464 81:339-342
465 van Heemst HDJ (1985) The influence of weed competition on crop yield. Agr Syst 18:81-93
466 Hejcman M, Kunzová E (2010) Sustainability of winter wheat production on sandy-loamy
467 Cambisol in the Czech Republic: Results from a long-term fertilizer and crop rotation
468 experiment. Field Crops Res 15: 191-199
469 Hossard L, Philibert A, Bertrand M, Colnenne-David C, Debaeke P, Munier-Jolain N,
470 Jeuffroy MH, Richard G, Makowski D (2014) Effects of halving pesticide use on wheat
471 production. Sci Rep 4:4405
472 Hrnčiarová T, Mackovčin P, Zvara I, et al. (2009) Landscape atlas of the Czech Republic. [In
473 Czech:Atlas krajiny České republiky]. Ministry of the Czech Republic, Praha. 331 p
474 Keller M, Böhringer N, Möhring J, Rueda-Ayala V, Gutjahr C, Gerhards R (2014) Long-term
475 changes in weed occurrence, yield and use of herbicides in maize in south-western

476 Germany, with implications for the determination of economic thresholds. Weed Res
477 54:457-466
478 Keller M, Böhringer N, Möhring J, Rueda-Ayala V, Gutjahr C, Gerhards R (2015) Changes in
479 weed communities, herbicides, yield levels and effect of weeds on yield in winter cereals
480 based on three decades of field experiments in south-western Germany. Gesunde Pflanzen
481 67:11-20
482 Kieloch R, Weber K (2015) Influence of different herbicides on the performance of spring
483 barley (*Hordeum vulgare*) cultivars in Lower Silesia Region, Poland. Int J Agric Biol 17:
484 181-186
485 Koocheki A, Nassiri M, Alimoradi L, Ghorbani R (2008) Effect of cropping systems and crop
486 rotations on weeds. Agron Sustain Dev 29: 401-408
487 Kozak M, Piepho, HP (2018) What's normal anyway? Residual plots are more telling than
488 significance tests when checking ANOVA assumptions. J Agron Crop Sci 204: 86-98.
489 Křen J, Klem K, Svobodová I, Míša P, Lukas V (2015) Influence of sowing, nitrogen
490 nutrition and weather conditions on stand structure and yield of spring barley. Cereal Res
491 Commun 43: 326-335.
492 Kudsk P, Streibig JC (2003) Herbicides – a two-edged sword. Weed Res 43: 90-102
493 Kudsk P (2008) Optimising herbicide dose: a straightforward approach to reduce the risk of
494 side effects of herbicides. Environmentalist 28:49-55
495 Kunzová E, Hejcman M (2009) Yield development of winter wheat over 50 years of FYM, N,
496 P and K fertilizer application on black earth soil in the Czech Republic. Field Crops Res
497 111: 226-234.
498 Lejins A, Lejina B (2007) The grain crop yield in different crop rotation and efficiency of
499 herbicides and fungicides treatment. Pages 125-131 in Proceeding of the 6th International

500 Scientific and Practical Conference on Environment, Technology, Resources. Noviks G:
501 Rezekne Higher Educ Ins-Rezeknes Augstskola.
502 Lithourgidis AS, Damalas CA, Gagianas AA (2006) Long-term yield patterns for continuous
503 winter wheat cropping in northern Greece. Eur J Agron 25: 208-2014
504 Lotz LAP, Kropff MJ, Groeneveld MW (1990) Modelling weed competition and yield losses
505 to study the effect of omission of herbicides in winter wheat. Neith J Agri Sci 38: 711-718.
506 Love SL, Eberlein CV, Stark JC, Bohl WH (1995) Cultivar and seedpiece spacing effects on
507 potato competitiveness with weeds. Am Potato J 72:197-213
508 Lundkvist A, Fagerberg B (1996) Yield variation in spring barley as influenced by weather
509 conditions at sub-normal herbicide doses. Sved J Agri Res 26: 81-90
510 Madaras M, Lipavský J (2009) Interannual dynamics of available potassium in a long-term
511 fertilization experiment. Plant Soil Environ 55: 334-343
512 Mason H, Navabi A, Frick B, O´Donovan J, Spaner D (2007) Cultivar and seeding rate effects
513 on the competitive ability of spring cereals grown under organic production in northern
514 Canada. Agron J 99:1199-1207
515 Meloun M, Militký J (2004) Statistical analysis of experimental data [In Czech:Statistická
516 analýza experimentálních dat]. Academia. Praha. 937 p
517 Mayerová M, Mikulka J, Kolářová M, Soukup (2017) Changes in weed community
518 composition in a long-term trial with different crop rotations and herbicide treatments.
519 Julius-Kühn-Archiv. DOI 10.5073/jka.2013.443.000
520 Monaco TJ, Weller SC, Ashton FM (2002) Weed Science: principles and practices. New
521 York: John Wiley & Sons, Inc. 671 p
522 Moss SR (2004) The Broadbalk long-term experiment at Rothamsted: what has it told us
523 about weeds? Weed Sci 52: 864-873
524 Nakagawa S, Schielzeth H (2013) A general and simple method for obtaining R2 from
525 generalized linear mixed-effects models. Methods Ecol Evol 4: 133-142

526 Oerke EC (2006) Crop losses to pests. J Agr Sci 144:31-43

527 Pallut B, Moll E (2008) Long-term effects of reduced herbicide doses on weed infestation and
528 grain yiled of winter cereals in a 12-year long-term trial. J Plant Dis Protect 21:501-508

529 R (2016): R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for
530 Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/

531 Salonen J (1993) Reducing herbicide use in spring cereal production. Agricultural Science in
532 Finland 2:7-40

533 Stasinskis E (2009) Effect of proceeding crop, soil tillage and herbicide application on weed
534 and winter yield. Agron Res 7:103-112

535 Tamm Ü (2003) The variations of agronomic characteristics of European malting barley
536 varieties. Agron Res 1:99-103

537 Vanaga I, Lapins D (2000) Relationships between weed infestation and yield in winter wheat
538 sowings. Transaction of the Estonian Agricultural University 209:227-229

539 Zwerger P, Malkomes HP, Nordmeyer H, Söchting HP, Verschwele A (2004)
540 Unkrautbekämpfung: Gegenwart und Zukunft – aus deutscher Sicht. Weed control:
541 presence and future – the German view. Z Pflanzenk und Pflanzen 19:27-38

542

543 Table 1. Experimental climatic and soil characteristics, with available nutrients measured by

544 Mehlich III extraction followed Carter (1993) (average values over the experimental period).

Experimental site	**Altitude**	**Average annual temperature**	**Average annual rainfall**	**Soil Classification**	**pH (KCl)**	**pH (H_2O)**	**$Ca_{avail.}$**	**$P_{avail.}$**	**$K_{avail.}$**	**$Mg_{avail.}$**
	m	°C	mm				mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}
Hněvčeves	265	8.2	573	Haplic Luvisol on loess, clay-loam	6.06	6.81	2339	99.9	272.3	241.3
Pernolec	530	7.1	559	Cambisol on orthogneiss, sandy loam	5.09	6.14	1300	60.0	91.6	79.5

545

546

Table 2. Weed species composition at Pernolec in winter wheat at the beginning of the field trial in 1972 compared to 2014 and 2015. Average No. of plants m^{-2} (Avg.) and standard deviation (SD) for the most frequent species; "-" species not recorded. The total includes the average No. of all plants m^{-2} for all weed species, including those not listed in the table.

	1972		**2015**						**2014**			
Weed species	**trial beginning**		**simple crop rotation**						**multi – crop rotation**			
			untreated		**auxins**		**targeted**		**untreated**		**targeted**	
	Avg.	SD	Avg.	SD	Avg.	SD	Avg.	SD	Avg.	SD	Avg.	SD
Viola arvensis	101	17.4	18	6.4	33	7.2	27	7.3	3	4.2	2	3.0
Erophila verna	20	3.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Arabidopsis thaliana	16	2.7	10	9.9	5	5.9	-	-	37	37.7	-	-
Apera spica-venti	13	3.4	25	10.1	28	10.5	10	4.8	37	24.7	4	4.1
Veronica spp.	10	6.0	50	20.2	47	16.1	34	8.5	17	18.4	2	1.4
Myosotis arvensis	10	3.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Polygonum aviculare	9	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Galeopsis tetrahit	2	1.3	< 1	0.3	-	-	< 1	0.7	7	7.5	-	-
Spergula arvensis	2	2.1	6	9.4	3	3.7	1	1.4	17	31.4	-	-
Scleranthus annuus	2	1.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fallopia convolvulus	1	0.5	< 1	0.3	-	-	< 1	0.7	1	1.0	< 1	1.0
Tripleurospermum inodorum	1	0.7	65	29.2	35	20.6	6	6.0	53	42.8	1	2.6
Stellaria media	1	0.9	4	2.8	3	3.5	1	1.4	2	1.9	-	-
Centaurea cyanus	1	0.7	22	12.3	10	2.7	1	1.4	22	5.0	3	2.4
Raphanus raphanistrum	1	0.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lamium spp.	-	-	11	3.8	11	4.0	3	3.6	5	5.9	-	-
Fumaria officinalis	-	-	8	10.8	11	11.8	3	3.0	3	3.9	-	-
Papaver spp.	-	-	11	10.0	7	6.5	1	0.7	8	11.2	< 1	1.0
Thlaspi arvense	-	-	5	4.9	2	1.7	1	1.3	29	10.9	1	1.0
Total	198	12.4	186	37.5	152	21.6	104	10.4	152	39.1	16	7.8

552 Table 3. Weed species composition at Hněvčeves in winter wheat at the beginning of the field
553 trial in 1972 compared to 2016. Average No. of plants m^{-2} (Avg.) and standard deviation
554 (SD) for the most frequent species; "-" species not recorded. The total includes the average
555 No. of all plants m^{-2} for all weed species, including those not listed in the table.

	1972		**2016**						**2016**			
Weed species	**trial beginning**		**simple crop rotation**						**multi – crop rotation**			
			untreated		**auxins**		**targeted**		**untreated**		**targeted**	
	Avg.	SD	Avg.	SD	Avg.	SD	Avg.	SD	Avg.	SD	Avg.	SD
Thlaspi arvense	37	2.2	8	2.9	4	2.6	4	2.1	8	2.7	8	2.2
Papaver spp.	9	3.4	23	6.6	9	5.1	13	8.6	23	4.2	20	6.2
Lamium spp.	7	0.7	57	18.2	48	5.2	25	3.7	38	10.3	13	2.3
Stellaria media	6	4.9	26	3.9	20	4.7	7	1.9	30	5.6	10	5.2
Veronica spp.	5	0.9	57	13.6	58	6.4	72	14.7	26	9.2	42	9.4
Fallopia convolvulus	4	0.8	-	-	-	-	-	-	1	1.7	9	6.2
Matricaria chamomilla	4	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Galium aparine	2	0.8	14	5.1	4	1.8	2	1.6	26	5.9	4	2.8
Viola arvensis	-	-	1	0.4	1	1.0	1	0.4	1	1.0	4	2.3
Cirsium arvense	-	-	3	2.5	5	2.9	4	1.9	7	3.3	1	0.9
Vicia spp.	-	-	1	0.8	-	-	< 1	0.4	5	3.2	-	-
Sinapis alba	-	-	25	7.7	31	5.5	23	5.1	37	2.7	32	6.8
Fumaria officinalis	-	-	3	1.1	16	3.4	6	1.7	4	1.1	6	3.5
Tripleurospermum inodorum	-	-	-	-	1	0.5	-	-	2	1.1	5	4.0
Apera spica-venti	-	-	3	3.3	4	3.5	8	3.9	1	1.7	4	4.5
Total	86	10.1	221	34.9	201	9.3	163	17.9	209	16.5	155	22.4

556

557

558 Table 4. R^2 values expressing goodness-of-fit for each model (MCR: multi-crop rotation;
559 SCR: simple crop rotation).

crop	crop rotation	**marginal R^2**	**conditional R^2**
spring barley	SCR	0.0687	0.8173
	MCR	0.0304	0.8844
winter wheat	SCR	0.044	0.9183
	MCR	0.0554	0.9337
oilseed rape	SCR	0.0586	0.983
	MCR	0.0455	0.99
pea	SCR	0.051	0.7295
	MCR	0.0795	0.8765
potato	SCR	0.2324	0.8212
Cereal Unit	SCR	0.0456	0.8617
	MCR	0.0428	0.9068

560

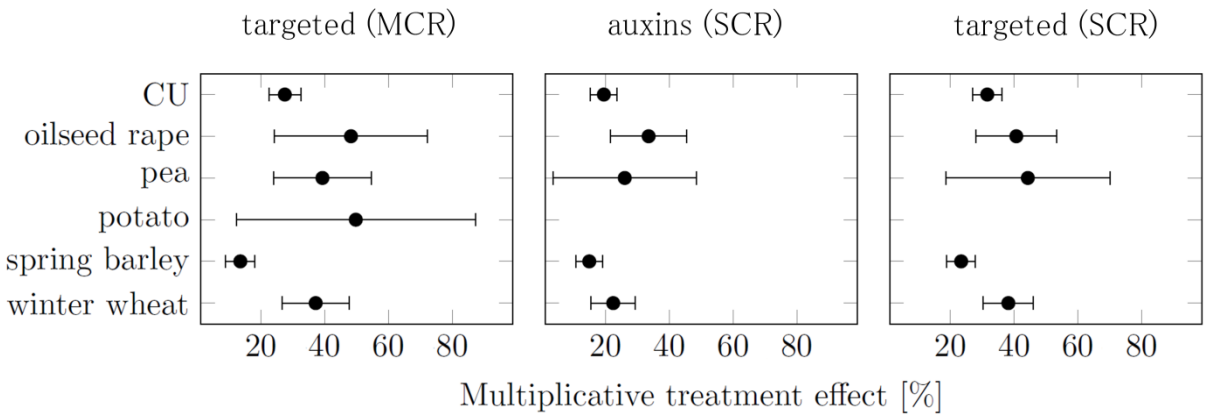


Figure 1. Relative yield increases in plots treated by auxins and targeted herbicide combinations compared to untreated controls expressed by multiplicative treatment effect ± 95% confidence intervals for the entire 1972-2015 investigation period (MCR: multi-crop rotation; SCR: simple crop rotation; CU: Cereal Units).

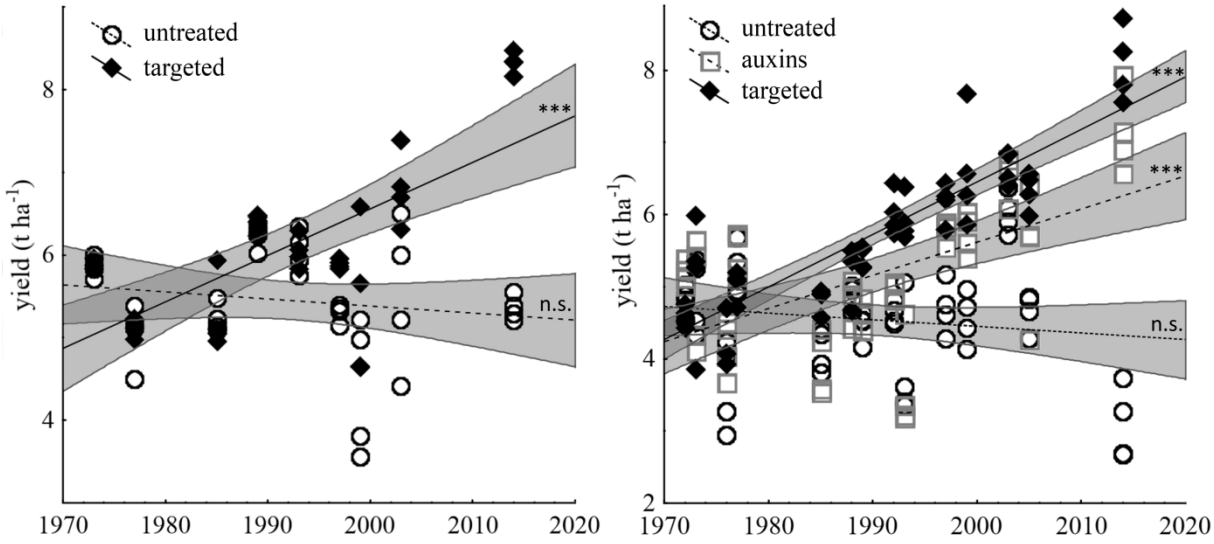


Figure 2. Trends over time for Hněvčeves spring barley yields in multi-crop (left) and simple (right) crop rotation; average annual yields ± 95% confidence interval. Level of statistical significance: *** P<0.001; n.s. - no significant.

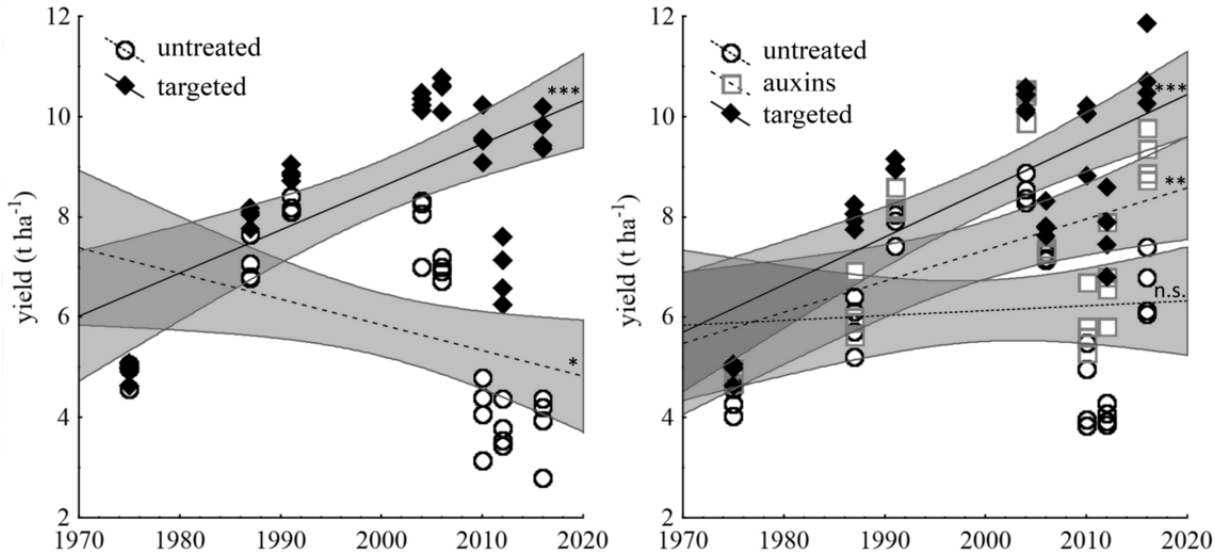


Figure 3. Trends over time for Hněvčeves winter wheat yields in multi-crop (left) and simple (right) crop rotation; average annual yields ± 95% confidence interval. Levels of statistical significance: * P<0.05; ** P<0.01; *** P<0.001; n.s. - no significant.

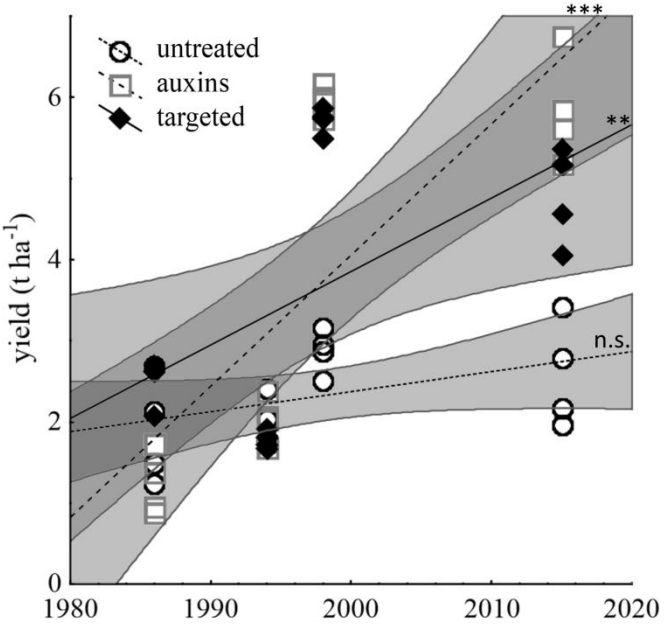
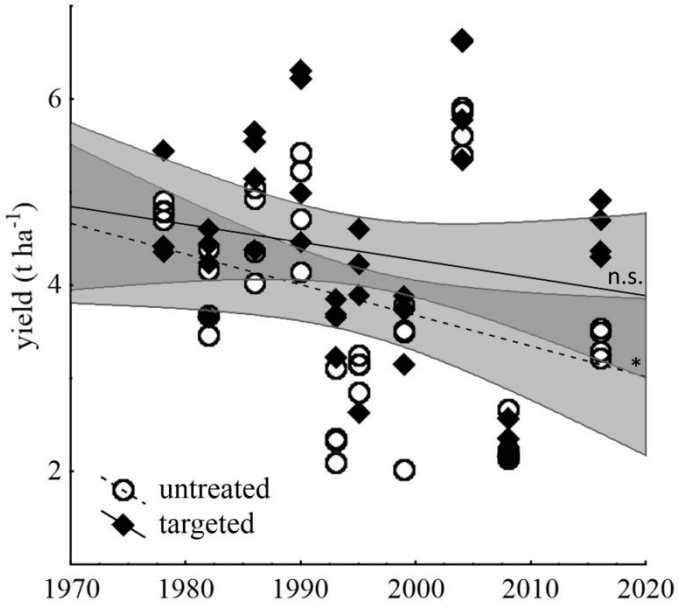


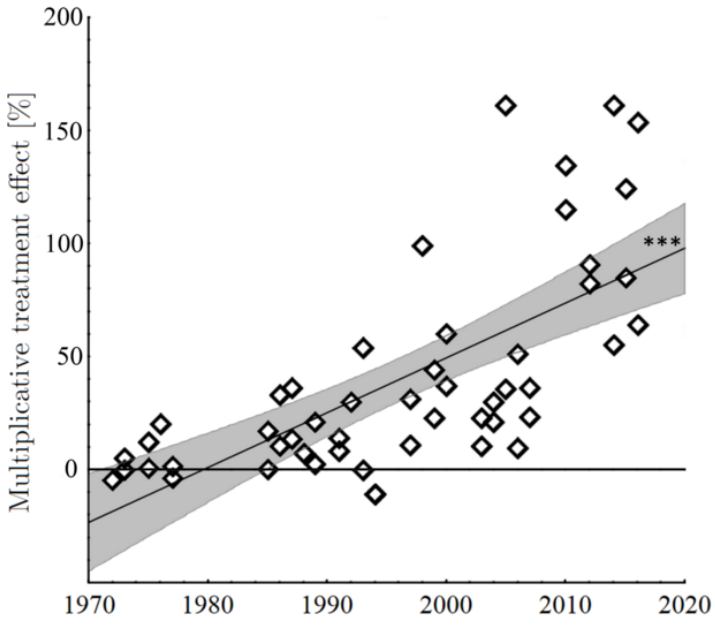
Figure 4. Trends over time for Hněvčeves pea yields in simple crop rotation; average annual yields ± 95% confidence interval. Levels of statistical significance: ** P<0.01; *** P<0.001, n.s. - no significant.



583

584 Figure 5. Trends over time for Pernolec spring barley yields in multi-crop rotation; average
585 annual yields ± 95% confidence interval. Level of statistical significance: * P<0.05; n.s. - no
586 significant.

587



588

589 Figure 6. Time trend of the relative increase of yields at treated plot s compared to untreated
590 controls (multiplicative treatment effect) for all investigated crops in Hněvčeves (both crop
591 rotations). Level of statistical significance: *** P<0.001.

Title: Effect of chemical weed control on crop yields in different crop rotations in a long-term field trial Crop Protection

Dear Mrs. Markéta Mayerová,

I am pleased to confirm that your paper "Effect of chemical weed control on crop yields in different crop rotations in a long-term field trial" has been accepted for publication in Crop Protection.

Comments from the Reviewers can be found below.

Your accepted manuscript will now be transferred to our production department and work will begin on creation of the proof. If we need any additional information to create the proof, we will let you know. If not, you will be contacted again in the next few days with a request to approve the proof and to complete a number of online forms that are required for publication.

Thanks for your interest in Crop Protection.

Sincerely,

Chaoxian Zhang, Ph.D.
Receiving Editor
Crop Protection

Comments from the Editors and Reviewers:

Reviewer #1:
As far I see in the text, the authors did all necessary correction. It may publish without any changes.

Ms. Ref. No.: CROPRO-D-17-01151R2
Title: Effect of chemical weed control on crop yields in different crop rotations in a long-term field trial Crop Protection

Dear Mrs. Markéta Mayerová,

A final disposition of "Accept" has been registered for the above-mentioned manuscript.

Kind regards,

Chaoxian Zhang, Ph.D.
Receiving Editor
Crop Protection

3.1.3 **Dlouhodobý efekt herbicidního ošetření na výnos v osevních sledech**

Dlouhodobý efekt herbicidního ošetření na výnos v osevních sledech

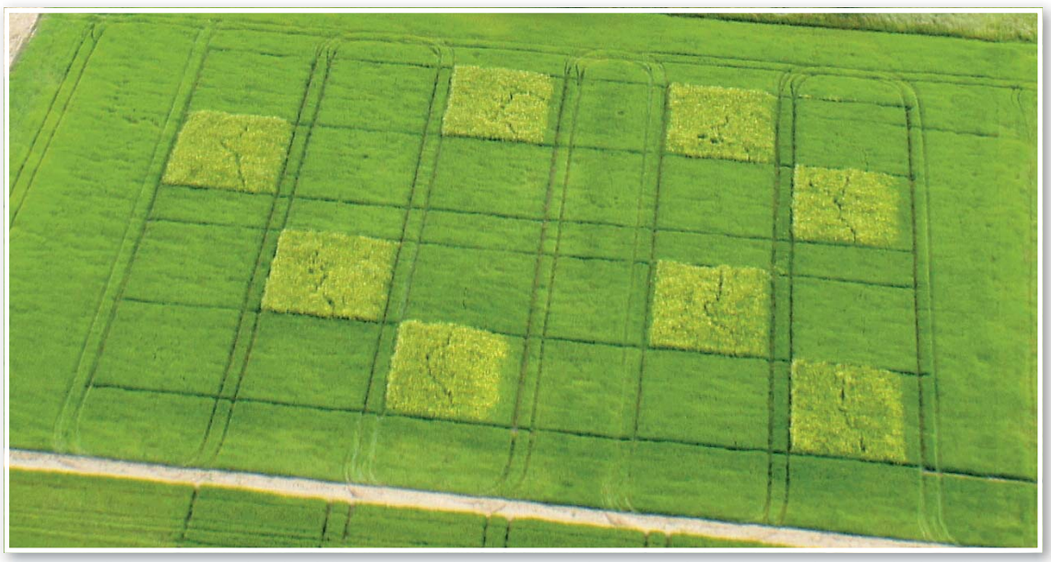
Souhrn: Vliv herbicidního ošetření na výnos plodin byl sledován v dlouhodobém polním pokusu založeném od roku 1972 na dvou pokusných stanicích Výzkumného ústavu rostlinné výroby, v. v. i. Pokus je rozdělen na dvě části podle uplatňovaných osevních postupů: zjednodušený osevní postup se 75 % obilnin a střídavý s 50 % obilnin včetně okopanin. V pokusu jsou uplatňovány tři varianty ošetření proti plevelům: (1) neošetřená kontrola, (2) růstové herbicidy (pouze u zjednodušeného osevního sledu), (3) cílené ošetření kombinací herbicidů. Byl zjištěn pozitivní vliv dlouhodobého ošetření na výnos, přičemž výnosové ztráty v plodinách stoupaly v tomto pořadí: jarní ječmen < ozimá pšenice < hrách < ozimá řepka < brambory. Byl prokázán stoupající trend výnosu v čase na ošetřených variantách na stanici Hněvčeves, na neošetřených kontrolách výnosy stagnovaly nebo klesaly.
Klíčová slova: herbicidní ošetření, dlouhodobý pokus, plevele, výnos plodin

Long-term effect of herbicide use on crop yields in crop rotations

Summary: The impact of herbicide application on crop yield losses was studied in a long-term field experiment conducted since 1972 at experimental sites of the Crop Research Institute in the Czech Republic. The ongoing trial comprises multi-crop and simple crop rotations with 50 and 75 % cereals, respectively. Three herbicide treatments were used: (1) untreated; (2) synthetic auxins (only in simple crop rotation) and (3) targeted herbicide combinations. Yield losses in untreated controls increased in the following order: spring barley < winter wheat < pea < oilseed rape < potato. Increasing yield trends were observed in treated variants only at the more productive Hněvčeves site, and no significant yield changes were recorded in untreated controls.
Keywords: herbicide treatment, long-term trial, crop yield, weeds

Výnos plodin a jeho kvalita jsou negativně ovlivňovány mnoha abiotickými a biotickými faktory. Mezi nejvýznamnější škodlivé činitele patří plevele, které se podílejí na snižování výnosů až o 34 % (Oerke 2006). Výnosové ztráty lze snižovat účinnou regulací zaplevelení, která zahrnuje jednak preventivní opatření (střídání plodin, zpracování půdy), jednak přímé metody regulace, a to mechanické a chemické (Mikulka et Kneifelová 2005). Některé práce např. potvrzují, že v porovnání se zpracováním půdy a předplodinou je výnos pšenice nejvíce ovlivněn použitím herbicidů (Stasinskis 2009). Význam herbicidní ochrany plodin výrazně posílilo zjednodušování osevních sledů a zavádění minimalizačních technologií.

Jednotlivé plodiny mají rozdílné schopnosti konkurovat plevelným druhům, proto i výnosové ztráty v důsledku zaplevelení mohou být pro různé plodiny odlišné (van Heemst 1985). Obecně platí, že nejlépe plevelům konkurují obilniny, zejména ječmen a žito, nejmenší konkurenční schopnost mají luskoviny a okopaniny. Konkurenceschopnost plodin je ovlivněna hustotou zaplevelení a složením plevelového společenstva (Asief et al. 2014). Existuje mnoho prací, které se zabývají vlivem různých faktorů na výnos plodin, ale jejich výsledky vycházejí



Obr. 1 – Hněvčeves, porost jarního ječmene v roce 2014. Na leteckém snímku je dobře patrné zaplevelení hořčicí na neošetřených kontrolách

většinou z pokusů krátkodobého charakteru. Dlouhodobý herbicidní pokus založený na dvou pokusných stanicích Výzkumného ústavu rostlinné výroby, v. v. i., umožnil sledovat efekt herbicidního ošetření v dlouhodobém horizontu více než 40 let.

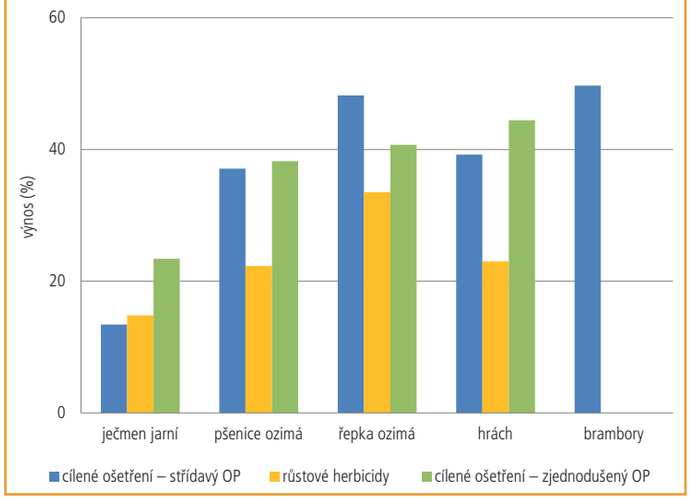
Materiál a metodika

Dlouhodobý herbicidní pokus byl založen v roce 1972 na dvou pokusných stanicích VÚRV, v. v. i. – Pernolec (bramborářská výrobní oblast) a Hněvčeves (řepařská výrobní oblast) obr. 1, 2. Pokus je rozdělen na dvě části podle uplatňovaných osevních postupů (OP): střídavý osevní postup s 50% podílem obilnin a 50% podílem dvouděložných plodin; zjednodušený osevní postup se 75% podílem obilnin a 25% podílem luskovin. Byly zvoleny tři varianty ošetření: (1) kontrola bez ošetření; (2) ošetření růstovými herbicidy – MCPA, 2,4-D (pouze u zjednodušeného osevního postupu); (3) cílené ošetření kombinací herbicidů (nejčastěji sulfonylmočoviny, triaziny, močoviny a růstové herbicidy) podle aktuálního zaplevelení v pěstované plodině. Každá varianta má čtyři opakování, velikost parcelky je 100 m^2 (10 x 10 m), přičemž sklizňová parcela je 22 m^2. Jednotlivé parcelky jsou od sebe odděleny 2–3m izolačními pásy. Na všech variantách je prováděna stejná agrotechnika (zpracování půdy, hnojení, fungicidy) doporučená pro dané lokality. Během sledovaného období (1972–2016) bylo prováděno hodnocení plevelového spektra v jarním období před aplikací herbicidů (počet jednotlivých plevelných druhů/m^2).

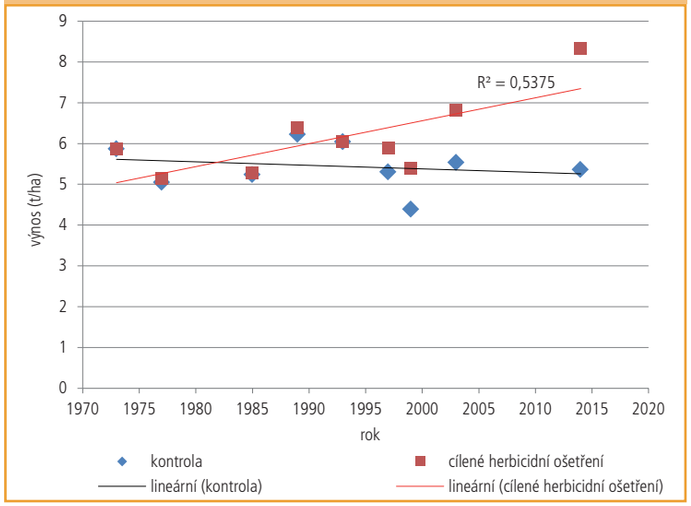
Obr. 2 – Pernolec, porost ozimé pšenice v roce 2014, neošetřená kontrola

Obr. 3 – Pernolec, porost ozimé pšenice v roce 2014, parcela s cíleným herbicidním ošetřením

Graf 1 – Procentuální nárůst průměrného výnosu ošetřených variant oproti kontrole



Graf 2 – Výnosové trendy u jarního ječmene, střídavý osevní postup, Hněvčeves



Výsledky a diskuse

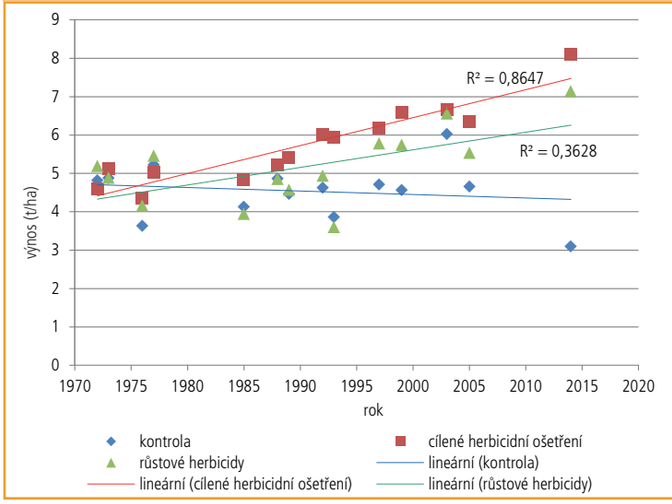
Na počátku pokusu byla průměrná hustota zaplevelení v pšenici ozimé 198 rostlin/m² (21 druhů) v Pernolci a 86 rostlin/m² (11 druhů) v Hněvčevsi. V průběhu pokusu bylo pozorováno celkem 53 plevelných druhů v Pernolci a 29 v Hněvčevsi. Poslední hodnocení v pšenici ozimé, které probíhalo v letech 2014–2016, prokázalo významně nižší zaplevelení na parcelách cíleně ošetřovaných kombinací herbicidů než na kontrole u obou osevních postupů na obou lokalitách (tabulka). Na neošetřené kontrole bylo větší zaplevelení u zjednodušeného osevního postupu. Mnoho autorů (Cardina et al. 1998; Lejins et Lejina 2007) uvádí negativní vliv zjednodušeného osevního postupu na zaplevelení a zvýšený výskyt obtížných plevelů.

Hodnocení výnosů napříč roky a stanicemi potvrdilo, že průměrný výnos všech plodin byl významně vyšší na parcelách s herbicidním ošetřením v porovnání s neošetřovanými parcelami, a to u obou osevních postupů. Pozitivní vliv ošetření na výnos byl vyšší u dvouděložných plodin než u obilnin, relativní nárůst průměrného výnosu oproti kontrole stoupal v tomto pořadí: jarní ječmen < ozimá pšenice < hrách < ozimá řepka < brambory. Nejmenší vliv mělo ošetření u jarního ječmene, kde průměrný nárůst výnosu byl u zjednodušeného osevního sledu 13 % (cílené ošetření) a 15 % (ošetření růstovými herbicidy), u střídavého osevního sledu 23 %. Naopak u brambor byly výnosy na ošetřené variantě průměrně o 50 % vyšší než na kontrole (graf 1). Tato zjištění korespondují s pracemi dalších autorů. Například Harker (2001) uvádí nejnižší nárůst výnosu u jarního ječmene (41 %) v porovnání s řepkou (67 %) a hrachem (85 %), Banaras (1993) až 75% nárůst výnosu brambor na plochách ošetřovaných herbicidy oproti neošetřovaným. Významný pokles výnosu plodin při absenci herbicidního ošetření uvádí také německá studie z roku 2003: 75 % u hrachu, 50 % u ozimé pšenice, 20 % u jarních obilnin a 25 % u brambor (Zwerger et al. 2004.)

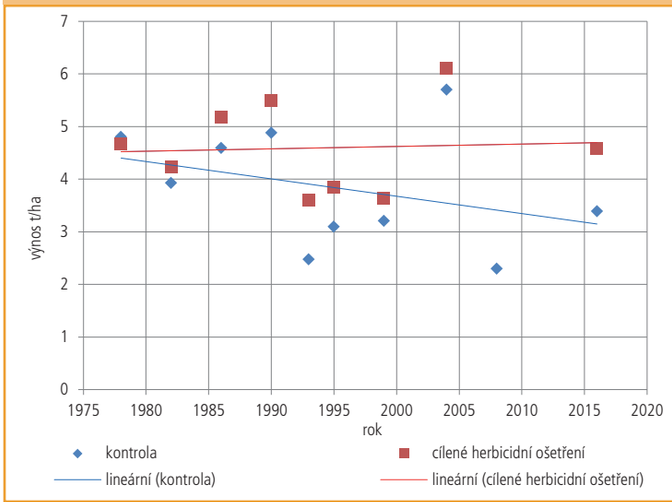
Hustota zaplevelení v pšenici ozimé v letech 2014–2016

Varianta/lokalita	Hněvčeves		Pernolec	
	průměr (počet rostlin/m²)	směrodatná odchylka	průměr (počet rostlin/m²)	směrodatná odchylka
Kontrola (zjednodušený OP)	221	34,9	186	37,5
Růstové herbicidy (zjednodušený OP)	201	9,3	152	21,6
Cílené ošetření (zjednodušený OP)	163	17,9	104	10,4
Kontrola (střídavý OP)	209	16,5	152	39,1
Cílené ošetření (střídavý OP)	155	22,4	16	7,8

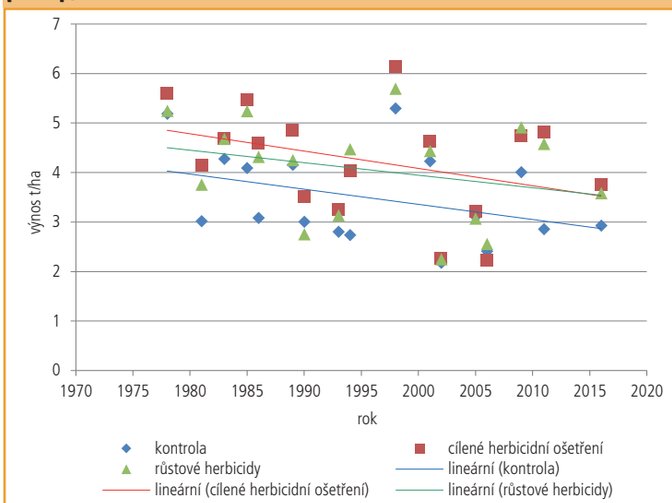
Graf 3 – Výnosové trendy u jarního ječmene, zjednodušený osevní postup, Hněvčeves



Graf 4 – Výnosové trendy u jarního ječmene, střídavý osevní postup, Pernolec



Graf 5 – Výnosové trendy u jarního ječmene, zjednodušený osevní postup, Pernolec



V případě cíleného ošetření nebyly zjištěny významné rozdíly mezi osevními sledy. Negativní vliv zjednodušeného osevního postupu, který se projevil vyšším zaplevelením na kontrole, byl zřejmě potlačen herbicidním ošetřením. Ošetření pouze růstovými herbicidy mělo podle očekávání na zvýšení výnosů menší efekt než cílené ošetření kombinací herbicidů. To odpovídá i vyššímu zaplevelení, neboť růstové herbicidy působí jen na určitou část plevelového spektra (tabulka).

Díky dlouhodobé časové řadě mohly být pozorovány i výnosové trendy v různých režimech ošetření. Přestože byly výnosy během trvání pokusu velmi variabilní, a to zřejmě v důsledku vlivu počasí, v Hněvčevsi se ukázaly statisticky významné rozdíly v trendech mezi kontrolou a ošetřenými parcelami. Zejména u jarního ječmene, ozimé pšenice a hrachu došlo k postupnému zvyšování výnosů na ošetřených variantách, naopak na kontrolách výnosy postupně klesaly (grafy 2, 3). Z tohoto důvodu lze v posledních 15 letech sledovat i nárůst rozdílu ve výnosech mezi ošetřovanými variantami a kontrolou. Na lokalitě Pernolec tyto trendy pozorovány nebyly. Výnosy u všech variant v čase klesaly, i když na ošetřených variantách byl pokles mírnější než na kontrolách (grafy 4, 5). Možným vysvětlením celkového poklesu výnosů v Pernolci je velmi nízká úrodnost půdy na této lokalitě a také úbytek srážek v posledních letech, které negativně ovlivnily výnosy bez ohledu na významné snížení zaplevelení.

Závěr

Pokus prokázal pozitivní vliv dlouhodobého herbicidního ošetření na výnosy pro všechny sledované plodiny, přičemž největší efekt mělo cílené herbicidní ošetření kombinací herbicidů. Ošetření pouze růstovými herbicidy nevedlo k účinnému potlačení celého plevelového spektra a nemělo tudíž na zvýšení výnosů tak vysoký efekt. To potvrzuje opodstatnění aplikace systémů integrované regulace plevelů a potřebu využití integrace všech dostupných opatření vedoucích ke snížení zaplevelenosti. Upřednostnění pouze jednostranného použití herbicidů se stejným mechanismem účinku vede k narušení diverzity a přemnožení obtížně regulovatelných plevelných rostlin a projeví se to výrazně na výnosech plodin, jak ukazují data z dlouhodobých pokusů. Negativní dopad zjednodušených osevních postupů na zaplevelení lze eliminovat cíleným herbicidním ošetřením, které zajistí vyrovnané výnosy. ❊

Práce vznikla za finanční podpory projektů Ministerstva zemědělství ČR RO0416, QJ1530373 a QJ1610547.

Oponentský posudek vypracoval doc. Ing. Jiří Stach, CSc., České Budějovice

Snímky autoři

Mgr. Markéta Mayerová,[1]
doc. Ing. Jan Mikulka CSc.,[1]
RNDr. Mikuláš Madaras, Ph.D.,[1]
prof. Ing. Josef Soukup CSc.[2]
[1] Výzkumný ústav rostlinné výroby, v. v. i.,
[2] Česká zemědělská univerzita v Praze

Použitá literatura:

ASIF M., Iqbal M., RANDHAWA H. M., SPANER D. (2014): Managing and Breeding Wheat for Organic Systems. Springer International Publishing, Cham, 76 s.

Banaras M. (1993): Impact of weed competition on potato production. Pakistan J Agric Res 14:64-71.

CARDINA J., WEBSTER T. M., HERMS C. P. (1998): Long-term tillage and rotation effects on soil seedbank characteristics. Asp Appl Biol 51:213-220.

HARKER K. N .(2001): Survey of yield losses due to weeds in central Alberta. Can J Plant Sci 81:339-342.

VAN HEEMST H. D. J. (1985): The influence of weed competition on crop yield. Agr Syst 18:81-93.

LEJINS A., LEJINA B. (2007): The grain crop yield in different crop rotation and efficiency of herbicides and fungicides treatment. Pages 125-131 in Proceeding of the 6th International Scientific and Practical Conference on Environment, Technology, Resources. Noviks G: Rezekne Higher Educ Ins-Rezeknes Augstskola.

MIKULKA J., KNEIFELOVÁ M. (2005): Plevelné rostliny. Vydavatelství Profi Press, s. r. o. Praha, 145 s.

OERKE E. C. (2006): Crop losses to pests. J Agr Sci 144:31-43.

Stasinskis E. (2009): Effect of proceeding crop, soil tillage and herbicide application on weed and winter yield. Agronomy Research 7:103-112.

ZWERGER P., MALKOMES H. P., NORDMEYER H., SÖCHTING H. P., VERSCHWELE A. (2004): Unkrautbekämpfung: Gegenwart und Zukunft – aus deutscher Sicht. Weed control: presence and future – the German view. Z Pflanzenk und Pflanzen 19:27-38.

3.2 Changes in weed community composition in a long-term trial with different crop rotations and herbicide treatment

Changes in weed community composition in a long-term trial with different crop rotations and herbicide treatments

Langzeitstudie über Veränderung der Unkrautflora unter dem Einfluss von Fruchtfolgen und Herbizidbehandlungen

Markéta Mayerová[1,2*], Jan Mikulka[1], Michaela Kolářová[2], Josef Soukup[2]

[1]Crop Research Institute, Drnovská 507, 161 00 Prague 6, Czech Republic
[2]Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 129, 165 21 Prague 6, Czech Republic
[*]Corresponding author, mayerova@vurv.cz

DOI 10.5073/jka.2018.458.009

Abstract

The impact of herbicide application on weed community changes was studied in a long-term field experiment conducted since 1972 at two sites in the Czech Republic; Pernolec and Hněvčeves. The ongoing trial comprises multi-crop and simple crop rotations with 50 and 75% cereals, respectively. Three herbicide treatments were used: (1) untreated; (2) synthetic auxins (MCPA; 2,4-D; only in simple crop rotation) and (3) targeted herbicide combinations, including especially sulfonylureas, triazines, ureas and synthetic auxins. Weed species composition and weed density were assessed at the trial beginning, during the trial and in the present (2013-2016). Changes in weed flora composition were found out. In Hněvčeves, abundance of some species such as *Galium aparine*, *Stellaria media*, and *Vicia* spp. increased on untreated plots; the abundance of *Apera spica-venti*, *Fumaria officinalis*, and *Tripleurospermum inodorum* increased on treated plots. In Pernolec, some species receded in all variants, e.g. *Myosotis arvensis*, *Raphanus raphanistrum*, and *Scleranthus annuus*; the abundance of *Centaurea cyanus*, *Tripleurospermum inodorum*, *Veronica* spp., and *Spergula arvensis* increased in untreated plots. No significant differences affected by time and treatment were detected in population densities of *Apera spica-venti*, *Arabidopsis thaliana*, and *Stellaria media*. The species composition of the weed community was affected by explanatory variables in the following order: treatment < time < type of cultivated crop. The long-term study confirmed weed population shifts over time were caused by interaction between the management factors and environmental conditions.

Keywords: Crops, field trial, herbicides, long-term, weed changes

Zusammenfassung

Der Einfluss von Herbizidapplikationen auf die Unkrautartenverteilung wurde seit 1972 in einer Langzeitfeldstudie auf zwei Standorten in Pernolec und Hněvčeves, Tschechische Republik, untersucht. Der Versuch beinhaltet eine blattfruchtbetonte und eine getreidebetonte Fruchtfolge mit unterschiedlich hohen Getreideanteilen von 50 % beziehungsweise 75 %. Drei Herbizidbehandlungen wurden untersucht: (1) unbehandelt, (2) synthetische Auxine (MCPA, 2,4-D, nur in der getreidebetonten Fruchtfolge), (3) gezielte Herbizidapplikationen insbesondere Sulfonylharnstoffe, Triazine, Harnstoffe und synthetische Auxine. Sowohl die Zusammensetzung der Unkrautspezies als auch die Unkrautdichte wurden zu Beginn, während des Versuchs und detaillierter in den Jahren 2013-2016 ermittelt. Es wurden Veränderungen in der Zusammensetzung der Unkrautflora festgestellt. In Hněvčeves erhöhte sich die Häufigkeit einiger Arten wie *Galium aparine*, *Stellaria media* und *Vicia* spp. in den unbehandelten Parzellen. Wohingegen sich hier die Häufigkeit von *Apera spica-venti*, *Fumaria officinalis* und *Tripleurospermum* inodorum in den behandelten Parzellen erhöhte. In Pernolec nahm die Pflanzendichte einiger Arten (z. B. *Myosotis arvensis*, *Raphanus raphanistrum*, *Scleranthus annuus*) über alle Varianten hinweg ab. Die Häufigkeit der Arten *Centaurea cyanus*, *Tripleurospermum inodorum*, *Veronica* spp. und *Spergula arvensis* erhöhte sich in den unbehandelten Parzellen in Pernolec. Es wurden keine signifikanten Effekte durch Zeit und Behandlung auf die Populationsdichte von *Apera spica*-venti, *Arabidopsis thaliana* und *Stellaria media* festgestellt. Die Zusammensetzung der Unkrautspezies wurde zunehmend durch die Variablen Behandlung, Zeit und Typ der Kulturpflanze beeinflusst. Diese Langzeitstudie bestätigt Veränderungen in der Unkrautpopulation über die Zeit durch Interaktion zwischen Managementfaktoren und den Umweltbedingungen.

Stichwörter: Feldfrüchte, Feldversuch, Herbizide, Langzeitstudie, Veränderung der Unkrautflora

Introduction

Weed communities on arable land have been influenced by environmental factors (soil and climatic conditions) and farming practices (crop type, soil cultivation, weed control methods)

(LÉGÈRE et al., 2005; POTTS et al., 2010). The weed flora has changed in response to agricultural intensification accompanied with simplification of crop rotations (STOATE et al., 2001; MEYER, 2013) and excessive herbicide and fertilizer uses (STORKEY et al., 2010; SALONEN et al., 2012). Many surveys in various countries analyzed the relative importance of particular management factors on weed species composition (HYVÖNEN et al., 2003; STREIT et al., 2003; KELLER et al., 2004; ANDREASEN and STREIBIG, 2010). Some works suggested crop type as the major factor determining species composition, which is related to different farming practices in various types of crop (FRIED et al., 2008; LOSOSOVÁ and CIMALOVÁ, 2009; PINKE et al., 2012; NOWAK et al., 2015). Widespread use of herbicides has had the significant impact on weeds in the last 50 years. In general, repeated use of a single mode of action has resulted in weed communities shifting to an occurrence of herbicide-tolerant species (MARSHALL et al., 2003; MURPHY and LEMERLE, 2006). Available herbicides considerably changed over time and these changes had become a key factor in altering the abundance of weed population. Changes in chemical weed control contributed to less diversity of weed community and proliferation of tolerant species (MIKULKA et al., 2009; GRUNDY et al., 2010; MEYER, 2013). However some studies reported inconclusive effect of herbicide treatment on weed species diversity (DERKSEN et al., 1995; MAYOR and DESSAINT, 1998).

Although many works assessed the effects of herbicides on weed communities (DERKSEN et al., 1995; GRUNDY et al., 2009), weed shifts are rarely studied in the long-term. That is because of problems with determining history of changes in management practices and wide spectrum of active ingredients of herbicides (FRIED et al., 2008; PINKE et al., 2012; DE MOL et al., 2015). The objective of this study was to assess the long-term changes of weed community in the long-term experiment as a response to herbicide treatment and cultivated crops. We compared integrated approach of weed management (multi-crop rotation, targeted herbicide use) with less diversified approach: a) low input system with simple crop rotation and use of low-cost, mostly auxinic herbicides and b) simple crop rotation but with targeted herbicide use. The aim of this study was to determine long-term shifts of weed populations caused by herbicide application and cultivated crops.

Materials and Methods

Experimental sites

The long-term field trial has been conducted since 1972 at two experimental stations of the Crop Research Institute in the Czech Republic: Hněvčeves (50.31487 N, 15.71612 E) and Pernolec (49.77053 N, 12.68099 E). The site characteristics are listed in Table 1.

Tab. 1 Experimental site characteristics.

Tab. 1 *Beschreibung der Forschungsstandorte.*

Experimental site	Growing region	FAO Classification	Altitude (m)	Average annual temperature (°C)	Average annual rainfall (mm)
Hněvčeves	sugar beet	Haplic Luvisol on loess	265	8.2	573
Pernolec	potato	Cambisol on orthogneiss	530	7.1	559

The trial was established in two different crop rotation systems (CR) with specific cereal percentages: (1) multi-crop CR (MCR) with 50% cereals and 50% broadleaved crops and (2) simple CR (SCR) with 75% cereals and 25% legumes. Three herbicide treatments were used: (1) untreated control; (2) treatment by synthetic auxins in simple crop rotation (MCPA; 2,4-D in cereals and bentazone in peas) and (3) treatment by targeted herbicide combinations according to observed weed infestation. These combinations included different sulfonylureas, triazines, ureas and synthetic auxins during the trial period. The experiment was carried out as a split-plot design with 5 combinations of crop rotations (main plots) and treatments (sub-plots): MCR*untreated,

MCR*targeted, SCR*untreated, SCR*auxins and SCR*targeted; with 4 replications of each combination. The 100m^2 (10m by 10m) plots were established 10m from field boundaries and separated from each other by 1 to 2m on all sides to eliminate interaction between treatments. Uniform practices of soil tillage, fertilization and fungicide treatment accompanied weed management on each plot.

Assessments and statistical analysis

Weed species composition and weed density were assessed at the beginning of the trial, during the trial and in the present (2013-2016). Weed data were recorded at 2 to 6-leaf stage of the crop before herbicide application. Individual plants in each plot were counted in four 0.25 m^2 random sampling squares (0.5m by 0.5m). Densities in the four squares were aggregated to provide 1m^2 samples. Headlands and plot edges were excluded from sampling. Weed species were identified at the species level when possible; some species were identified at the level of the genus (e.g. *Veronica* spp.). Botanical nomenclature was adapted according to KUBÁT et al. (2002).

Multivariate analyses in the CANOCO 5 software (TER BRAAK and ŠMILAUER, 2012) were performed for data exploration. Prior to the analysis logarithmic transformation of data was made. Due to gradient length on the first canonical axis in the compositional turnover in Detrended Correspondence Analysis (DCA), optimal ordination method was selected. If values were more than 4.0 SD units, unimodal Canonical Correspondence Analysis (CCA) was used. In case of values below 3.0 SD units, linear Redundancy Analysis (RDA) was used. Both methods could be used for values 3-4.0 SD units. Three explanatory variables were compiled: time (year), crop type (winter cereals, spring cereals, legumes, and root crops), treatment (untreated, treatment by auxins, targeted treatment by combination of herbicides). Gross and net effects of explanatory variables on weed species composition were tested using Monte-Carlo permutation tests for 999 permutations at P=0.05 significance level, following the methodology of LOSOSOVÁ et al. (2004). The gross effect was tested using separate CCAs or RDAs with single explanatory variables. The net effect was tested using partial CCAs or RDAs with a single explanatory variable and other variables as covariates. The ratio of particular canonical eigenvalues to the sum of all eigenvalues was used to measure the proportion of explained variation. Rare species were downweighted in case of CCA. Complete analysis was carried out only for Pernolec. At Hněvčeves, the comparison of initial and present situation was performed due to lack of some continuous data from the trial.

Results and discussion

Weed density

At trial commencement in 1972, the average weed density and number of different weed species before herbicide treatment in winter wheat were 198 plants m^{-2} of 21 species at Pernolec and 86 plants m^{-2} of 11 species at Hněvčeves. In total, 53 different species at Pernolec and 29 at Hněvčeves were identified over the experimental period.

The application of herbicides decreased the weed density (Tab. 2). The average weed density was significant higher in untreated plots than in treated plots at both localities and crop rotations. Simultaneously simple crop rotation evinced higher weediness than multi-crop rotation in both, untreated plots and targeted treatment plots. It is in agreement with KOOCHEKI et al. (2009) who found out that rotation of sugar beet-winter wheat caused 28% reduction in the weed seed bank compared to continuous wheat. Treatment by synthetic auxins affected a limited weed spectrum; therefore infestation was higher than at targeted treated plots.

Tab. 2 Current weed density before herbicide treatment in winter wheat; the last assessment in 2016 (Hněvčeves), in 2014 (Pernolec, MCR) and 2015 (Pernolec, SCR). Average number of plants m-2 (Avg.) ± standard deviation (SD). SCR - simple crop system, MCR - multi-crop system.

Tab. 2 *Unkrautdichte vor Herbizidbehandlungen in Winterweizen; letzte Bonitur 2016 (Hněvčeves),2014 (Pernolec, MCR) und 2015 (Pernolec, SCR). Pflanzen je m² (Avg.) ± Standardabweichung (SD). MCR – blattfruchtbetonte Fruchtfolge, SCR - getreidebetonte Fruchtfolge.*

Variant/locality	Hněvčeves		Pernolec	
	Avg.	SD	Avg.	SD
untreated SCR	221	34.9	186	37.5
auxins SCR	201	9.3	152	21.6
targeted SCR	163	17.9	104	10.4
untreated MCR	209	16.5	152	39.1
targeted MCR	155	22.4	16	7.8

Explanatory variables

All variables (crop type, time, treatment) together explained 24.9% and 32.2% of the total variation in weed species data at simple and multi-crop system, respectively. Unexplained variation was associated with other factors, probably the environmental conditions.

Tab. 3 Gross and net effects of explanatory variables and their interactions (*) on the weed species composition in locality Pernolec. (Partial) CCAs were used for SCR; (partial) RDAs were used for MCR. Eigenvalue = sum of all canonical eigenvalues (total inertia for SCR = 2.53; for MCR=1.0); % = percentage of explained variance; F = ratio for the test of significance of all canonical axes; P-value = corresponding probability value obtained using the Monte-Carlo permutation test. SCR = simple crop rotation, MCR = multi crop rotation.

Tab. 3 *Brutto- und Nettoeffekte erklärender Variablen und deren Interaktionen (*) auf die Unkrautarten-zusammensetzung am Standort Pernolec. (Partielle) kanonische Korrespondenzanalyse wurde für SCR, (partielle) lineare Redundanzanalyse wurde für MCR benutzt. Eigenvalue= Summe aller kanonischen Eigenwerte (Gesamtvariabilität für SCR = 2.53; für MCR = 1.0); % = prozentualer Anteil an der Gesamt-variabilität; F = Verhältnis des Signifikanztests der kanonischen Achsen; P = durch Monte-Carlo-Permutations-test ermittelter zugehöriger Wahrscheinlichkeitswert; MCR = blattfruchtbetonte Fruchtfolge, SCR = getreide-betonte Fruchtfolge.*

Explanatory variables	SCR				MCR			
	Eigenvalue	%	*F*	*P*	Eigenvalue	%	*F*	*P*
All factors	0.63	24.9	10.71	0.001	0.32	32.2	9.3	0.001
Gross effects								
crop type	0.34	13.4	12.8	0.001	0.18	17.7	7.2	0.001
time	0.26	10.4	19.24	0.001	0.15	14.9	16.5	0.001
treatment	0.03	1.1	0.91	n.s.	0.03	3.0	3.2	0.004
Net effects								
crop type	0.34	13.3	14.37	0.02	0.14	14.25	7.2	0.001
time	0.26	10.3	22.31	0.001	0.11	11.4	16.5	0.001
treatment	0.03	1.1	1.19	n.s.	0.03	3.0	5.1	0.001
treatment*time	0.02	1.0	0.79	n.s.	0.01	1.8	1.8	0.034
treatment*crop type	0.03	1.2	0.58	n.s.	0.02	2.4	1.2	n.s.
time*crop type	0.19	7.5	8.9	n.s.	0.11	11.7	10.1	0.001

Study of PINKE et al. (2012) suggested the environmental variables accounted for two times more variance than management variables. DE MOL et al. (2015) showed variation in species composition was more related to environmental factors (9.1% explained variance) than management factors (4.7% explained variance). On the contrary CIMALOVÁ and LOSOSOVÁ (2009) revealed that on regional scale, the relative importance of different crop types and their associated management was higher than climatic variables. The amount of variation in weed species data explained by net effects of particular variables, as detected by partial CCAs (for SCR) and RDAs (for MCR), was the highest for crop type (Tab. 3). Many studies confirmed a strong impact of crop type on species composition (FRIED et al., 2008; PINKE et al., 2012; NOWAK et al., 2015). Unlike our findings, MOL et al. (2015) found

out the small contribution of the factor year to the variance of species composition. Treatment evinced the smallest or insignificant effect. It is agreement with DE MOL et al. (2012) who did not find a correlation between weed species composition and the applied herbicides. Unlike that, STREIT et al. (2003) confirmed the significant effect of herbicide application on weed population. Effect of herbicide treatment on weed species in long-term experiments may be buffered thanks to persistent soil seedbank (HYVÖNEN and SALONEN, 2001).

Species composition

At the beginning of the trial, the following species dominated at Hněvčeves: *Thlaspi arvense*, *Papaver rhoeas, Lamium* spp., *Stellaria media*, *Veronica* spp., and *Fallopia convolvulus*. Abundance of some species such as *Lamium* spp., *Veronica* spp., *Stellaria media, Papaver* spp., *Galium aparine* increased on untreated plots. Abundance of other species such as *Apera spica-venti*, *Fumaria officinalis*, *Tripleurospermum inodorum*, and *Cirsium arvense* increased on treated plots (Tab. 4).

Tab. 4 Weed species composition at Hněvčeves in winter wheat at trial commencement and the last assessment in 2016 (both crop rotations). Average no. of plants m^{-2} (Avg.) and standard deviation (SD) for most frequent species; "-" = species not recorded.

Tab. 4 *Zusammensetzung der Unkrautarten in Hněvčeves in Winterweizen zu Versuchsbeginn und der letzten Erhebung 2016 (beide Fruchtfolgen). Pflanzen je m^2 (Avg.) und Standardabweichung (SD) für die am häufigsten auftretenden Unkrautarten; "-" = Art nicht vorhanden.*

Weed species	Trial beginning		Simple crop rotation						Multi-crop rotation			
			Untreated		Auxins		Targeted		Untreated		Targeted	
	Avg.	SD	Avg.	SD	Avg.	SD	Avg.	SD	Avg.	SD	Avg.	SD
Thlaspi arvense	37	2.2	8	2.9	4	2.6	4	2.1	8	2.7	8	2.2
Papaver spp.	*9*	3.4	23	6.6	9	5.1	13	8.6	23	4.2	20	6.2
Lamium spp.	*7*	0.7	57	18.2	48	5.2	25	3.7	38	10.3	13	2.3
Stellaria media	*6*	4.9	26	3.9	20	4.7	7	1.9	30	5.6	10	5.2
Veronica spp.	*5*	0.9	57	13.6	58	6.4	72	14.7	26	9.2	42	9.4
Fallopia convolvulus	*4*	0.8	-	-	-	-	-	-	1	1.7	9	6.2
Matricaria chamomilla	*4*	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Galium aparine	2	0.8	14	5.1	4	1.8	2	1.6	26	5.9	4	2.8
Viola arvensis	-	-	1	0.4	1	1.0	1	0.4	1	1.0	4	2.3
Cirsium arvense	-	-	3	2.5	5	2.9	4	1.9	7	3.3	1	0.9
Vicia spp.	-	-	1	0.8	-	-	< 1	0.4	5	3.2	-	-
Sinapis alba	-	-	25	7.7	31	5.5	23	5.1	37	2.7	32	6.8
Fumaria officinalis	-	-	3	1.1	16	3.4	6	1.7	4	1.1	6	3.5
Tripleurospermum inodorum	-	-	-	-	1	0.5	-	-	2	1.1	5	4.0
Apera spica-venti	-	-	3	3.3	4	3.5	8	3.9	1	1.7	4	4.5

The ordination diagrams in Figures 1 and 2 show changes of weed composition over years in Pernolec influenced by crop type and treatment. Some species receded in both crop rotations, regardless of treatment and crop type: *Myosotis arvensis*, *Raphanus raphanistrum*, *Scleranthus annuus*, and *Erophila verna*. No significant differences affected by time were detected in population densities of *Apera spica-venti*, *Arabidopsis thaliana*, *Stellaria media,* and *Fallopia convolvulus*.

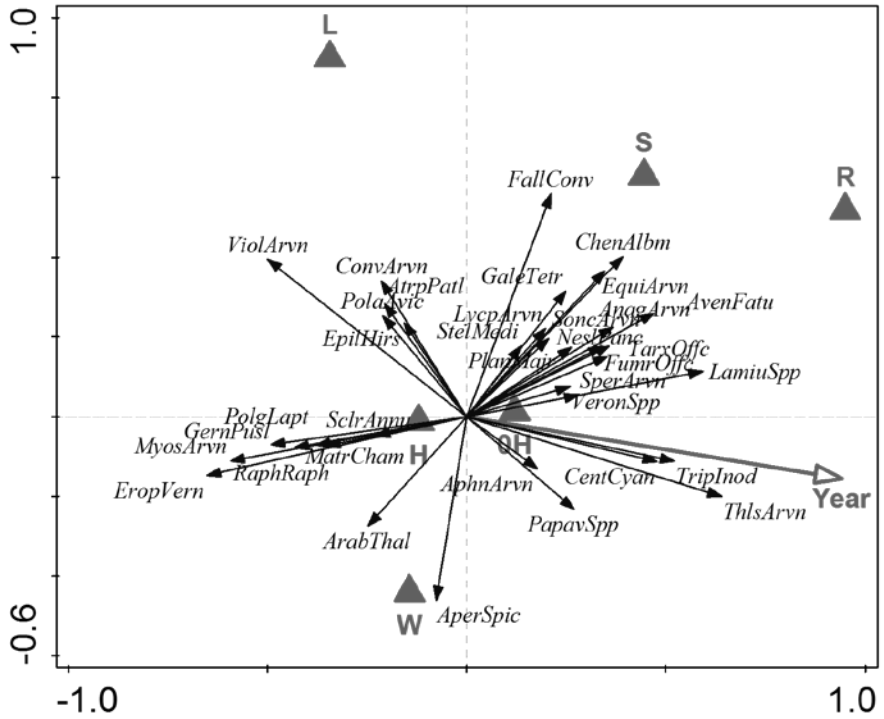


Fig. 1 Ordination diagram of Redundancy Analysis (RDA) - multi-crop rotation in Pernolec. Species with low weight are not shown. W = winter cereals, S = spring cereals, R = root crops, L = legumes; 0H = untreated, H = targeted treatment by combination of herbicides.

Abb. 1 *Ordinationsdiagramm der Redundanzanalyse (RDA) der blattfruchtbetonten Fruchtfolge in Pernolec. Spezies mit geringer Gewichtung werden nicht dargestellt. W = Wintergetreide; S = Sommergetreide; R = Hackfrucht; L = Leguminosen; 0H = unbehandelt; H = Kombination verschiedener Herbizide.*

Many weed species responded to crop type. Those with the best fit were *Fallopia convolvulus*, *Chenopodium album*, *Anagallis arvensis*, *Galeopsis tetrahit* or *Lycopsis arvensis* (SCR) for spring cereals; *Avena fatua*, *Equisetum arvense*, *Sonchus arvensis*, *Taraxacum officinale*, and *Neslia paniculata* for root crops; *Apera spica-venti*, *Arabidopsis thaliana*, *Tripleurospermum inodorum*, *Poa annua* L. (SCR), and *Centaurea cyanus* for winter cereals; *Convolvulus arvensis*, *Polygonum aviculare*, and *Atriplex patula* for legumes. Most of species did not respond to treatment, but certain differences could be observed. The abundance of *Centaurea cyanus*, *Tripleurospermum inodorum*, *Veronica* spp., *Spergula arvensis*, and *Lycopsis arvensis* increased more on untreated plots.

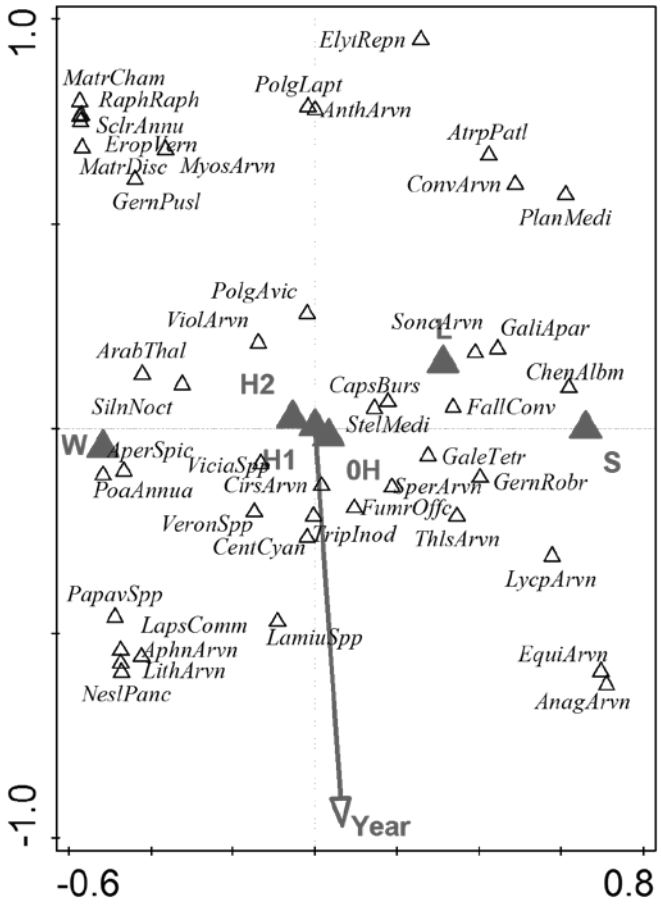


Fig. 2 Ordination diagram of Canonical Correspondence Analysis (CCA) – simple crop rotation in Pernolec. Species with low weight are not shown. W = winter cereals, S = spring cereals, L = legumes; 0H = untreated, H1 = treatment by synthetic auxins, H2 = targeted treatment by combination of herbicides.

Abb. 2 *Ordinationsdiagramm der kanonischen Korrespondenzanalyse (CCA) der getreidebetonten Fruchtfolge in Pernolec. Spezies mit geringer Gewichtung werden nicht dargestellt. W = Wintergetreide; S = Sommer-getreide; R = Hackfrucht; L = Leguminosen; 0H = unbehandelt; H1 = synthetische Auxine; H = Kombination verschiedener Herbizide.*

Abbreviations*: AnthArvn (Anthemis arvensis), AnagArvn (Anagallis arvensis), AperSpic (Apera spica–venti), AphnArvn (Aphanes arvensis), ArabThal (Arabidopsis thaliana), AtrpPatl (Atriplex patula), AvenFatu (Avena fatua), CapsBurs (Capsella bursa-pastoris), CentCyan (Centaurea cyanus), ChenAlbm (Chenopodium album), CisrArvn (Cirsium arvense), ConvArvn (Convolvulus arvensis), ElytRepn (Elytrigia repens), EpilHirs (Epilobium hirsutum), EquiArvn (Equisetum arvense), EropVern (Erophila verna), FallConv (Fallopia convolvulus), FumOffc (Fumaria officinalis), GaleTetr (Galeopsis tetrahit), GaliApar (Galium aparine), GernPusl (Geranium pusillum), GernRobr (Geranium robertianum), LamiuSpp. (Lamium spp.), LapsComm (Lapsana communis), LithArvn (Lithospermum arvense), LycpArvn (Lycopsis arvensis), MatrDisc (Matricaria discoidea), MatrCham (Matricaria chamomilla), MyosArvn (Myosotis arvensis), NeslPan (Neslia paniculata), PapaSpp (Papaver spp.), PlanMajr (Plantago major), PlanMedi (Plantago media), PoaAnnua (Poa annua), PolgAvic (Polygonum aviculare), PolgLapt (Polygonum lapathifolium), RaphRaph (Raphanus raphanistrum), SclrAnnu (Scleranthus annuus), SilnNoct (Silene noctiflorum), SoncArvn (Sonchus arvensis), SperArvn (Spergula arvensis), StelMedi (Stellaria media), Tarxoffc (Taraxacum officinale), ThlsArvn (Thlaspi arvense), TripInod (Tripleurospermum inodorum), VeronSpp (Veronica spp.), ViciaSpp (Vicia spp.), ViolArvn (Viola arvensis)*

Conclusions

This long-term study confirmed changes in weed communities over years. We did not prove the relationship of these changes and specific herbicide treatment, however density of some weed species (e.g. *Raphanus raphanistrum* and *Erophila verna*) decreased faster on plots treated by herbicides compared to untreated plots and density of other weed species (e.g. *Centaurea cyanus*, *Tripleurospermum inodorum*) increased more on untreated plots. Crop was the major factor determining species composition and its effect was greater at multi-crop rotation, therefore it can be recommended to grow various crops in crop rotation to conserve weed species diversity.

Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Agriculture of the Czech Republic, project No RO0417. We thank M.Sc. Alexander Linn for translations to German.

References

ANDREASEN, C. and C. STREIBIG, 2010: Evaluation of changes in weed flora in arable fields of Nordic countries – based on Danish long–term surveys. Weed Research **51**, 214-226.

CIMALOVÁ, Š. and Z. LOSOSOVÁ, 2009: Arable weed vegetation on the northeastern part of the Czech Republic: effects of environmental factors on species composition. Plant Ecology **203,** 45-57.

DE MOL, F., C. VON REDWITZ and B. GEROWITT, 2015: Weed species composition of maize fields in Germany is influenced by site and crop sequence. Weed Research **55**, 574-585.

DE MOL, F., C. VON REDWITZ, M. SCHULTE and B. GEROWITT, 2012: Composition of weed populations in maize as a function of plant or crop management: results of a nation-wide survey in Germany conducted from 2002 to 2004. Julius-Kühn-Archiv **435**, 655-662.

FRIED, G., L.R. NORTON and X. REBOUD, 2008: Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France. Agriculture, Ecosystems and Environment **128**, 68-76.

HYVÖNEN, T., E. KETOJA and J. SALONEN, 2003: Changes in the abundance of weeds in spring cereal fields in Finland. Weed Research **43**, 348-356.

HYVÖNEN, E.J. and J. SALONEN, 2002: Weed species diversity and community composition in cropping practices at two intensity levels – a six–year experiment. Plant Ecology **154**, 73-81.

GRUNDY, A.C., A. MEAD, W. BOND, G. CLARK and S. BURSTON, 2010: The impact of herbicide management on long-term changes in the diversity and species composition of weed populations. Weed Research **51**, 187-200.

DERKSEN, D.A., A.G. THOMAS, G.P. LAFOND, H.A. LOEPPKY and C.J. SWANTON, 1995: Impact of post-emergence herbicides on weed community diversity within conservation-tillage systems. Weed Research **35**, 311-320.

KELLER, M., N. BÖHRINGER, J. MÖHRING, V. RUEDA-AYALA, C. GUTJAHR and R. GERHARDS, 2014: Long-term changes in weed occurrence, yield and use of herbicides in maize in south-western Germany, with implications for determination of economic thresholds. Weed Research **54**, 457-466.

KOOCHEKI, A., M. NASSIRI, L. ALIMORADI and R. GHORBANI, 2009: Effect of cropping systems and crop rotations on weed. Agronomy for Sustainable Development **29**, 401-408.

KUBÁT, K., L. HROUDA, J.CHRTEK, Z. KAPLAN, J. KIRSCHNER and J. ŠTĚPÁNEK, 2002: The Key to Flora of the Czech Republic [In Czech: Klíč ke Květeně České republiky]. Praha, Academia, 927 pp.

LÉGÈRE, A., F.C. STEVENSON and D.L. BENOIT, 2005: Diversity and assembly of weed communities: contrasting responses across cropping systems. Weed Research **45**, 303-315.

LOSOSOVÁ, Z. and Š. CIMALOVÁ, 2009: Effects of different cultivation types on native and alien weed species richness and diversity in Moravia Czech Republic. Basic and Applied Ecology **10**, 456-465.

LOSOSOVÁ, Z., M. CHYTRÝ, Š. CIMALOVÁ, Z. KROPÁČ, Z. OTÝPKOVÁ, P. PYŠEK and L. TICHÝ, 2004: Weed vegetation of arable land in Central Europe: Gradients of diversity and species composition. Journal of Vegetation Science **15**, 415-422.

MARSHALL, E.J.P., V.K. BROWN, N.D. BOATMAN, P.J.W. LUTMAN, G.R. SQUIRE and L.K. WARD, 2003: The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields. Weed Research **43**, 77-89.

MAYOR, J.P. and F. DESSAINT, 1997: Influence of weed management strategies on soil seedbank diversity. Weed Research **38**, 95-105.

MEYER, S., 2013: Impoverishment of the arable flora of Central Germany during the past 50 years: a multiple-scale analysis. Biodiversity and Ecology Series B 9 Göttingen Centre for Biodiversity and Ecology, Göttingen.

MIKULKA, J., M. KORČÁKOVÁ, V. BUREŠOVÁ and J. ANDR, 2009: Changes in Weed Species Spectrum of Perennial Weeds on Arable Land, Meadow and Pastures. Plant Protection Science **45**, 63-66.

MURPHY, C.E. and D. LEMERLE, 2006: Continuous cropping systems and weed selection. Euphytica **148**, 61-73.

NOWAK, A., S. NOWAK, M. NOBIS and A. NOBIS, 2015: Crop type and altitude are the main drivers of species composition of arable weed vegetation in Tajikistan. Weed Research **55**, 525-536.

PINKE, G., P. KARÁCSONY, B. CZÚCZ, Z. BOTTA-DUKÁT and A. LENGYEL, 2012: The influence of environment, management and site context on species composition of summer arable weed vegetation in Hungary. Applied Vegetation Science **15**, 136-144.

POTTS, G.R., J.A. EWALD and N.J. AEBISCHER, 2010: Long-term changes in the flora of the cereal ecosystem on the Sussex Downs, England, focusing on the years 1968-2005. Journal of Applied Ecology **47**, 215-226.

SALONEN, J., T. HYVÖNEN, J. KASEVA and H. JALLI, 2013: Impact of changes cropping practices on weed occurrence in spring cereals in Finland – comparison of surveys in 1997–1999 and 2007-2009. Weed Research **53**, 110-120.

STORKEY, J., S.R. MOSS and J.W. CUSSANS, 2010: Using assembly theory to explain changes in a weed flora in response to agricultural intensification. Weed Science **58**, 39-46.

STOATE, C., N.D. BOATMAN, R.J. BORRALHO, C.R. CARVALHO, G.R. DE SNOO and P. EDEN, 2001: Ecological impacts of arable intensification in Europe. Journal of Environmental Management **63**, 337-365.

STREIT, B., S.B. RIEGER, P. STAMP and W. RICHNER, 2003: Weed populations in winter wheat as affected by crop sequence, intensity of tillage and time of herbicide application in a cool and humid climate. Weed Research **43**, 20-32.

TER BRAAK, C.J.F. and P. ŠMILAUER, 2012: Canoco reference manual and user´s guide: software for ordination version 5.0. Microcomputer Power. Ithaca, NY, USA., 496 pp.

3.3 Effects of selective herbicide treatment on weed community in cereal crop rotation

Effects of selective herbicide treatment on weed community in cereal crop rotation

Markéta Mayerová[1,2], Jan Mikulka[1], Josef Soukup[2]

[1] *Crop Research Institute, Division of Crop Management Systems, Prague, Czech Republic*

[2] *Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Agrobiology, Food and Natural Resources, Prague, Czech Republic.*

ABSTRACT

The efficacy of different frequently used selective herbicides and their impact on weed community were assessed in the field experiment with cereal crop rotation in 2013-2016. All herbicide treatments provided effective weed control, but community composition changed after 4 years. The density of many weed species increased on the untreated plots. Annual grasses *Apera spica-venti* and *Alopecurus myosuroides* had temporal increase at plots treated with 2,4-D, florasulam and aminopyralid, but decline at plots treated with pyroxsulam and/or chlorsulfuron. Significant treatment effect was confirmed only for Shannon´s index (*H´*), where the highest *H´* was found in untreated controls (1.83) and the smallest in plots treated with 2,4-D + florasulam + aminopyralid (1.61). The pyroxsulam + florasulam + aminopyralid showed the greatest efficacy on a broad spectrum of weeds while maintaining reasonable species diversity.

Keywords: chemical weed management; herbicide efficacy; field trial; weed diversity

Weed communities are an integral part of agroecosystems. Individual weed species differ in their ecological function and competitive ability towards the crop (Marshall et al. 2003). Besides their negative effect on crop yield and quality (Hance and Holly 1990), many weed species have an important ecological function in maintaining farmland biodiversity (Storkey and Westbury 2007). Weed species diversity has declined in agricultural landscape during recent decades mainly due to agricultural intensification (Murphy and Lemerle 2006, Storkey 2011) accompanied by simplification of crop rotations (Meyer 2013, Stoate et al. 2001) and excessive herbicide and fertiliser use (Salonen et al. 2012, Storkey et al. 2010). A new approach to biodiversity-friendly weed management requires finding a balance between sufficient crop production and maintaining satisfactory species diversity (Marshall et al. 2003). This goal is an effective control of highly competitive problem species while sustaining beneficial species at economically acceptable levels (Storkey and Westbury 2007). Studies by Ulber et al. (2010) and Jones and Smith (2007) indicate that treatment by selective herbicides can provide considerable weed control with retention of beneficial species and species diversity.

The aim of this experiment is to evaluate the efficacy of different frequently used selective herbicides and their impact on weed species diversity. Herein, we focused on weed management in winter cereal rotation because the majority of current temperate conventional cropping systems are characterised by monocultures or simple rotations with a limited number of crops. Our goal is to determine the effect of a low cost strategy using cheaper herbicides which have been in use for a long time and have a narrower efficacy spectrum than the modern products that contain 3 active ingredients and hence a broader efficacy spectrum. High weed control efficiency in cereal crops has been attributed to acetolactate synthase (ALS) inhibitors which target a broad spectrum of broadleaf and grass weeds (Hyvönen et al. 2003). We therefore tested selective herbicides with active ingredients in this group. Our

hypothesis is that the use of herbicides with sub-optimal effect leads to a shift in hard-to-control weed species and negatively affects some parameters of species diversity.

MATERIAL AND METHODS

Experimental site. The field experiment was established in 2009 in the experimental area of the Crop Research Institute in Praha –Ruzyně. The site characteristics are listed in Table 1. The trial area was split into 20 randomised plots with 5 different herbicide treatments in 4 replications. Herbicide treatments differed in the herbicide target - only dicots and dicots + annual grasses; and in intensity of weed control - narrower spectrum and broader spectrum (Table 2). The area of each plot was 100m^2 and the 10 by 10m plots were separated from field boundaries and from each other by 2m on all sides in order to eliminate interaction between plots. Herbicides were applied post emergency in spring from the tillering crop stage to the beginning of stem elongation (BBCH 21-31) by the Agrio-Napa 12 sprayer. A sequence of winter wheat (2014-2016) and winter barley (2013) was grown in the experimental field. Barley was sown on 11 September 2012, wheat on 9 October 2013, 3 October 2014 and 12 October 2015. Uniform cropping practice was carried out in the entire study area: mouldboard ploughing, 0.20-0.25m deep, seedbed preparation with power harrow and mineral fertilisation before sowing with 45 kg N/ha, 20 kg P/ha, 37 kg K/ha; and sowing at 350 seeds/m^2. Fungicides were used before heading in case of infection pressure.

Assessment. Weed species composition and weed density were assessed from 2013 to 2016. Weed data was recorded in spring at the 4 to 6-leaf crop stage before herbicide application and 4 weeks after herbicide application. Individual plants in each plot were counted in five 0.25 m^2 random sampling squares (0.5m by 0.5m) and densities of these five squares were averaged and converted to 1m^2 samples. The weed species composition at trial

commencement is listed in Table 3. The following species prevailed in April 2013: *Papaver* spp. L., *Veronica* spp. L., *Galium aparine* L., *Apera spica-venti* (L.) P.Beauv., *Stellaria media* (L.) Vill. and *Fumaria officinalis* L. A total of 35 different species were identified over the experimental period. Weed cover (%) and herbicide efficacy (%) were estimated 4 weeks after herbicide application. Headlands and plot edges were excluded from sampling. Weed species were identified at the species level whenever possible and some species, such as *Vicia* spp. L., were identified at genus level. Botanical nomenclature followed Kubát et al. (2002).

Efficacy evaluation of herbicides was performed in EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organisation) standard PP1/152(4) and PP1/93(3) (Bulletin OEPP/EPPO 2012). We used the subjective estimation method which compares % weed cover at treated plots with untreated control and evaluates weed damage due to herbicide application. Efficacy of the studied herbicides was recorded in range 0-100 % (0% = no weed control; 100% = full weed control with no weed survival). For weed species on which a lower efficacy than 90% was observed, the population density was also recorded.

Special attention was paid to weed species considered beneficial for biodiversity and those providing resources for invertebrates and seed-eating birds (Marshall et al. 2003, Storkey 2006). These are marked * in the text.

Statistical analysis. Weed community species diversity was calculated for each plot repetition by Simpson´s dominance ($D = \sum_i p_i^2$), Shannon´s diversity ($H' = - \sum_i p_i \ln (p_i)$) and evenness ($E = H/\ln S$) indices; where p_i is the proportion of individuals of ith species in the total number of individuals (S) in the sample quadrate (Pielou 1966). The effects of treatment and year on diversity indices, weed density and herbicide treatment efficacy were tested by ANOVA, and Tukey´s HSD multiple comparison test at $\alpha = 0.05$ determined homogenous groups. Analysis was conducted in STATISTICA 13.3 software (TIBCO Software Inc., USA).

Multivariate data analysis in CANOCO 5 software (ter Braak and Šmilauer, 2012) provided data exploration. Data logarithmic transformation preceded analyses and the optimal Redundancy Analysis (RDA) ordination method was used because of the gradient length on the first canonical axis in compositional turnover in Detrended Correspondence Analysis (DCA). Year and treatment explanatory variables were compiled, and the gross effects were tested using separate RDAs with single explanatory variables. Net effects were then tested using partial RDAs with a single explanatory variable and the other variable as covariate. Both effects of explanatory variables on weed species composition were tested by Monte-Carlo permutation tests for 999 permutations at P=0.05 significance level; as in Lososová et al. (2004). Finally, the ratio of particular canonical eigenvalues to the sum of all eigenvalues measured the proportion of explained variation.

RESULTS AND DISCUSSION

Species diversity and weed community composition. Three diversity indices were used to describe different diversity aspects. All indices were influenced by year, and diversity was significantly higher in 2015 and 2016 than at trial commencement (Table 3). Significant herbicide treatment effect was confirmed only by Shannon´s index (*H´*) where the highest *H´* was found in untreated control and the smallest at plots treated with 2,4-D + florasulam + aminopyralid. Other herbicide treatments showed the same effect (Table 3) and did not significantly differ compared to untreated control. Although the treatment effect was insignificant for Simpson´s dominance (*D*) and evenness (*E*) indices, treatment with 2,4-D + florasulam + aminopyralid had the highest *D* and the smallest *E*.

Decrease in species diversity due to herbicide treatment is supported by other studies. Edesi et al. (2012) showed decreasing Shannon´s index tendency from herbicide use in a five-

year trial comparing conventional and organic farming. Jones and Smith (2007) also confirmed the highest species richness at untreated plots and the smallest at herbicide treated plots in a short-term trial, and also higher species richness in single-component herbicide application than in sequential application of multiple herbicides. In contrast, we found no species diversity difference between the application of products with one active ingredient and those with three active ingredients. Pawlonka and Rymuza (2014) confirmed significant species richness decrease after 6-years chlorsulfuron application; and Zengin (2000) reported that the abundance of many weed species in spring wheat decreased after 3 or 4 years repeated 2,4-D applications. On the contrary, Derksen et al. (1995) and Ulber et al. (2010) recorded no significant effect of herbicide treatment on species richness.

Both explanatory variables (time and treatment) together explained 27.3% of total variation in weed species data. Partial RDA detected that species data variation explained by net effect of time was 20.4 % and by herbicide treatment it was 6.9%. This is partly supported by Streit et al. (2003) who confirmed the significant effect of herbicide application on weed communities. In contrast to our findings, de Mol et al. (2015) recorded that year-factor made only a small contribution to weed species composition variation and de Mol et al. (2012) did not find a correlation between weed species composition and herbicide treatments. While long-term herbicide application affects both the composition of above ground weed communities and the soil seed bank (Bàrberi et al. 1997), a dominant short-term effect of herbicide application on above-ground weed species richness and abundance is confirmed in study of Hald (1999).

Ordination diagrams of partial RDA (Figure 1) show shifts in weed species composition under different herbicide treatment regimes. As expected, the abundance of many weed species increased in untreated control. These comprised common species such as *Veronica hederifolia* L., *Veronica persica* Poir., *Sinapis arvensis* L., *Viola arvensis* Murray and

Centaurea cyanus L. and less common species including *Lathyrus tuberosus* L., *Lycopsis arvensis* (L.) M.Bieb., *Consolida regalis* Gray and *Consolida orientalis* (Gr. et Godr.) Schrödinger. Plots treated with 2,4-D + chlorsulfuron caused the biggest time shifts in weed species (Figure 1B) and the pyroxsulam + florasulam + aminopyralid showed smaller time shifts than other treatments (Figure 1C). In addition, the *Apera spica-venti* and *Alopecurus myosuroides* Huds. annual grasses showed time increase at plots treated with 2,4-D and florasulam and decrease at plots treated with the pyroxsulam and chlorsulfuron. *V. persica* and *V. hederifolia* abundance increased at all plots, while *Galium aparine* and *Papaver* spp. abundance decreased. Some species with high biodiversity value, such as *Sinapis arvensis* L.*, *Lamium amplexicaule* L.*, and *Fallopia convolvulus* (L.) Á.Löve* increased at plots treated with the pyroxsulam + florasulam + aminopyralid and 2,4-D, but the density of other beneficial species, including *Centaurea cyanus**, *Polygonum aviculare* L.*, and *Stellaria media** decreased at all herbicide treated plots.

Weed density and treatment efficacy. We established significant impact of herbicide treatment on weed density before herbicide application (Figure 2), where the highest average weed density was at untreated control plots (168 plants/m^2) and the smallest at plots treated with the pyroxsulam + florasulam + aminopyralid and 2,4-D (124 and 127/m^2, respectively); and treatment with 2,4-D + florasulam and the 2,4-D + chlorsulfuron provided the same effect.

The Tukey HSD test proved significant differences in herbicide efficacy (Table 5). The pyroxsulam + florasulam + aminopyralid showed the highest efficacy on dicot and grass weeds (96% and 98%, respectively) and the 2,4-D + chlorsulfuron showed the least efficacy (95.4% and 89%). Lower efficacy of all herbicide treatments (90-95%) were recorded for the following species: *Consolida regalis, C. orientalis, Galium aparine, Papaver* spp*., *Fumaria officinalis* L.* and *Fallopia convolvulus**. The *Alopecurus myosuroides* density on herbicide

175 treated plots did not differ significantly from untreated control plots; with the average number
176 of plants ranging from 0.7 to 1.6/m^2. Keller et al. (2015) also found an increase in this weed's
177 frequency after three decades of field experiment and ascribed this to a high proportion of
178 winter cereals in the crop rotation.
179 The *Veronica* spp. density on untreated plots was comparable with herbicide treated plots,
180 except in plots treated with the pyroxsulam + florasulam + aminopyralid and 2,4-D where
181 *Veronica* spp. density was significantly lower. *Apera spica-venti* was best controlled by the
182 pyroxsulam + florasulam + aminopyralid and we recorded the highest abundance of this weed
183 after other tested herbicide treatments (Table 6). Pawlonka and Rymuza (2014) recorded an
184 increasing density of this species after chlorsulfuron applications.
185 Conclusion: The treatment with all tested herbicides provided effective weed control.
186 Modern products containing 3 active ingredients had slightly better efficacy than older
187 products containing 1-2 active ingredients which also caused bigger weed species time shifts.
188 Huricane (pyroxsulam + florasulam + aminopyralid) proved the best tested product in winter
189 cereal rotation for efficacy on a broad spectrum of weeds while maintaining reasonable
190 species diversity. Huricane treatment enabled survival of some species with high biodiversity
191 value, such as *Sinapis arvensis**, *Lamium amplexicaule** and *Fallopia convolvulus**; other
192 beneficial species, including *Centaurea cyanus**, *Polygonum aviculare** and *Stellaria media**,
193 were suppressed at all herbicide treated plots. Mustang Forte (2,4-D + florasulam +
194 aminopyralid) is another modern herbicide with a broader spectrum (only dicot) and high
195 efficacy, but it left poorest weed community with low species diversity. Treatment only 2,4-D
196 effectively suppressed some dicotyledonous weeds without significant decrease in diversity;
197 thus this product can be recommended for fields with a low density of grass weeds.
198
199 **Acknowledgments**

Supported by the Ministry of Agriculture of the Czech Republic, institutional support MZE-RO0418. We thank Dr Raymond J. Marshall for language review.

REFERENCES

Bàrberi P., Silvestri N., Bonari E. (1997): Weed communities of winter wheat as influenced by input level and rotation. Weed Research, *37*: 301-313.

Bulletin OEPP/EPPO Bulletin (2012): *42* (3): 367–381.

De Mol F., Von Redwitz C., Schultze M., Gerowitt B. (2012): Composition of weed populations in maize as a function of plant or crop management: results of a nation-wide survey in Germany conducted from 2002 to 2004. Julius-Kühn-Archiv, *435*: 655-662.

De Mol F., Von Redwitz C., Gerowitt B. (2015): Weed species composition of maize fields in Germany is influenced by site and crop sequence. Weed Research, *55*: 574-585.

Derksen D.A., Thomas A.G., Lafond G.P., Loeppky H.A., Swanton C.J. (1995): Impact of post-emergence herbicides on weed community diversity within conservation-tillage systems. Weed Research, *35*: 311-320.

Edesi L., Järvan M., Adamson A., Lauringson E., Kuht J. (2012): Weed species diversity and community composition in conventional and organic farming: a five-year experiment. Žemdirbyste Agriculture, *99*: 339-346.

Hance A.J., Holly K. (1990): Weed Control Handbook: Principles. Blackwell Scientific Publications. Oxford. 582 p.

Hald A.B. (1999): The impact of changing the season in which cereals are sown on the diversity of the weed flora in rotational fields in Denmark. Journal of Applied Ecology *36*: 24-32.

Herbicide Resistance Action Committee (HRAC) (2018): www.hracglobal.com. Accessed 20 March 2018

Hyvönen T., Ketoja E., Salonen J. (2003): Changes in the abundance of weeds in spring cereal fields in Finland. Weed Research, *43*: 348-356.

226 Jones N.E., Smith B.M. (2007): Effects of selective herbicide treatment, row width and spring
227 cultivation on weed and arthropod communities in winter wheat. Aspects of Applied
228 Biology, *81*: 39-46.
229 Keller M., Böhringer N., Möhring J., Rueda-Ayala V., Gutjahr C., Gerhards R. (2015):
230 Changes in weed communities, herbicides, yield levels and effect of weeds on yield in
231 winter cereals based on three decades of field experiments in south-western Germany.
232 Gesunde Pflanzen, *67*:11-20.
233 Kubát K., Hrouda L., Chrtek J., Kaplan Z.., Kirschner J., Štěpánek J. (2002): The Key to
234 Flora of the Czech Republic [In Czech: Klíč ke Květeně České republiky]. Academia,
235 Praha
236 Marshall E.J.P., Brown V.K., Boatman N.D., Lutman P.J.W., Squire G.R., Ward L.K. (2003):
237 The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields. Weed Research, *43*:
238 77-89.
239 Meyer S. (2013): Impoverishment of the arable flora of Central Germany during the past 50
240 years: a multiple-scale analysis. Biodiversity and Ecology Series B 9 Göttingen Centre for
241 Biodiversity and Ecology, Göttingen.
242 Murphy C.E., Lemerle D. (2006): Continuous cropping systems and weed selection.
243 Euphytica, *148*: 61-73.
244 Pawlonka Z., Rymuza K. (2014): The effect of chlorsulfuron on weeds in winter wheat.
245 Romanian Agricultural Research, *31*: 239-243.
246 Salonen J., Hyvönen T., Kaseva J., Jalli H. (2013): Impact of changes cropping practices on
247 weed occurrence in spring cereals in Finland – comparison of surveys in 1997–1999 and
248 2007-2009. Weed Research, *53*: 110-120.

Stoate C., Boatman N.D., Borralho R.J., Carvalho C.R., de Snoo G.R., Eden P. (2001): Ecological impacts of arable intensification in Europe. Journal of Environmental Management, *6*: 337-365.

Storkey J. (2006): A functional group approach to the management of UK arable weeds to support biological diversity. Weed Research, *46*: 513-522.

Storkey J., Westbury D.B. (2007): Managing arable weeds for biodiversity. Pest Management Science, *63*: 517-522.

Storkey J., Meyer S., Still K.S., Leuschner C. (2011): The impact of agricultural intensification and land-use change on the European arable flora. Proceedings of the Royal Society B, *279*: 1421-1429.

Streit B., Rieger S.B., Stamp P., Richner W. (2003): Weed populations in winter wheat as affected by crop sequence, intensity of tillage and time of herbicide application in a cool and humid climate. Weed Research, *43*: 20-32.

Ulber L., Steinmann H.H., Klimek S. (2010): Using selective herbicides to manage beneficial and rare weed species in winter wheat. Journal of Plant Diseases and Protection, *117*: 233-239.

Zengin H. (2000): Changes in weed response to 2,4-D application with 5 repeated applications in spring wheat. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, *25*: 31-36.

268 Table 1. Experimental site characteristics

Longitude	**Latitude**	**Altitude**	**Average annual temperature**	**Average annual precipitation total**	**FAO Classification**	**pH (KCl)**	**Organic carbon/ clay content**
		m	°C	mm			%
14˚30´E	50˚08´N	345	7.9	472	Haplic Luvisols, on loess	6.3	2.4 31.3

269

270

271 Table 2. Summary of herbicides and active ingredients used in the trial. Classification Group

272 by Herbicide Resistance Action Committee (HRAC).

herbicide	dose	formulation	active ingredient	content of a.i.	HRAC group	target weeds
Esteron	0.8 L/ha	EC	2,4 - D	600 g/l	O	dicot, narrower spectrum
Esteron Glean 75 PX	0.8 L/ha 15 g/ha	EC WG	2,4 - D chlorsulfuron	600 g/l 750g/l	O B	annual grasses + dicot, narrower spectrum
Mustang Forte	1 L/ha	SE	aminopyralid 2,4 - D florasulam	10g/l 180g/l 5g/l	O O B	dicot broader spectrum
Huricane	200 g/ha	WG	aminopyralid florasulam pyroxsulam	50g/l 25g/l 50g/l	O B B	annual grasses + dicot, broader spectrum
Untreated control						

273

274

275 Table 3. Weed species composition assessed in April 2013. Average number of plants/ m^2 ±

276 standard errors (SE); proportion of individual species in the dataset (%).

277

Weed species	**number of plants**		**%**	
	Avg.	SE	Avg.	SE
Papaver spp. L.	52.6	22.9	30.9	17
Veronica spp. L.	20.1	15.5	15.1	9.7
Galium aparine L.	16.1	11.8	11.9	9.1
Apera spica-venti (L.) P.Beauv.	15.3	10.3	10.5	
Stellaria media (L.) Vill.	5.7	5.1	6.1	5.8
Fumaria officinalis L.	4.5	4.1	4.1	3.3
Viola arvensis Murray	3.5	2.1	2.9	2.5
Thlaspi arvense L.	3.3	2.5	2.7	1.9
Consolida spp. (DC) Gray	3.2	3	4	3.8
Lamium spp. L.	2.4	2.1	1.9	1.5
Euphorbia helioscopia L.	1.8	1.1	1.3	0.8
Centaurea cyanus L.	1	0.9	1.2	1
Tripleurospermum inodorum (L.) Schultz-Bip.	1	0.8	1.2	0.9
Silene noctiflora L.	1	0.9	1	1
Polygonum aviculare L.	<1		<1	
Erodium cicutarium (L.) L`Hér.	<1		<1	
Sonchus arvensis L.	<1		<1	
Agrostemma githago L.	<1		<1	
Alopecurus myosuroides Huds.	<1		<1	

278

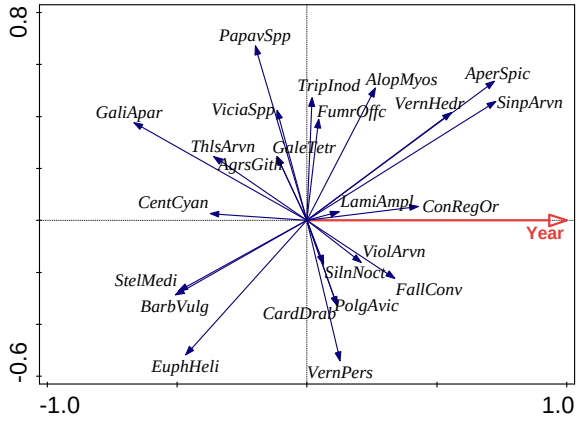
279

Table 4. The average values of indices (Avg.) ± standard errors (SE) in monitored years and treatments. The averages marked by the same letter in individual columns did not significantly differ at $\alpha = 0.05$ (Tukey HSD test).

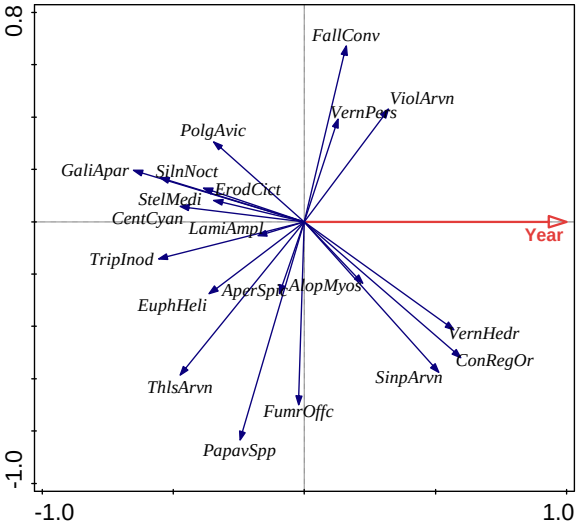
year	**Shannon´s index**		**Shannon evenness**		**Simpson index**	
	Avg.	SE	Avg.	SE	Avg.	SE
2013	1.62^{a}	0.06	$0,67^{ab}$	0.03	0.31^{b}	0.03
2014	1.55^{a}	0.04	$0,62^{a}$	0.02	0.34^{b}	0.02
2015	1.90^{b}	0.05	$0,75^{c}$	0.02	0.21^{a}	0.01
2016	1.88^{b}	0.03	$0,73^{bc}$	0.01	0.22^{a}	0.01
treatment						
2,4-D	1.75^{ab}	0.04	0.7^{a}	0.02	0.26^{a}	0.02
2,4-D + chlorsulfuron	1.71^{ab}	0.05	0.7^{a}	0.02	0.27^{a}	0.02
aminopyralid +2,4- D + florasulam	1.61^{a}	0.07	0.65^{a}	0.02	0.3^{a}	0.03
aminopyralid + florasulam + pyroxsulam	1.79^{ab}	0.07	0.71^{a}	0.03	0.26^{a}	0.03
untreated control	1.83^{b}	0.08	0.7^{a}	0.02	0.25^{a}	0.03

Figure 1. Ordination diagrams of partial Redundancy Analysis (RDA) of weed species composition in different treatments: A) 2,4-D, B) 2,4-D + chlorsulfuron, C) aminopyralid + 2,4-D + florasulam, D) aminopyralid + florasulam + pyroxsulam, E) untreated control; year as explanatory variable and repetition as covariate.

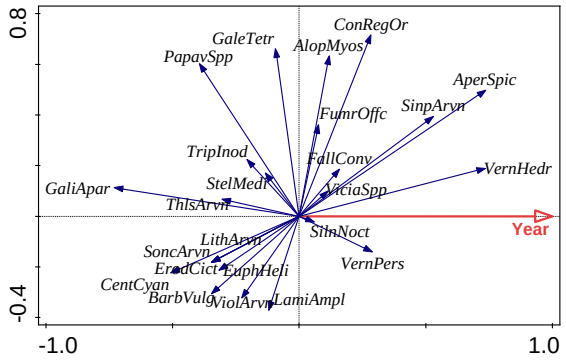
A



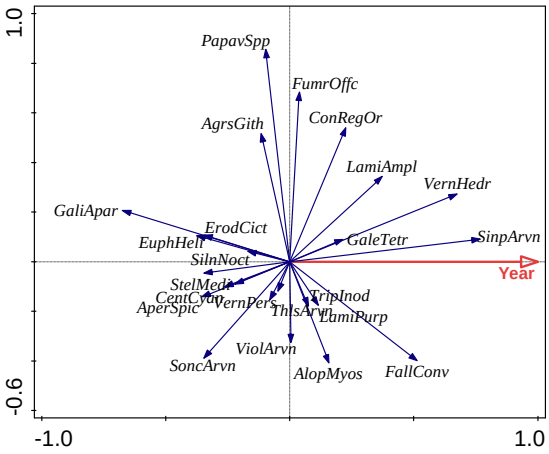
B



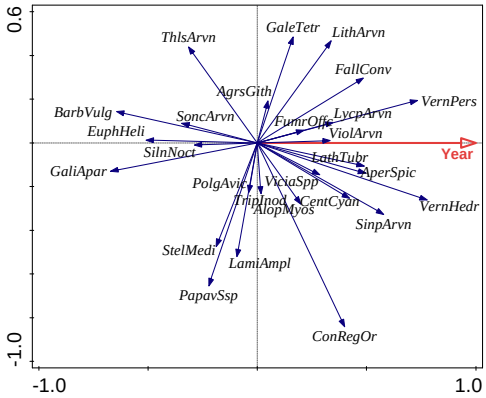
C



D



E



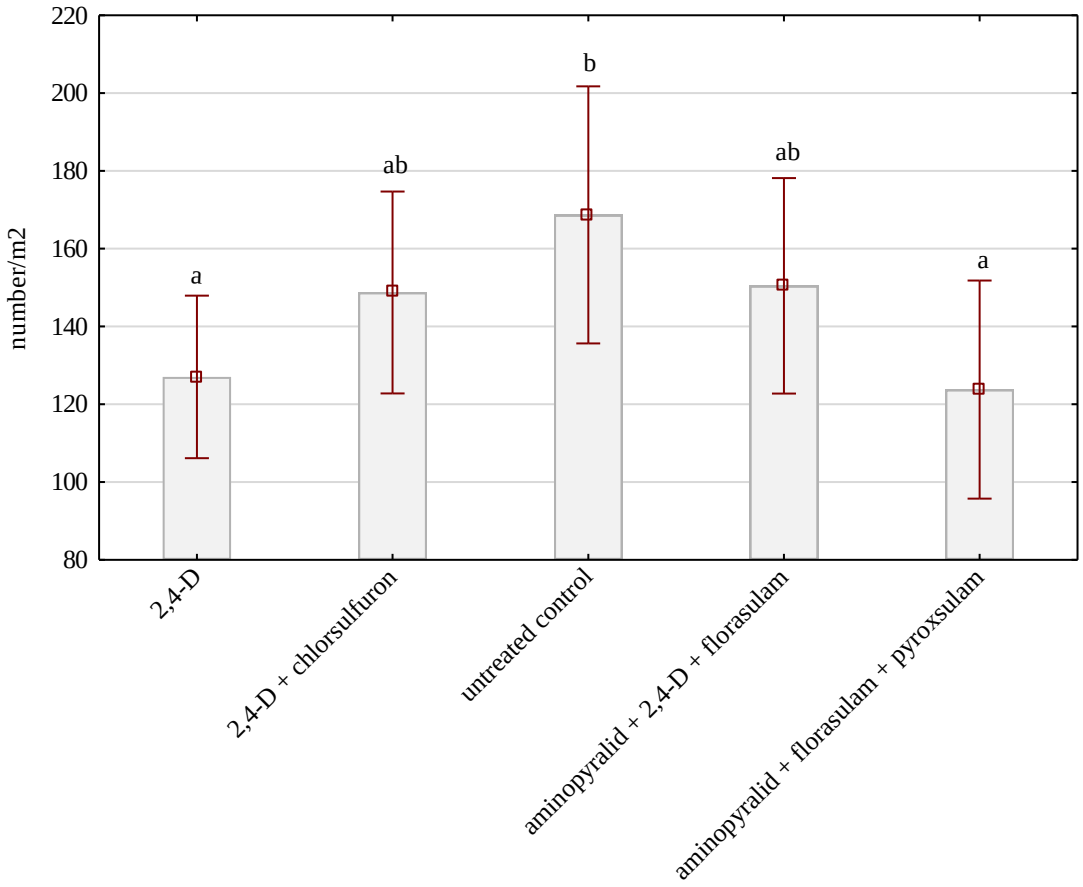
294

295 **Abbreviations for Figure 1:** AgrsGith (*Agrostemma githago*), AlopMyos (*Alopecurus*
296 *myosuroides*), AperSpic (*Apera spica-venti*), BarbVulg (*Barbarea vulgaris*), CardDrab
297 (*Cardaria draba*), CentCyan (*Centaurea cyanus*), ConRegOr (*Consolida regia* and *C.*
298 *orientalis*), ErodCict (*Erodium cicutarium*), EuphHeli (Euphorbia helioscopia), FallConv
299 (*Fallopia convolvulus*), FumOffc (*Fumaria officinalis*), GaleTetr (*Galeopsis tetrahit*),
300 GaliApar (*Galium aparine*), LamiAmpl (*Lamium amplexicaule*), LamiPurp (*Lamium*
301 *purpureum*), LathTuber (*Lathyrus tuberosus*), LithArvn (*Lithospermum arvense*), LycpArvn
302 (*Lycopsis arvensis*), PapavSpp (*Papaver* spp.), PolgAvic (*Polygonum aviculare*), SilnNoct
303 (*Silene noctiflorum*), SinpArvn (*Sinapis arvensis*), SoncArvn (*Sonchus arvensis*), StelMedi
304 (*Stellaria media*), ThlsArvn (*Thlaspi arvense*), TripInod (*Tripleurospermum inodorum*),
305 VernHedr (*Veronica hederifolia*), VernPers (*Veronica persica*), ViciaSpp (*Vicia* spp.),
306 ViolArvn (*Viola arvensis*)

307

308

Figure 2. Effect of treatment on average weed density for 2013-2016. Different letters indicate significant differences at $\alpha = 0.05$ by Tukey HSD test, vertical columns show 0.95 confidence interval.



315 Table 5. Average (Avg.) herbicide efficacy on weeds in % ± standard error (SE) for 2013-
316 2016. The averages marked by the same letter in individual columns did not significantly
317 differ at $\alpha = 0.05$ (Tukey HSD test).

herbicide	dicot		grasses	
	Avg.	SE	Avg.	SE
2,4-D	95.8^{ab}	0.26	0^{a}	-
2,4-D + chlorsulfuron	95.4^{a}	0.19	89^{b}	2.6
aminopyralid + 2,4-D + florasulam	95.6^{a}	0.23	95^{c}	0.33
aminopyralid + florasulam + pyroxsulam	96.5^{b}	0.16	97.8^{c}	0.17

318

319

320 Table 6. Average weed number/m^2 ± standard error after treatment of selected weed species

321 *weed species with high biodiversity value (Marshall et al. 2003, Storkey 2006)

Weed species/ treatment	**2,4-D**	**2,4-D + chlorsulfuron**	**aminopyralid + 2,4-D + florasulam**	**aminopyralid + florasulam + pyroxsulam**	**untreated control**
Veronica spp.	$4.5^{b} \pm 0.3$	$4.3^{b} \pm 0.3$	$4.7^{b} \pm 0.4$	$2.3^{a} \pm 0.2$	$3.9^{b} \pm 0.4$
*Viola arvensis**	$1.3^{c} \pm 0.2$	$1.7^{c} \pm 0.3$	$0.3^{a} \pm 0.7$	$0.5^{ab} \pm 0.1$	$1.1^{bc} \pm 0.2$
*Stellaria media**	$0.3^{ab} \pm 0.09$	$0.1^{a} \pm 0.05$	$0.1^{a} \pm 0.04$	$0.5^{b} \pm 0.1$	$1.2^{c} \pm 0.1$
Apera spica venti	$8.8^{cd} \pm 0.7$	$7^{bc} \pm 0.5$	$6.4^{b} \pm 0.5$	$2.7^{a} \pm 0.3$	$9.6^{d} \pm 0.7$

322

Dear Madam/Sir,
We would like to inform you that the Board of Editors decided on the basis of peer review to publish your paper **Effects of selective herbicide treatment on weed community in cereal crop rotation** (submitted as 289/2018-PSE).

Please log in into the Electronic Editorial System and fill in the Online Billing Information form.

Based on your billing information the Payment instructions will be generated. Please fill in the Online Billing Information form within 1 week.

We cannot process your manuscript further until the payment is done.

Will you send me (pse@cazv.cz) please the Figure 2 in Excel format with data saved as soon as possible, because we need to change the type and the curve thickness in the figure. Thank you very much.

Thank you very much for your cooperation and prompt response.

Yours sincerely,

Mgr. Kateřina Součková
Plant, Soil and Environment
Executive Editor
Czech Academy of Agricultural Sciences
Slezská 7
120 00 Prague 2
Czech Republic
tel.: + 420 606 402 207
fax: + 420 227 010 116
e-mail: pse@cazv.cz
http://agriculturejournals.cz/web/pse.htm

4. Sumární diskuse

Při hodnocení vlivu experimentálních faktorů (různé úrovně hnojení dusíkem, fosforem, draslíkem, chlévským hnojem, vápnění a hustota výsevku) na dlouhodobé výnosové trendy pšenice ozimé na čtyřech lokalitách bylo zjištěno, že zatímco na lokalitách s nižší úrodností půdy (Humpolec, Kostelec) došlo k významnému nárůstu průměrného ročního výnosu na hnojených parcelách mezi první a poslední rotací (25 %, resp. 50 %), na lokalitě s vyšší úrodností (Hněvčeves) se průměrný roční výnos zvýšil průměrně jen o 13 %. Ani zvýšené dávky dusíku (N) nepřinesly adekvátní nárůst výnosu. To potvrzuje i Černý et al. (2010) a Hejcman et Kunzová (2010), kteří zjistili snížený efekt hnojení N na lokalitách s vyšší půdní úrodností. Efekt hnojení byl během pokusu ještě zvýšen zaváděním nových, více výnosných odrůd pšenice s lepší schopností využití živin (Mladenov et al., 2011; Cormier et al., 2016). Specifický pokles výnosu oproti první rotaci (- 9 %) byl zaznamenán v Pernolci, kde došlo k okamžitému poklesu výnosu na nehnojených parcelách a pouze nejvyšší dávky hnojení udržely výnos na stejné úrovni jako na začátku pokusu. Tento atypický trend byl zřejmě způsoben velmi vysokými dávkami hnojení parcel před počátkem pokusu, protože hodnoty výnosů byly poměrně vysoké na zdejší půdně klimatické podmínky.

Pokud porovnáme statisticky významný vliv všech experimentálních faktorů na průměrný výnos zrna pšenice na všech lokalitách, pak jako nejvíce určující pro výnos se ukázalo hnojení N, a to v případě 89,4 % všech dílčích pokusů a v 100 % pokusů prováděných v letech 2007-2013. Hnojení N může průměrně zvýšit výnosy o 2 t/ha, ale tento efekt je silně závislý na lokalitě. Zatímco na lokalitě s dobrou úrodností bylo dosaženo maximálních výnosů už při dávce 110 kg N/ha, na lokalitě s nižší úrodností až při dávce 170 kg N/ha. Velmi vysoké dávky N jsou příčinou častého poléhání rostlin, což má za následek snížení výnosů. Závěry z dalších mezinárodních dlouhodobých pokusů zdůrazňují silnou závislost optimálních dávek hnojení N na lokálních půdně klimatických podmínkách (Brentrup et al., 2004). Také hodnocení dlouhodobých pokusů v České republice potvrzují, že výnos zrna na méně úrodných půdách silně závisí na dávkách N (Kunzová et Hejcman, 2009; Hejcman et Kunzová, 2010). Příjem dusíku rostlinami pšenice byl podstatně ovlivněn i předplodinou (Rahimizadeh et al., 2010).

Druhým významným faktorem byla hustota výsevku, který může potenciálně zvýšit výnos o 0,2 t/ha. Zatímco v chladnějších lokalitách měl vyšší výsevek pozitivní vliv na výnos

(+ 0,5 t/ha), v teplejší lokalitě Hněvčeves byl zaznamenán mírně negativní vliv. Potenciální navýšení výnosu díky výsevku není příliš vysoké z důvodu kompenzačních mechanizmů rostlin, kdy při nižším výsevku 300-500 klíčivých semen/m^2 dochází k navýšení počtu odnoží, které částečně porost zahustí (Stephen et al., 2005).

Vliv ostatních faktorů byl signifikantní v méně než 20 % případů. Zvyšující dávky fosforu (P) měly na všech lokalitách mírně pozitivní vliv na výnosy (nárůst průměrně o 0,5 t/ha) s výjimkou lokality Humpolec, kde dávky nad 50 kg/ha způsobily pokles výnosu. Půdní typ je tak zřejmě určující pro uvolňování P a jeho využití rostlinami. Hnojení chlévským hnojem mělo největší efekt na lokalitě s nízkou počáteční úrodností (Kostelec), kde přispělo ke zvýšení výnosu o 1,5 t/ha. Na ostatních lokalitách byl efekt hnojení hnojem zanedbatelný. Ve většině případů nemělo statisticky významný vliv na výnosy ani hnojení draslíkem (K). Jeho význam byl vyšší na lokalitách se sprašovými půdami oproti půdám na rule, které obsahují vysoké množství K (Madaras et al., 2010). Půdní pH na sledovaných lokalitách se pohybovalo v rozmezí 5,5-6,5, což je optimum pro pěsování pšenice. Proto se vliv vápnění na výnosy ukázal jako zanedbatelný.

Výsledky dlouhodobého polyfaktoriálního pokusu potvrdily silnou závislost experimentálních faktorů na půdně klimatických podmínkách, přičemž výnos byl nejvíce ovlivněn hnojením N. Vliv ostatních faktorů byl slabý nebo zanedbatelný.

Zvyšování výnosů v posledních desetiletích by nebylo možné bez účinné regulace plevelů. To potvrzují např. studie Keller et al. (2014, 2015), které ukazují postupný dlouhodobý nárůst výnosu v ozimých obilninách a kukuřici v případě parcel ošetřovaných herbicidy. Naopak na neošetřených parcelách nebyl signifikantní nárůst výnosu pozorován, i přes pěstování výnosných odrůd, adekvátní hnojení a zavádění moderních agrotechnologií. Přestože výnosy sledovaných plodin během trvání našeho dlouhodobého herbicidního pokusu kolísaly, pravděpodobně vlivem průběhu počasí v jednotlivých letech, byl zaznamenán signifikantní rostoucí trend výnosů na lokalitě Hněvčeves. Tento trend byl výrazný zejména v případě ječmene jarního, ozimé pšenice a hrachu. Naopak na lokalitě Pernolec nebyl tento rostoucí trend zaznamenán, i když na neošetřených parcelách došlo k mnohem výraznějšímu poklesu výnosů než na parcelách ošetřených. Toto zjištění lze vysvětlit jednak nízkou úrodností půd v Pernolci, jednak poměrně nízkým ročním úhrnem srážek způsobeným srážkovým stínem Českého lesa. Zajímavý jev byl zjištěn v posledních 15 letech na lokalitě Hněvčeves, kdy průměrný nárůst výnosu na ošetřených parcelách oproti kontrole činil 76,9 %, kdežto v letech 1972-1985 byl jen 4,9 %. Tento nárůst souvisí s maximalizací výnosů na

ošetřených variantách, kterou umožnilo zavádění moderních, výnosných odrůd, zatímco výnosy na kontrole stagnovaly díky zaplevelení kompetitivními druhy, jako např. *Apera spica-venti*, *Tripleurospermum inodorum* a *Centaurea cyanus* v Pernolci a *Sinapis alba*, *Galium aparine* a *Stellaria media* v Hněvčevsi. Zároveň je možné pozorovat určitý posun ve vývoji počasí směrem k vyšším průměrným teplotám a mírným zimám (Chloupek et al., 2004), které umožnily jednak lepší růst plodin, jednak způsobily vyšší selekční tlak ozimých plevelů *Apera spica-venti*, *Tripleurospermum inodorum*, *Veronica* spp. a *Lamium* spp. na neošetřených parcelách, což napomohlo ke zvýšení rozdílu výnosů mezi ošetřenými a neošetřenými parcelami.

Analýza dlouhodobých výnosových dat napříč roky a lokalitami potvrdila signifikantně vyšší průměrné výnosy na parcelách ošetřených herbicidy v porovnání s neošetřenými parcelami v obou osevních postupech. Pozitivní efekt herbicidního ošetření se lišil mezi plodinami, přičemž relativní nárůst průměrného výnosu oproti kontrole stoupal v tomto pořadí: ječmen jarní < pšenice ozimá < hrách < řepka ozimá < brambory. Nejmenší vliv mělo ošetření na nárůst výnosu u obilnin, které mají vyšší kompetitivní schopnost. Průměrný nárůst výnosu ječmene jarního byl 15 % a 23 % (cílené ošetření a ošetření syntetickými auxiny u zjednodušeného osevního postupu) a 13 % u pestrého osevního postupu. Na druhou stranu u brambor byly výnosy na ošetřené variantě průměrně o 50 % vyšší než na kontrole. To koresponduje s pracemi dalších autorů: Banaras (1993), Harker (2001), Didon et Boström (2003), Zwerger et al. (2004), Mason et al. (2007). Naopak Gaba et al. (2016) zpochybňují vztah mezi výnosem pšenice ozimé a herbicidním ošetřením. Závěry této studie se ale opírají pouze o jednoletá data bez dostatečné informace o dalších agrotechnických zásazích a tlaku plevelů v kritickém období. Nelze je tak považovat za průkazné.

Ošetření pouze syntetickými auxiny mělo podle očekávání na zvýšení výnosů menší efekt než cílené ošetření kombinací herbicidů. To odpovídá i vyššímu zaplevelení tolerantními druhy (*Apera spica-venti*, *Veronica* spp., *Viola arvensis*, *Lamium* spp. a *Tripleurospermum inodorum*), neboť syntetické auxiny působí jen na určitou část plevelového spektra. Mnoho autorů prezentuje negativní vliv zjednodušených osevních postupů na nárůst zaplevelení a výskyt obtížně regulovatelných plevelů (Blackshaw, 1994; Lejins et Lejina, 2007; Koocheki et al., 2009). Přestože byl tento trend zaznamenán i v našem pokusu, negativní vliv zjednodušeného osevního postupu byl potlačen účinným herbicidním ošetřením. Nebyly proto zjištěny významné rozdíly ve výnosech mezi osevními postupy v případě cíleného ošetření

kombinací herbicidů. To dokládá srovnání osevních postupů napříč plodinami pomocí převodu výnosů jednotlivých plodin na „Cereal Units“ (Brankatschk et Finkbeiner, 2014). Nárůst výnosu u cíleného ošetření byl 27 % a 30 % (pestřejší, resp. zjednodušený osevní postup) a 19 % u ošetření syntetickými auxiny.

Více než 40 letý dlouhodobý herbicidní pokus poskytl dostatečné množství dat pro sledování vlivu herbicidního ošetření a osevních postupů na změny plevelového spektra v dlouhodobém horizontu. U obou lokalit bylo dle očekávání na konci pokusu největší zaplevelení na neošetřovaných parcelách a nejnižšší zaplevelení na parcelách ošetřovaných kombinací herbicidů. Vyšší zaplevelení bylo zároveň zaznamenáno na parcelách se zjednodušeným osevním postupem, a to jak ošetřených, tak i neošetřených.

Změny v druhové diverzitě plevelového společenstva byly popsány pomocí indexů diverzity. Shannonův index diverzity (*H´*) se po 40 letech zvýšil na všech parcelách, kromě parcel s cíleným ošetřením. Také Edesi et al. (2012) zjistili klesající tendenci *H´* vlivem herbicidního ošetření v 5 letém pokusu. Naopak Derksen et al. (1995) a Ulber et al. (2010) nezaznamenali signifikantní vliv herbicidního ošetření na druhové bohatství plevelů, což může být v prvním případě způsobeno interakcí ošetření se zpracováním půdy, v druhém případě pouze jednoletým pozorováním. Derksen et al. (1995) zároveň uvádějí nárůst nebo stagnaci indexu vyrovnanosti (*E*) po herbicidní aplikaci. V případě našeho pokusu vzrostl (*E*) na všech parcelách bez ohledu na ošetření. Tento jev je možné vysvětlit uvolněním niky pro méně konkurenceschopné druhy po potlačení dominantních druhů herbicidy (Topham et Lawson, 1982). Ani dlouhodobá aplikace syntetických auxinů nezpůsobila pokles druhové diverzity. To je částečně v souladu s prací Humeho (1987), který uvádí, že 35 letá kontinuální aplikace 2,4-D nezpůsobila signifikantní změny ve složení plevelového společenstva, změnila se pouze hustota zaplevelení jednotlivými druhy. Naopak Zengin (2001) uvádí po 3-4 leté opakované aplikaci 2,4-D pokles početnosti mnoha druhů.

Práce potvrdila vliv pěstované plodiny na druhovou diverzitu plevelového apolečenstva (Gulden et al., 2011; Bellinder et al., 2004). Diverzita plevelů ve dvouděložných plodinách byla vyšší než v ozimých obilninách a nejnižší v jarních obilninách. Pyšek et al. (2005) zaznamenali vyšší druhovou diverzitu v okopaninách, ale vyšší v jarních obilninách než v ozimých obilninách. Naopak Lososová et al. (2004) uvádějí vyšší diverzitu v obilninách než v okopaninách. K tomuto závěru došli i díky tomu, že při svém průzkumu zařadili do stejné kategorie jednoleté i vytrvalé plodiny s různým datem výsevu. Kategorie „obilniny“ tak zahrnovala i řepku olejku nebo pícniny, což vedlo ke konečnému zvýšení diverzity obilnin.

Zjištěné relativně malé rozdíly v druhové diverzitě mezi různými ošetřeními a plodinami uvádí i Barroso et al. (2015). Přestože plevelné druhy poměrně rychle reagují na zvolenou agrotechniku a způsoby regulace plevelů, nemusí to z dlouhodobého pohledu znamenat významný pokles či nárůst diverzity.

Pro hodnocení plevelového spektra byly vybrány tři vysvětlující proměnné, které ovlivnily jeho složení: ošetření, typ plodiny a čas. Dohromady se tyto faktory na variabilitě podílely průměrně 24,9% (zjednodušený osevní postup) a 32,2% (pestrý osevní postup). Nevysvětlený podíl variability pravděpodobně souvisí s jinými faktory, zejména půdně klimatickými podmínkami. Pinke et al. (2012) ve své studii přisuzují faktorům prostředí dvakrát vyšší podíl na variabilitě než agrotechnickým faktorům. K podobnému závěru došli i de Mol et al. (2015). Naopak v regionálním měřítku Cimalová et Lososová (2009) vyzdvihují vliv typu plodiny a s ním spojené agrotechniky. Typ plodiny měl i v našem případě největší podíl (průměrně 15 %) na variabilitě plevelového společenstva, a to v obou osevních postupech na ošetřených i neošetřených parcelách. To je v souladu s mnoha dalšími pracemi (Fried et al., 2008; Lososová et Cimalová, 2009; Pinke et al., 2012; Nowak et al., 2015). Dalším významným faktorem byl čas, který se na variabilitě podílel průměrně více než 10%. Silný vliv ročníku uvádí také Grundy et al. (2010), kdežto de Mol et al. (2012) považují vliv ročníku za zanedbatelný. Oproti původní hypotéze nebyl potvrzen významný vliv ošetření, jeho podíl byl pouze malý (3 %) nebo nesignifikantní. Ani de Mol et al. (2012) nezjistili korelaci mezi složením plevelového společenstva a herbicidním ošetřením. V dlouhodobém horizontu je efekt herbicidního ošetření částečně vyrovnáván semeny přeživších rostlin z půdní banky (Hyvönen et Salonen, 2002). Streit et al. (2003) potvrdili signifikantní vliv herbicidního ošetření, ale v jejich 3 letém pozorování byl zkombinován vliv preemergentní a postemergentní aplikace spolu s různým zpracováním půdy, což mohlo vést k odlišným závěrům.

Přestože vliv ošetření se ukázal jako malý, podíl dalších dvou faktorů na variabilitě v rámci jednotlivých ošetření se lišil. Plevelové společenstvo bylo více ovlivněno typem plodiny a časem na neošetřených parcelách (36,6 % a 31,8 % u pestrého, resp. zjednodušeného osevního postupu) v porovnání s ošetřenými parcelami, kde se ošetření podílelo na nevysvětlené variabilitě a přispělo ke snížení vlivu sledovaných fakrorů. Také Bàrberi et al. (1997) pozorovali vliv předplodiny a osevního sledu na plevelové společenstvo v ozimé pšenici pouze v případě redukovaného herbicidního ošetření.

Co se týká časového trendu ve složení plevelového společenstva, na obou lokalitách došlo v porovnání s pozorováním na počátku pokusu k několika změnám. Na lokalitě Hněvčeves to byl významný nárůst početnosti některých druhů, jako např. *Lamium* spp., *Veronica* spp., *Tripleurospermum inodorum* a *Sinapis alba,* který se rozšířil z výdrolu po meziplodině. Na této lokalitě s vyšší úrodností půdy a vyšší intenzitou obhospodařování polí v těsné blízkosti pokusu byla oproti druhé lokalitě pozorována nižší druhová diverzita a vyšší zastoupení dominantních druhů, a to na všech parcelách. Na neošetřených parcelách byl navíc patrný nárůst *Galium aparine, Papaver* spp. a *Stellaria media*, na ošetřených *Apera spica-venti, Cirsium arvense* a *Fumaria officinalis*. Výrazně klesla početnost druhu *Matricaria chamomilla*, což lze přičíst jednak jeho citlivosti k herbicidům, ale i ke zpracování půdy a nízké konkerenceschopnosti v ozimých obilninách na kontrole. Na lokalitě Pernolec byla od počátku pokusu druhová diverzita vyšší, během doby trvání pokusu zde bylo zaznamenáno 53 plevelných druhů, v Hněvčevsi pouze 29. Stejně jako v Hněvčevsi zde došlo k potlační některých druhů nezávisle na ošetření či osevním postupu. Jedná se např. o druhy *Raphanus raphanistrum, Myosotis arvensis, Scleranthus annuus* nebo *Erophila verna*. Tento úbytek způsobený účinnou regulací herbicidy byl rychlejší na ošetřených parcelách než na kontrole, kde zřejmě došlo k postupnému potlačování těchto druhů i díky agrotechnickým zásahům. Jiné druhy, jako např. *Apera spica-venti, Arabidopsis thaliana, Stellaria media* a *Fallopia convolvulus,* nevykazovaly významný časový trend a vyskytovaly se víceméně rovnoměrně od počátku pokusu do současnosti. Pozitivním jevem na neošetřených parcelách bylo zvýšení početnosti druhů *Centaurea cyanus* a *Lycopsis arvensis*, u nichž je zaznamenán pokles výskytu v rámci Evropy. Naopak na území České republiky se tyto druhy v současnosti opět rozšiřují, zřejmě v důsledku zjednodušování osevních postupů, minimalizačních technologií zpracování půdy bez podmítky nebo absence podzimní chemické ochrany. V případě teplých zim tak dochází k rychlému vývoji rostlin těchto druhů a zvýšení jejich konkurenceschopnosti na jaře. Negativní bylo zvýšené zaplevelení kontrolních parcel konkurenčně významnými druhy *Tripleurospermum inodorum* a *Thlaspi arvense.* Přestože početnost mnoha citlivých druhů, např. *Arabidopsis thaliana, Fallopia convolvulus, Galeopsis tetrahit, Anagallis arvensis* nebo *Polygonum aviculare* vlivem ošetření poklesla, ani po 40 letech nedošlo k jejich úplnému potlačení. Díky cílenému ošetření podle pěstované plodiny a intenzity zaplevelení nedocházelo během pokusu k používání jednoho přípravku se stejnou účinnou látkou po tak dlouhou dobu, aby způsobila nezvratné posuny v plevelovém spektru. Hyvönen et al. (2003) nezaznamenali v období 1980-90 změny plevelového spektra jarních obilnin

navzdory dlouhodobé aplikaci sulfonylmočovin. Rotchés-Ribalta et al. (2017) uvádějí vliv dlouhodobé aplikace herbicidů na potlačení citlivých plevelů a vývoj rezistentních populací druhů *Alopecurus myosuroides*, *Chenopodium polyspermum* a *Capsella bursa-pastoris*. Tato studie porovnává farmy s organickým hospodařením a farmy s konvenčním přístupem, který zahrnuje kromě herbicidů i minerální hnojení. To pravděpodobně vedlo k poněkud odlišným závěrům.

Ani dlouhodobá aplikace syntetických auxinů nezpůsobila očekávané významné změny plevelového spektra. Možným vysvětlením je postupný pokles účinnosti těchto herbicidů na některé dvouděložné plevele (*Centaurea cyanus*, *Veronica* spp., *Lamium* spp. a *Fumaria officinalis*) a opětovný nárůst jejich početnosti (Zengin, 2001). Někteří autoři uvádějí zvýšený výskyt vytrvalých plevelů (*Elytrigia repens*, *Cirsium arvense*) na orné půdě v důsledku dlouhodobé herbicidní ochrany proti dvouděložným plevelům v obilninách (Hyvönen et Salonen, 2002), v našem pokusu tento trend zaznamenán nebyl. Důvodem je jednak každoroční hluboká orba, jednak dodržování osevních postupů.

Zjednodušený osevní postup vykazoval podobné trendy na všech parcelách, kdežto v případě pestrého osevního postupu byla početnost mnoha druhů ovlivněna sledovanými faktory více na neošetřené kontrole než na ošetřených parcelách. V porovnání s kontrolními parcelami dochází na ošetřovaných parcelách k postupné redukci rozdílů v početnosti jednotlivých druhů. Zdá se, že potlačení citlivých, dominantních plevelů může vést k mírnému zvýšení populací některých tolerantních, méně kompetitivních plevelů.

Práce potvrdila obecně známou odezvu plevelných druhů na pěstovanou plodinu (Koocheki et al., 2009; de Mol et al., 2015; Nowak et al., 2015), přičemž typ plodiny měl o něco větší význam na parcelách s pestrým osevním postupem. Zatímco ozimé druhy, jako např. *Apera spica-venti*, *Arabidopsis thaliana*, *Tripleurospermum inodorum*, *Centaurea cyanus* a *Papaver* spp. byly spojeny s pěstováním ozimých obilnin; *Fallopia convolvulus*, *Galeopsis tetrahit*, *Chenopodium album* a *Anagallis arvensis* zaplevelovaly jarní obilniny. V okopaninách se více vyskytovaly *Taraxacum* sect. *Ruderalia*, *Equisetum arvense*, *Plantago major* a *Avena fatua*.

Nové přístupy regulace plevelů hledají rovnováhu mezi dostatečnou rostlinnou produkcí a zachováním uspokojivé druhové rozmanitosti (Marshall et al., 2003). Kapitola 3.3 porovnává dvě strategie herbicidního ošetření v ozimých plodinách a hodnotí možnosti těchto strategií s ohledem na jejich dostatečnou účinnost při zachování druhového spektra plevelů. Signifikantní vliv ošetření byl prokázán jen v případě Shannonova indexu (*H´*), kdy jeho

nejvyšší průměrná hodnota byla na neošetřené kontrole, nejnižší při ošetření kombinací účinných látek *2,4-D+florasulam+aminopyralid*. Simpsonův index dominance (*D*) a index vyrovnanosti (*E*) nebyly ošetřením signifikantně ovlivněny, ale výše jmenovaná kombinace účinných látek měla průměrně nejvyšší hodnoty *D* a nejnižší *E*, což svědčí o jejím negativním vlivu na druhovou diverzitu.

Složení plevelového společenstva se měnilo v závislosti na ročníku a ošetření, přičemž ročník se podílel na variabilitě 20,4 % a ošetření 6,9 %. Zatímco dlouhodobá herbicidní aplikace ovlivňuje kromě vzešlých plevelových druhů i semennou banku (Bàrberi et al, 1997), krátkodobý vliv se odráží především ve složení a početnosti vzešlých druhů (Hald, 1999). Po čtyřech letech sledování vzrostla na kontrole početnost mnoha druhů, a to jak běžně rozšířených (*Veronica persica, V.hederifolia, Viola arvensis, Centaurea cyanus*), tak méně obvyklých (*Lathyrus tuberosus, Lycopsis arvensis, Consolida regalis, C. orientalis*). Trávovité plevele *Apera spica-venti* a *Alopecurus myosuroides* vykazovaly nárůst početnosti na parcelách ošetřených *2,4-D* a *florasulamem* a pokles na parcelách ošetřených *pyroxsulamem* a *chlorsulfuronem*. Za pozitivní lze považovat zvýšení početnosti některých druhů s vyšší hodnotou pro biodiverzitu (*Sinapis arvensis, Lamium amplexicaule* a *Fallopia convolvulus*) na parcelách ošetřených kombinací účinných látek *pyroxsulam+florasulam+aminopyralid* a ošetřených *2,4-D*. Naopak další prospěšné druhy (*Centaurea cyanus, Polygonum aviculare, Stellaria media*) byly potlačeny na všech ošetřených parcelách.

Nejvyšší účinnost na dvouděložné i trávovité plevele byla prokázána pro kombinaci účinných látek *pyroxsulam+florasulam+aminopyralid*, nejnižší pro *2,4-D+chlorsulfuron*. Nižší účinnost (90-95 %) všech ošetření byla pozorována u druhů *Consolida regalis, C.orientalis, Papaver* spp., *Fumaria officinalis* a *Fallopia convolvulus. Apera spica-venti* a *Veronica* spp. byly nejlépe regulovány kombinací *pyroxsulam+florasulam+aminopyralid,* ostatní ošetření měla nižší účinnost. Jako problematický se ukázal druh *Alopecurus myosuroides*, u kterého byla hustota zaplevelení srovnatelná s kontrolou. Problémy s tímto druhem jsou přičítány vysokému zastoupení obilnin v osevních postupech (Keller et al., 2015).

Ošetření všemi testovanými herbicidy poskytlo efektivní regulaci plevelů, přičemž moderní přípravky obsahující tři účinné látky měly o něco vyšší účinnost než starší přípravky s jednou a dvěma účinnými látkami, u kterých byl zaznamenán větší posun v plevelovém spektru. Přípravek Huricane s kombinací *pyroxsulam+florasulam+aminopyralid* navíc

umožnil přežití některých druhů s vyšší hodnotou pro diverzitu. Naopak ošetření dalším moderním přípravkem Mustang forte (*2,4-D+florasulam+aminopyralid*) mělo za následek druhově chudší plevelové společenstvo s nižší diverzitou. Pro případy s nízkým zaplevelením trávovitými druhy lze doporučit i nízkonákladové ošetření *2,4-D*, které zaručí účinnou kontrolu dvouděložných plevelů bez významného poklesu diverzity.

5. Závěr

Dlouhodobé polní pokusy prováděné v rámci VÚRV, v.v.i. poskytly obsáhlý zdroj dlouhodobých dat, jejichž hodnocení moderními statistickými metodami umožnilo získat výsledky s vysokou vypovídací hodnotou.

Průběh počasí v jednotlivých letech a půdně klimatické podmínky hrají důležitou roli při tvorbě výnosu plodin a složení plevelového společenstva. Přesto existují účinné agrotechnické zásahy, kterými lze agroekosystém ovlivňovat. V případě výnosů je to především hnojení dusíkem, jehož dávky musí být přizpůsobeny právě půdně klimatickým podmínkám, aby mohl být rostlinami efektivně využit a nedocházelo k jeho vyplavování do půdy a podzemních vod. To platí i pro hnojení dalšími minerálními a organickými hnojivy, jejichž vliv na výnos ovšem není tak významný. Nepřiměřeně vysoké dávky hnojiv tak nejenže nepřinášejí zvýšené výnosy, ale přispívají ke znečišťování životního prostředí a v neposlední řadě představují i zbytečné ekonomické náklady. Zárukou pro dosažení optimálních výnosů je účinné používání herbicidních látek, nejlépe cílené ošetření moderními, vícesložkovými přípravky s ohledem na stav zaplevelení a složení plevelového spektra. Přestože je tento fakt v poslední době zpochybňován, práce přinesla jednoznačné důkazy o pozitivním vlivu herbicidního ošetření na dlouhodobé zvyšování výnosů, jehož význam roste při pěstování dvouděložných plodin s nízkou konkurenční schopností v počátečních růstových fázích. Také ve zjednodušených osevních postupech s vysokým podílem obilnin je role herbicidů pro tvorbu výnosů zásadní. Práce tak potvrdila hypotézu, že chemická ochrana plevelů významně přispívá k zajištění výnosů a jejich dlouhodobému růstu v závislosti na stanovištních podmínkách a pěstované plodině.

Během trvání dlouhodobého pokusu docházelo ke změnám ve složení plevelového společenstva, tyto změny však nelze jednoznačně přisuzovat používání herbicidů. Druhá hypotéza tak byla potvrzena částečně. Dlouhodobé používání herbicidů sice vedlo ke snížení některých charakteristik diverzity a rychlejšímu ústupu citlivých druhů, ale nejvýznamnějším faktorem, který určuje složení plevelového společenstva, se ukázal typ plodiny a osevní postup. Uplatňování osevních postupů s různorodým zastoupením plodin proto podporuje nejen druhovou diverzitu plevelového spektra, ale podílí se i na nižší úrovni zaplevelení. Výběr účinných herbicidů podle výskytu a úrovně zaplevelení obtížnými plevelnými druhy a střídání přípravků s různými účinnými látkami přispívá k poklesu početnosti potenciálně dominantních druhů a podporuje přežití druhů s nižší mírou konkurenceschopnosti. Střídání plodin, přesné hnojení a cílený výběr herbicidních přípravků tak v konečném důsledku

přinášejí nejen vyšší výnosy a úsporu chemických látek, ale i vyšší biodiverzitu, která je z dlouhodobého pohledu důležitá pro udržení úrodnosti našich polí a stabilitu agroekosystémů.

6. Seznam použité literatury

Albrecht, H. 2003. Suitability of arable weeds as indicator organisms to evaluate species conservation effects of management in agricultural ecosystems. Agriculture, Ecosystems and Environment. 98. 201-211.

Albrecht, H. 2005. Development of arable weed seedbanks during the 6 years after the change from conventional to organic farming. Weed Research. 45. 339-350.

Anderson, R.L. 2010. A rotation design to reduce weed density in organic farming. Renewable Agriculture and Food Systems. 25. 189-195.

Andreasen, C., Stryhn, H. 2008. Increasing weed flora in Danish arable fields and its importance for biodiversity. Weed Research. 48. 1-9.

Andreasen, C., Stryhn, H., Streibig, C. 1996. Decline of the flora in Danish arable fields. Journal of Applied Ecology. 33. 619-626.

Andreasen, C., Streibig, C. 2010. Evaluation of changes in weed flora in arable fields of Nordic countries – based on Danish long – term surveys. Weed Research. 51. 214-226.

Andrew, I.K.S., Storkey, J., Sparkes, D.L. 2015. A review of the potential for competitive cereal cultivars as a tool in integrated weed management. Weed Research. 55. 239-248.

Banaras, M. 1993. Impact of weed competition on potato production. Pakistan Journal of Agricultural Research. 14. 64-71.

Barroso, J., Miller, Z.J., Lehnhoffm E.A., Hatfield, P.G., Menalled, F.D. 2015. Impacts of cropping system and management practices on the assembly of weed communities. Weed Research. 55. 426-435.

Bàrberi, P., Silvestri, N., Bonari, E. 1997. Weed communities of winter wheat as influenced by input level and rotation. Weed Research. 37. 301-313.

Barrett, S.C.H. 1983. Crop mimicry in weeds. Economic Botany. 37. 255-282.

Bellinder, R.R., Dillard, H.R., Shah, D.A. 2004. Weed seedbank community responses to crop rotation schemes. Crop Protection. 23. 95-101.

Blackshaw, R.E. 1994. Rotation affects downy brome (Bromus tectorum) in winter wheat (Triticum aestivum). Weed Technology. 8. 728-732.

Blackshaw, R.E., Larney, F.J., Lindwall, C.W., Watson, P.R., Derksen, D.A. 2001. Tillage intensity and crop rotation affect weed community dynamics in a winter wheat cropping system. Canadian Journal of Plant Science. 81(4). 805-813.

Boström, U., Fogelfors, H. 2002. Long-term effects of herbicide-application strategies on weeds and yield in spring-sown cereals. Weed Science. 50. 196-203.

Booth, B.D., Murphy, S.D., Swanton, C.J. 2003. Weed Ecology in Natural and Agriculturals Systems. CABI Publishing. Wallingford. 288 p.

Brankatschk, G., Finkbeiner, M. 2014. Application of the Cereal Unit in a new allocation procedure for agricultural life cycle assessments. Journal of Cleaner Production. 73. 72-79.

Brentrup, F., Kusters, J., Lammel, J., Barraclough, P., Kuhlmann, H. 2004. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology - II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems. European Journal of Agronomy. 20. 265-279.

Cardina, J., Webster, T.M., Herms, C.P. 1998. Long-term tillage and rotation effects on soil seedbank characteristics. Aspects of Applied Biology. 51. 213-220.

Cimalová, Š., Lososová, Z. 2009. Arable weed vegetation of northeastern part of the Czech Republic: effects of environmental factors on species composition. Plant Ecology. 203. 45-57.

Cirujeda, A., Aibar, J., Zaragoza, C. 2011. Remarkable changes of weed species in Spanish cereal fields from 1976 to 2007. Agronomy Sustainable Development. 31. 675-688.

Cobb, A.H., Kirkwood, R.C. 2000. Herbicides and their Mechanism of Action. Sheffield Academic Press. Sheffield. 295 p.

Cormier, F., Foulkes, J., Hirel, B., Gouache, D., Moenne-Loccoz, Z., Legouis, J. 2016. Breeding for increased nitrogen-use efficiency: a review for wheat (*T. aestivum* L.). Plant Breeding. 135. 255-278.

Corre-Hellou, G., Dibet, A., Hauggaard-Nielsen, H., Crozat, Y., Gooding, M., Ambus, P., Dahlmann, C., von Fragstein, P., Pristeri, A., Monti, M., Jensen, E.S. 2011. The competitive-

ability of pea-barley intercrops against weeds and the interaction with crop productivity and soil N availability. Field Crop Research. 122. 264-272.

Černý, J., Balík, J., Kulhánek, M., Čásová, K., Nedvěd, V. 2010. Mineral and organic fertilization efficiency in long-term stationary experiments. Plant, Soil and Environment. 56. 28-3.

Dekker, J. 1997. Weed diversity and weed management. Weed Science. 45. 357-363.

Demjanová, E., Macák, M., Týr, Š., Djalovič, I., Žák, Š., Smatana, J. 2008. Weed populations in maize as affected by crop rotation and primary soil tillage. Journal of Plant Diseases and Protection, Special Issue. 21. 529-534.

de Mol, F., von Redwitz, C., Gerowitt, B. 2015. Weed species composition of maize fields in Germany is influenced by site and crop sequence. Weed Research. 55. 574-585.

de Mol, F., von Redwitz, C., Schultze, M., Gerowitt, B. 2012. Composition of weed populations in maize as a function of plant or crop management: results of a nation-wide survey in Germany conducted from 2002 to 2004. Julius-Kühn-Archiv. 435. 655-662.

Derksen, D.A., Thomas, A.G., Lafond, G.P., Loeppky, H.A., Swanton, C.J. 1995. Impact of post-emergence herbicides on weed community diversity within conservation-tillage systems. Weed Research. 35. 311-320.

Derksen, D.A., Thomas, A.G., Lafond, G.P., Loeppky, H.A. 1996. Understanding weed community dynamics: Implications for weed management. In: Brown, H., Cussans, G.W., Duvine, M.D., Duke, S.O., FernandezQuintanilla, C., Helweg, A., Labrada, R.E., Landes, M., Kudsk, P., Streibig, J.C.(eds). Second international weed control congress-proceedings. 49-54.

Deyl, M. 1964. Plevele polí a zahrad. Nakladatelství Československé akademie věd. Praha. 380 s.

Didon, U.M.E., Boström, U. 2003. Growth and development of six barley (*Hordeum vulgare* ssp. *vulgare* L.) cultivars in response to a model weed (*Sinapis alba* L.). Journal of Agronomy and Crop Science. 189. 409-417.

Edesi, L., Järvan, M., Adamson, A., Lauringson, E., Kuht, J. 2012. Weed species diversity and community composition in conventional and organic farming: a five-year experiment. Zemdirbyste. 99. 339-346.

Franke, A.C., Lotz, L.A.P., van der Burg, W.J., van Overbeek, L. 2009. The role of arable weed seeds for agroecosystem functioning. Weed Research. 49. 131-141.

Freyer, J.D., Makepeace, R.J. (eds). 1977. Weed Control Handbook: Principles v. I. Blackwell Science. Oxford. 480 p.

Fried, G., Norton, L.R., Reboud, X. 2008. Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France. Agriculture, Ecosystems and Environment. 128. 68-76.

Gaba, S., Gabriel, E., Chadœuf, J., Bonneu, F., Bretagnolle, V. 2016. Herbicides do not ensure for higher wheat yield, but eliminate rare plant species. Scientific Report. 6. 30112.

Gabriel D., Tscharntke, T. 2007. Insect pollinated plants benefit from organic farming. Agriculture, Ecosystems and Environment. 118. 43-48.

Gianessi, L. 2013. The increasing importance of herbicides in worlwide crop production. Pest Management Science. 69. 1099-1105.

Grundy, A.C., Mead, A., Bond, W., Clark, G., Burston, S. 2010. The impact of herbicide management on long-term changes in the diversity and species composition of weed populations.Weed Research. 51. 187-200.

Gulden, R.H., Lewis, D.W., Froese, J.C., Van Acker, R.C., Martens, G.B., Entz, M.H., Derksen, D.A., Bell, L.W. 2011. The Effect of Rotation and In-Crop Weed Management on the Germinable Weed Seedbank after 10 Years. Weed Science. 59. 553-561.

Haas, H., Streibig, J.C. 1982. Changing patterns of weed distribution as a result of herbicide use and other agronomic factors. In: Herbicide Resistance in Plants. Le Baron, H.M., Gressel, J. (eds). John Wiley and Sons. New York. 57-79.

Håkansson, S. 2003. Weeds and Weed Management on Arable Land. CABI Publishing. Wallingford. 274 p.

Hald, A.B. 1999. The impact of changing the season in which cereals are sown on the diversity of the weed flora in rotational fields in Denmark. Journal of Applied Ecology. 36. 24-32.

Hance, A.J., Holly K. (eds.). 1990. Weed control handbook: Principles. Blackwell scientific publications. Oxford. 582 p.

Harker, K.N. 2001. Survey of yield losses due to weeds in central Alberta. Canadien Journal of Plant Science. 81. 339-342.

Hawes, C., Squire, G.R., Hallet, P.D., Watson, C.A., Young, M. 2010. Arable plant communities as indicators of farming practice. Agriculture, Ecosystems and Environment. 138. 17-26.

Heap, I. The International Survey of Herbicide Resistant Weeds [online]. Internet. Saturday, June 6, 2015. [cit. 2015-6-6] Dostupné z www.weedscience.org

Hejcman, M., Kunzová, E. 2010. Sustainability of winter wheat production on sandy-loamy Cambisol in the Czech Republic: Results from a long-term fertilizer and crop rotation experiment. Field Crops Research. 15. 191-199.

Holec, J., Soukup, J., Jursík, M., Hamouz, P. 2004. Invasive weed species on arable land in the Czech Republic. Journal of Plant Diseases and Protection. 19. 231-236.

Holzner, W. 1978. Weed species and weed communities. Vegetatio. 38. 13-20.

Hossard, L., Philibert, A., Bertrand, M., Colnenne-David, C., Debaeke, P., Munier-Jolain, N., Jeuffroy, M.H., Richard, G., Makowski, D. 2014. Effects of halving pesticide use on wheat production. Scientific Reports. 4. 4405.

Hron, F., Vodák, A. 1959. Polní plevele a boj proti nim. Státní zemědělské nakladatelství. Praha. 380 s.

Hume, L. 1987. Long-term effects of 2,4-D application on plants. I. Effects on the weed community in a wheat crop. Canadian Journal of Botany. 65 (12). 2530-2536.

Huston, M.A. 1994. Biological Diversity: the coexistence of species on changing landscape. Cambridge University Press. Cambridge. 671 p.

Hyvönen, T., Salonen, J. 2002. Weed species diversity and community composition in cropping practices at two intensity levels – a six-year experiment. Plant Ecology 154. 73-81.

Hyvönen, T., Ketoja, E., Salonen, J. 2003. Changes in the abundance of weeds in spring cereal fields in Finland. Weed Research. 43. 348-356.

Chloupek, O., Hrstkova, P., Schweigert, P. 2004. Yield and its stability, crop diversity, adaptability and response to climate change, weather and fertilisation over 75 years in the Czech Republic in comparison to some European countries. Field Crops Research. 85. 167-190.

Jehlík, V. (ed.). 1998. Cizí expanzivní plevele České republiky a Slovenské republiky. Academia. Praha. 506 s.

Jones, N.E., Smith, B.M. 2007. Effects of selective herbicide treatment, row width and spring cultivation on weed and arthropod communities in winter wheat. Aspects of Applied Biology. 81. 39-46.

José-María, L., Sans, F.X. 2011. Weed seedbanks in arable fields: effects of management practices and surrounding landscape. Weed Research. 51. 631-640.

Jursík, M., Holec, J., Hamouz, P., Soukup, J. 2011. Plevele. Biologie a regulace. Kurent, s.r.o. České Budějovice. 232 s.

Keller, M., Böhringer, N., Möhring, J., Rueda-Ayala, V., Gutjahr, C., Gerhards, R. 2014. Long-term changes in weed occurrence, yield and use of herbicides in maize in south-western Germany, with implications for determination of economic thresholds. Weed Research. 54. 457-466.

Keller, M., Böhringer, N., Möhring, J., Rueda-Ayala, V., Gutjahr, C., Gerhards, R. 2015. Changes in weed communities, herbicides, yield levels and effect of weeds on yield in winter cereals based on three decades of field experiments in south-western Germany. Gesunde Pflanzen 67. 11-20

Kohout, V. 1997. Plevele polí a zahrad. Agrospoj. Praha. 235 s.

Kolářová, M., Tyšer, L., Soukup, J. 2013. Diversity of current weed vegetation on arable land in selected areas of the Czech Republic. Plant, Soil and Environment. 59 (5). 208-2013.

Koocheki, A., Nassiri, M., Alimoradi, L., Ghorbani, R. 2009. Effect of cropping systems and crop rotations on weeds. Agronomy for Sustainable Development. 29 (2). 401-408.

Körschens, M. 2006. The importance of long-term field axperiments for soil science and environmental research – a review. Plant, Soil and Environment. 52 (Special Issue). 1-8.

Kudsk, P., Streibig, J.C. 2003. Herbicides- a two-edged sword. Weed Research. 43. 90-102.

Kudsk, P. 2008. Optimising herbicide dose: a straightforward approach to reduce the risk of side effects of herbicides. Environmentalist 28. 49-55.

Kunzová, E., Hejcman, M. 2009. Yield development of winter wheat over 50 years of FYM, N, P and K fertilizer application on black earth soil in the Czech Republic. Field Crops Research. 111. 226-234.

Légère, A., Derksen, D.A. 2000. Is diversity a useful concept for weed management? In: XIth International Conference on Weed Biology. Dijon. 407-414.

Légère, A., Samson, N., Rioux, R. 1993. Perennial weeds in conservation tillage systems: more of an issue than in conventional tillage systems? In: Proceeding of an international conference organised by The British Crop Protection Council. Brighton. 2. 747-752.

Légère, A., Stevenson, F.C., Benoit, D.L. 2005. Diversity and assembly of weed communities: contrasting responses across cropping systems. 2005. Weed Research. 45. 303-315.

Lejins, A., Lejina, B. 2007. The grain crop yield in different crop rotation and efficiency of herbicides and fungicides treatment. In: Noviks, G. (ed). Environment, Technology, Resources Proceedings. 125-131.

Lemerle, D., Murphy, C. 2000. Cultural Management Methods. In: Sindel, B. (ed.) Australian Weed Management Systems. Richardson, R.G. and Meredith, F.J. 123-138.

Lemerle, D, Gill, G. S., Murphy, C. E., Walker, S. R., Cousens, R. D., Mokhtari, S., Peltzer, S. J., Coleman, R., Luckett, D. J. 2001. Genetic improvement and agronomy for enhanced wheat competitiveness with weeds. Australian Journal of Agricultural Research. 52(5). 527 – 548.

Lipavský, J., Ludva, L., Hromadová, M., Kubát, J. 2005. An overview of the long-term static field experiments in the Czech Republic. In: Voříšek, K. et al. (ed.): The role of long term field expeiments in agricultural and ecological science and practical solutions for managing optimum C and N content in agricultural soils III. Conference Proceedings. Praha. ČZU a VÚRV v.v.i. 143-147.

Lososová, Z., Cimalová, Š. 2009. Effects of different cultivation types on native and alien weed species richness and diversity in Moravia (Czech Republic). Basic and Applied Ecology. 10. 456-465.

Lososová, Z., Simonová, D. 2008. Changes during the 20th century in species composition of synanthropic vegetation in Moravia (Czech Republic). Preslia. 80 (3). 291-305.

Lososová, Z., Chytrý, M., Cimalová, Š., Kropáč, Z., Otýpková, Z., Pyšek, P., Tichý, L. 2004. Weed vegetation of arable land in Central Europe: Gradients of diversity and species composition. Journal of Vegetation Science. 15. 415-422.

Madaras, M., Lipavský, J. 2009. Interannual dynamics of available potassium in a long-term fertilization experiment. Plant Soil Environment. 55. 334-343.

Madaras, M., Koubová, M., Lipavský, J. 2010. Stabilization of available potassium across soil and climatic conditions of the Czech Republic. Archives of Agronomy and Soil Science. 56. 433-449.

Mahn, E.G. 1984 Structural changes of weed communities and populations. Vegetatio 58. 79-85.

Marshall, E.J.P., Brown, V.K., Boatman, N.D., Lutman, P.J.W., Squire, G.R., Ward, L.K. 2003. The role of weed in supporting biological diversity within crop fields. Weed Research. 43. 77-89.

Mason, H., Navabi, A., Frick, B., O´Donovan, J., Spaner, D. 2007. Cultivar and seeding rate effects on the competitive ability of spring cereals grown under organic production in northern Canada. Agronomy Journal. 99. 1199-1207.

Mayor, J.P., Dessaint, F. 1998. Influence of weed management strategies on soil seedbank diversity. Weed Research. 38. 95-105.

Mikulka, J., Chodová, D. 2000. Změny druhového spektra plevelů v České republice (Changes in weed species spectrum in the Czech Republic). In: Sborník příspěvků z 15. konference o ochraně rostlin. Brno. 287-288.

Mikulka, J., Kneifelová, M. 2005. Plevelné rostliny. Profi Press, s.r.o. Praha. 145 s..

Mikulka, J., Korčáková M., Burešová, V., Andr, J. 2009. Changes in Weed Species Spectrum of Perennial Weeds on Arable Land, Meadows and Pasture. Plant Protection Science. 45. 63-66.

Mladenov, N., Hristov, N., Kondic-Spika, A., Djuric, V., Jevtic, R., Mladenov, V. 2011. Breeding progress in grain yield of winter wheat cultivars grown at different nitrogen levels in semiarid conditions. Breeding Science. 61. 260–268.

Monaco, T.J., Weller, S.C., Ashton, F.M. 2002. Weed Science, principles and practices. John Wiley & Sons, Inc. New York. 671 p.

Moravec, J. 1994. Fytocenologie. Academia Praha. 403 s.

Moss, S.R. 2004. The Broadbalk long-term experiment at Rothamsted: what has it told us about weeds? Weed Science. 52. 864-873.

Murphy, C.E., Lemerle, D. 2006. Continuous cropping systems and weed selection. Euphytica. 148: 61-73.

Nowak, A., Nowak, S., Nobis, M., Nobis, A. 2015. Crop type and altitude are the main drivers of species composition of arable weed vegetation in Tajikistan. Weed Research. 55. 525-536.

Oerke, E.C. 2006. Crop losses to pests. Journal of Agricultural Science. 144. 31-43.

Pallut, B., Moll, E. 2008. Long-term effects of reduced herbicide doses on weed infestation and grain yield of winter cereals in a 12-year long- term trial. Journal of Plant Diseases and Protection. 21. Special Issue. 501-508.

Pielou, E.C. 1966. The measurement of diversity in different types biological collections. Journal of Theoretical Biology 13. 131–144.

Pielou, E.C. 1975. Ekological diversity. Wiley Interscience. New York.

Pinke, G., Karácsony, P., Czúcz, B., Botta-Dukát, Z., Lengyel, A. 2012. The influence of environment, management and site context on species composition of summer arable weed vegetation in Hungary. Applied Vegetation Science 15. 136-144.

Potts, G.R., Ewald, J.A., Aebischer, N.J. 2010. Long-term changes in the flora of the cereal ecosystem on the Sussex Downs, England, focusing on the years 1968-2005. Journal of Applied Ecology. 47. 215-226.

Pyšek, P., Jarošík, V., Kropáč, Z., Chytrý, M., Wild, J., Tichý, L. 2005. Effects of abiotic factors on species richness and cover in Central European weed communities. 2005. Agriculture, Ecosystems and Environment. 109. 1-8.

Rahimizadeh, M., Kashani, A., Zare-Feizabadi, A., Koocheki, A.R., Nassiri-Mahallati, M. 2010. Nitrogen use efficiency of wheat as affected by preceding crop, application rate of nitrogen and crop residues. Australian Journal of Crop Science. 4. 363-368.

Rassam, G., Latifi, N., Soltani, A., Kamkar, B. 2011. Impact of crop management on weed species diversity and community composition of winter wheat fields in Iran. Weed Biology and Management. 11. 83-90.

Richter, D.D.Jr., Hofmockel, M., Gallaham, M.A.Jr., Powlson, D.S., Smith, P. 2007. Long-term experiments: Keys to managing earth´rapidly changing ecosystems. Soil Science Society of American Journal. 71. 266-279.

Rotchés-Ribalta, R., Armengot, L., Mäder, P., Mayer, J., Sans, F.X. 2017. Long-term management affects the community composition of arable soil seedbanks. Weed Science. 65. 73-82.

Salonen, J. 1993. Reducing herbicide use in spring cereal production. Agricultural Science in Finland. 2. 7-40.

Salonen, J., Hyvönen, T., Kaseva, J., Jalli, H. 2012. Impact of changes cropping practices on weed occurrence in spring cereals in Finland – comparison of surveys in 1997–1999 and 2007-2009. Weed Research. 53. 110-120.

Satrapová, J., Hyvönen, T., Venclová, V., Soukup, J. 2013. Growth and reproductive characteristic of C4 weeds under climatic conditions of the Czech Republic. Plant Soil Environment. 59 (7). 309-315.

Satrapová, J., Soukup, J. 2014. Změna klimatu a její vliv na šíření teplomilných plevelů v ČR. Úroda. 8. 31-34.

Seibutis, V., Feiza, V. 2008. The influence of short crop rotations, monocrop and reduced soil tillage on weed population dynamics. Zemdirbyste. 95(3). 123-129.

Fisjunov, A.V. 1984. Sornye Rastenija. Kolos. Moskva. 320 p.

Sprenger, B., Belde, M., Albrecht, H. 2002. Population dynamics of weeds in different tillage systems. Zeitschrift für pflanzenkrankheiten und pflanzenschutz. 18. 277-285.

Stasinskis, E. 2009. Effect of proceeding crop, soil tillage and herbicide application on weed and winter yield. Agronomy Research. 7. 103-112.

Stephen, R.C., Saville, D.J., Drewitt, E.G. 2005. Effects of wheat seed rate and fertiliser nitrogen application practices on populations, grain yield components and grain yields of wheat (*Triticum aestivum*). New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science 33. 125-138.

Stoate, C., Boatman, N.D., Borralho, R.J., Carvalho, C.R., de Snoo, G.R., Eden, P. 2001. Ecological impacts of arable intensification in Europe. Journal of Environmental Management 6. 337-365.

Storkey, J., Westbury, D.B. 2007. Managing arable weeds for biodiversity. Pest Management Science. 63. 517-523.

Storkey, J., Moss, S.R., Cussans, J.W. 2010. Using Assembly Theory to Explain Changes in a Weed Flora in Response to Agricultural Intensification. Weed Science. 58 (1). 39-46.

Streit, B., Rieger, S.B., Stamp, P., Richner, W. 2003. Weed populations in winter wheat as affected by crop sequence, intensity of tillage and time of herbicide application in a cool and humid climate. Weed Research. 43. 20-32.

Šilc, U. 2008. Diversity of weed vegetation on arable land in Slovenia. Journal of Plant Diseases and Protection, Special Issue. 21. 351-356.

Šilc, U., Čarni, A. 2005. Changes in weed vegetation on extensively managed fields of central Slovenia between 1939 and 2002. Biologia. 60 (4). 409-416.

Thomas, A.G., Derksen, D.A., Blackshaw, R.E., Van Acker, R.C., Legere, A., Watson, P.R., Turnbull, G.C. 2004. A multistudy approach to understanding weed population shifts in medium- to long-term tillage systems. Weed Science. 52 (5). 874-880.

Topham, A.G., Lawson, H.M. 1982. Measurement of weed species diversity in crop/weed competition studies. Weed Research. 22. 285-293.

Tyšer, L., Nováková, K., Hamouz, P., Nečasová, M. 2008. Species diversity of weed communities in conventional and organic farming systems in the Czech Republic. Journal of Plant Diseases and Protection, Special Issue. 21. 291-296.

Tyšer, L., Hamouz, P., Nováková, K., Nečasová, M., Holec, J. 2009. Changes in weed communities on selected areas with 30 years´ interval. Scientia agriculturae Bohemica. 40 (1). 18-25.

Ulber, L., Steinmann, H.H., Klimek, S. 2010. Using selective herbicides to manage beneficial and rare weed species in winter wheat. Journal of Plant Diseases and Protection. 117. 233-239.

van Heemst, H.D.J. 1985. The influence of weed competition on crop yield. Agricultural Systems. 18. 81-93.

Weil, R.R. 1982. Maize-weed competition and soil erosion in unweeded maize. Tropical Agriculture. 59. 207-213.

Whittaker, R. H. 1972. Evolution and Measurement of Species Diversity. Taxon. 21. 213-251.

Winkler, J., Zelená, V. 2005. Impact of different soil cultivation on weed species in winter rape (oilseed). Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. 53. 187-194.

Zengin, H. 2001. Changes in weed response to 2,4-D application with 5 repeated applications in spring wheat. Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 25. 31-36.

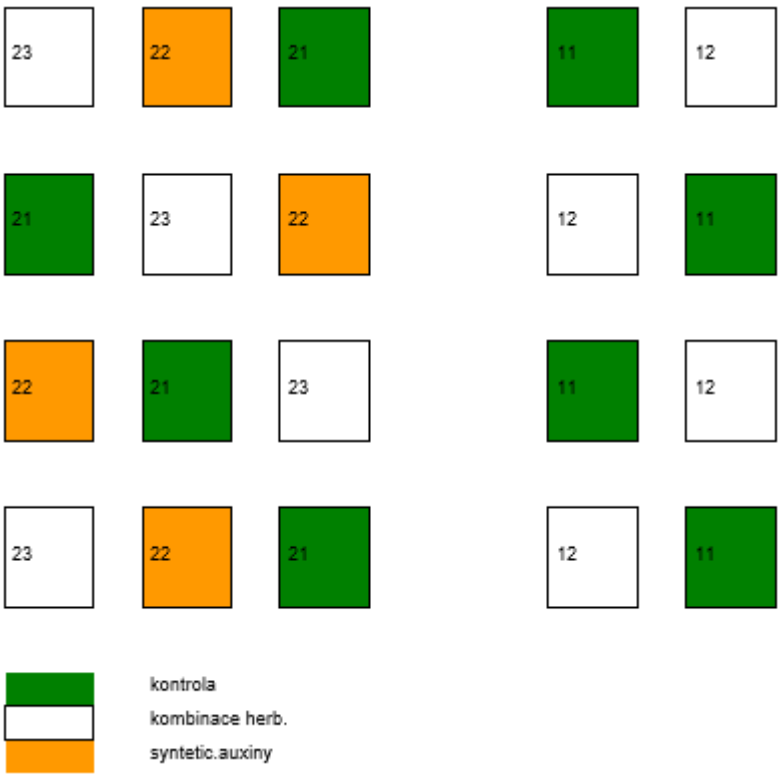
Ziska, L.H., Runion, G.B. 2007. Future weed, pest and disease problems for plants. In: Agrosystems in Changing Climate. Newton, P.C.D., Carran. R.A., Edwards (eds). CRC Press. Boca Raton, FL. 261-287.

Zwerger, P., Malkomes, H.P., Nordmeyer, H., Söchting, H.P., Verschwele, A. (2004) Unkrautbekämpfung: Gegenwart und Zukunft – aus deutscher Sicht. Weed control: presence and future – the German view. Journal of Plant Diseases and Protection. 19. 27-38.

7. Obrazová příloha

Obr. 1 Letecký pohled na dlouhodobé pokusy v Pernolci 13.6.2017 (foto Ing. Michaela Friedlová)

Obr. 2 Letecký pohled na dlouhodobý herbicidní pokus v Pernolci 13.6.2017 (foto Ing. Michaela Friedlová)

Obr. 3 Letecký pohled na dlouhodobý herbicidní pokus v Hněvčevsi 3.6.2014 (foto doc. Ing. Milan Kroulík, Ph.D.)

Obr. 4 Schéma pokusu (21,22,23 – zjednodušený osevní postup; 11, 12 – střídavý osevní postup)