

Česká zemědělská univerzita v Praze



Fakulta životního prostředí

Katedra ekologie a životního prostředí

**Ekologie širokolistých šťovíků *Rumex obtusifolius* a
Rumex crispus se zaměřením na jejich minerální výživu**

Diplomová práce

Kristýna Červená

cervena.kristyna@email.cz

Vedoucí diplomové práce: prof. RNDr. Michal Hejman Ph.D

2012

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra ekologie

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Červená Kristýna

Aplikovaná ekologie

Název práce

Ekologie širokolistých šťovíků *Rumex obtusifolius* a *Rumex crispus* se zaměřením na jejich minerální výživu

Anglický název

Ecology of broad-leaved docks *Rumex obtusifolius* and *Rumex crispus* with respect to their mineral nutrition

Cíle práce

Cílem práce je zjistit, jaké jsou nároky na živiny u obou studovaných druhů a jak půdní podmínky ovlivňují fitness obou druhů.

Metodika

Širokolisté šťovíky (šťovík kadeřavý a š. tupolítý) představují obtížné plevelné druhy nejen trvalých travních porostů, ale jsou součástí specifických společenstev, která se objevují na narušených půdách či v místech s vysokým zdrojem živin. V rámci projektu zaměřeného na ekologii šťovíků se studentka zaměří na problematiku minerální výživy obou druhů. Prostřednictvím nádobových pokusů se studentka pokusí zjistit, jaké jsou rozdíly mezi oběma druhy v nárocích na základní živiny (N, P a K) a jakým způsobem různá dostupnost živin ovlivňuje rychlost růstu různých orgánů šťovíků.

Harmonogram zpracování

2011 - nádobové pokusy a sběr dat

2012 leden - analýzy dat a psaní práce

2012 duben - odevzdání práce

Rozsah textové části

30 - 50 stran

Klíčová slova

Rumex obtusifolius, Rumex crispus, nutrients

Doporučené zdroje informací

- Van Assche J.A., Vanlerberghe K.A. (1989): The role of temperature on the dormancy cycle of seeds of *Rumex obtusifolius* L. *Functional Ecology*, 3: 107-115.
- Cavers, P.B. and Harper J. L. (1964). *Rumex obtusifolius* L. and *R. crispus* L. *The Journal of Ecology* 52(3): 737-766.
- Cavers, P.B. and J.L. Harper. 1967. The komparative biology of closely related species living in the same area: IX. *Rumex*: The nature of adaptation to a sea-shore habitat. *The Journal of Ecology* 55(1): 73-82.
- Klimeš L. (1996): Population ecology of *Rumex obtusifolius*. In: Prach K., Jeník J. & Large A.R.G., eds., *Floodplain ecology and management: The Lužnice River in the Třeboň Biosphere Reserve, Central Europe*. SPB Academic Publishing, Amsterdam, pp. 155-180
- Zaller J.G. (2004a): Ecology and non-chemical control of *Rumex crispus* and *Rumex obtusifolius* (Polygonaceae): a review. *Weed Research*, 44: 414-432.
-

Vedoucí práce

Hejzman Michal, prof. RNDr., Ph.D. et Ph.D.

4

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Vedoucí katedry



V Praze dne 23.4.2012

1-8 4

prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.

Děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením prof. RNDr. Michala Hejcmana Ph.D. Uvedla jsem všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpala.

V Praze dne 23. 4. 2012

Podpis:

Poděkování

Na prvním místě bych chtěla poděkovat svým rodičům a ostatním členům rodiny, kteří mě vždy podporovali v touze po poznávání nových věcí a poskytli mi skvělé podmínky pro studium.

Dále chci poděkovat svému vedoucímu diplomové práce prof. RNDr. Michalovi Hejmanovi, PhD. za odborné vedení, konzultace a poskytnutí literárních zdrojů. Děkuji i Stanislavě Vondráčkové, Janě Hrdličkové a ostatním členům našeho výzkumného týmu za cenné diskuze.

Práce byla finančně podpořena Ministerstvem zemědělství ČR grantem NAZV QJ 1210211 a grantem CIGA 20102019.

Abstrakt

Rumex obtusifolius L. (šťovík tupolistý) a *Rumex crispus* L. (šťovík kadeřavý) jsou obtížnými plevelely po celém světě. Cílem této práce bylo zjistit vliv dostupnosti N, P a K na růstové charakteristiky a přezimování obou druhů. Další výzkum byl zaměřen na otázku, zda ovlivňuje půdní pH a vyšší dostupnost Ca a P v půdách vysoce kontaminovaných rizikovými prvky (Zn, Cd, As) vzcházení a růst druhu *R. obtusifolius*.

Mladé rostlinky obou druhů byly negativně ovlivněny vysokou dostupností dusíku a pozitivně ovlivněny dostupností P. Ve fázi růstu lodyh, kvetení a tvoření semen se *R. obtusifolius* nejrychleji vyvíjel ve variantách hnojených N a kombinací N a P. Důležitý poznatek z tohoto pokusu je ten, že oba studované druhy rodu *Rumex* nejsou nitrofilní v časných fázích růstu a stávají se nitrofilními až po vytvoření plně vyvinuté listové růžice. *Rumex obtusifolius* během prvního roku kvetl a tvořil semena, zatímco *R. crispus* vytvořil pouze listovou růžici s růstovými vrcholy a v této fázi také přezímoval. *Rumex obtusifolius* měl velké procento úmrtnosti během první zimy na rozdíl od *R. crispus*, který přezímoval ve fázi listové růžice s nulovou úmrtností.

Vzcházivost rostlin *R. obtusifolius* byla nejrychlejší a nejvyšší v půdě s nižším obsahem Ca a zároveň více kontaminované, avšak na více kontaminované půdě byla pozorována vyšší úmrtnost než v půdě s vyšším obsahem Ca a zároveň méně kontaminované. Mírně pozitivní vliv na přežívání semenáčků měla aplikace Ca na půdě s vyšší dostupností rizikových prvků a mírně kyselou půdní reakcí. Rostliny na této půdě měly viditelné příznaky nadbytku Zn. Negativní vliv aplikace Ca byl pozorován v půdě s nižší dostupností rizikových prvků a neutrální půdní reakcí. Dále byl zaznamenán mírně pozitivní vliv P na vzcházení rostlin na obou půdách. Výsledky poukazují na kalcifobní chování *R. obtusifolius* a toxicitu rizikových prvků, zejména Zn.

Klíčová slova: šťovík tupolistý a šťovík kadeřavý, dusík, fosfor a vápník, přezimování, rizikové prvky

Abstract

Rumex obtusifolius (broad-leaved dock) and *Rumex crispus* (curled dock) are difficult weeds all around the world. The aim of this study was to determine the effect of N, P and K availability on plant performance and over-wintering of these two species. The next aim was answer the question, how emergence and survival of *R. obtusifolius* is affected by soil pH and by availability of Ca and P in soils contaminated by risk elements (Zn, Cd, As).

Seedlings of both species were negatively affected by high availability of nitrogen. During stem growth, flowering and seeds ripening, plants were positively affected by N fertilizer application and by combination of application of N and P. The important finding of this study is that both species are not nitrophilous in early developmental stages and tend to be nitrophilous from fully developed rosette phase. *Rumex obtusifolius* during first year was flowering, while *R. crispus* created only rosette with growing points in the first year of growth. There was recorded high winter mortality of *R. obtusifolius* highly contrasting with no mortality of *R. crispus* surviving winter in rosette phase.

The emergence and survival was higher and quicker in the soil higher contaminated and with lower availability of Ca, but there was higher mortality of this seedlings than in the soil less contaminated with higher availability of Ca. Slightly positive effect of Ca application on seedlings survival was recorded in more contaminated soil in slightly acidic soil reaction. These seedlings had visible signs of the high availability of Zn. The negative effect of Ca application was recorded by seedlings in the soil with lower availability of risk elements and in neutral soil reaction. The seedlings emergence was slightly positive affected by P in both soils. Results of this study show *R. obtusifolius* as a calcifobic species with and toxicity of risk elements, especially Zn.

Keywords: broad-leaved dock and curled dock, nitrogen, phosphorus and calcium, over-wintering, risk elements

Obsah

1.	ÚVOD	9
2.	LITERÁRNÍ REŠERŠE	10
2.1	MORFOLOGIE	10
2.1.1	<i>Morfologie – Rumex obtusifolius</i>	10
2.1.2	<i>Morfologie – Rumex crispus</i>	13
2.2	ROZŠÍŘENÍ.....	14
2.3	FENOLOGIE.....	15
2.4	ROZMNOŽOVÁNÍ	16
2.5	PRODUKCE A ŠÍŘENÍ SEMEN	17
2.6	KLÍČENÍ SEMEN A DORMANCE	18
2.7	VLIV PH A DOSTUPNOSTI ŽIVIN NA ŠŤOVÍKY	19
2.8	ALELOPATIE	20
2.9	VLIV SUCHA A MRÁZU	20
2.10	NECHEMICKÉ ZPŮSOBY ODSTRAŇOVÁNÍ ŠŤOVÍKŮ	21
2.11	MINERÁLNÍ VÝŽIVA ROSTLIN.....	22
2.12	PROJEVY DOSTATKU A NEDOSTATKU ŽIVIN NA ROSTLINY.....	24
2.13	CHARAKTERISTIKA MINERÁLNÍCH LÁTEK N, P, K, CA.....	24
2.13.1	<i>Dusík (N)</i>	25
2.13.2	<i>Fosfor (P)</i>	27
2.13.3	<i>Draslík (K)</i>	28
2.13.4	<i>Vápník (Ca)</i>	29
2.14	RIZIKOVÉ PRVKY V PŮDĚ	30
2.14.1	<i>Zinek (Zn)</i>	31
2.14.2	<i>Kadmium (Cd)</i>	32
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	32
3.1	EFFECT OF QUICK LIME AND SUPERPHOSPHATE ADDITIVES ON EMERGENCE AND SURVIVAL OF <i>RUMEX OBTUSIFOLIUS</i> SEEDLINGS IN ACID AND ALKALINE SOILS CONTAMINATED BY TRACE ELEMENTS	33
3.2	EFFECT OF NITROGEN, PHOSPHORUS AND POTASSIUM AVAILABILITY ON MOTHER PLANT SIZE, SEED PRODUCTION AND GERMINATION ABILITY OF <i>RUMEX CRISPUS</i>	52
3.3	EFFECT OF NITROGEN AND PHOSPHORUS AVAILABILITY ON THE EMERGENCE, GROWTH AND OVERWINTERING OF <i>RUMEX CRISPUS</i> AND <i>RUMEX OBTUSIFOLIUS</i>	62
4.	ZÁVĚR	72
5.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	73

1. Úvod

Plevelné rostliny se na zemi objevily již v dávné minulosti v souvislosti s počátky zemědělské činnosti člověka (Mikulka et al. 2005). Cílem ochrany proti plevelům je jejich regulace s cílem postupného snížení celkové zaplevelenosti při zachování široké diverzity plevelných rostlin (Kneifelová et Mikulka 2003). Plevely způsobují každoročně obrovské ztráty na produkci a na jejich regulaci je vynakládáno mnoho finančních prostředků (Mikulka et al. 2005).

Tato práce se bude podrobněji zabývat jedněmi z nejrozšířenějších druhů plevelů - šťovíkem tupolistým (*Rumex obtusifolius* L.) a šťovíkem kadeřavým (*Rumex crispus* L.). Oba druhy jsou zařazovány do čeledi Rdesnovité (*Polygonaceae*), rodu *Rumex* obsahující přibližně 100 druhů, přičemž u nás je domácích asi 15 a několik zavlečených (Novák 1972). *Rumex obtusifolius* a *R. crispus* patří k hojným druhům, které se v České republice rozšířily hlavně v poválečných letech díky intenzivnímu hospodaření (Kohout 1997).

Pro zemědělství, a pro ekologické zemědělství obzvláště, představuje *R. obtusifolius* a *R. crispus* velké nebezpečí, neboť při jejich nadměrném spásání se pro dobytek stávají toxickými (Hejduk et Doležal 2004). Bylo vyzkoušeno již mnoho biologických a mechanických způsobů, které by omezily jejich nekontrolovatelné šíření, např. využití některých hmyzích druhů a parazitických rzí, vypichování a jiné (Hatcher et al. 1995, Martínková et Honěk 2004, Strnad et al. 2010). Zatím se však žádná z těchto metod neprokázala jako dostatečně účinná nebo byla velice namáhavá.

Úspěšnými plevely jsou širokolisté šťovíky především díky těmto vlastnostem:

- 1) schopnost kvést a plodit jednou až dvakrát v roce (Cavers et Harper 1964, Mikulka et al. 1995, Kohout 1997),
- 2) vytváření tisíce semen, které si dokáží po mnoho desítek let ponechat svou klíčivost a klíčit téměř během celého roku (Cavers et Harper 1964, Tsuyuzaki 2010),
- 3) využití mnoha způsobů rozšiřování semen na velké vzdálenosti
- 4) vysoce klíčivá semena schopná rychle vytvořit semenáčky (Cavers et Harper 1964),
- 5) schopnost obrůst z kořene (Pino et al. 1995),
- 6) schopnost vylučovat toxické látky kořeny - alelopatie (Novák 1992, Zaller 2006b).

V představách o životní strategii *R. obtusifolius* a *R. crispus* se literatura v některých směrech rozchází. I když je o obou druzích známo, že se jedná o nitrofilní druhy (Hejduk et Doležal 2004 ex Weissbach 1998), tak je zde i názor (Zaller 2004a), podle kterého jsou tyto druhy nitrofilní pouze v některých vývojových fázích. Další dosud nevyjasněnou otázkou zůstává schopnost těchto plevelů přežívání zimy (over-wintering), dodnes nebyly prováděny výzkumy zabývající se přímo adaptací obou druhů na půdní pH. Zároveň se u obou druhů dle dostupných informací nikdo nezabýval odolností rostlin vůči nadměrnému množství rizikových prvků v půdě.

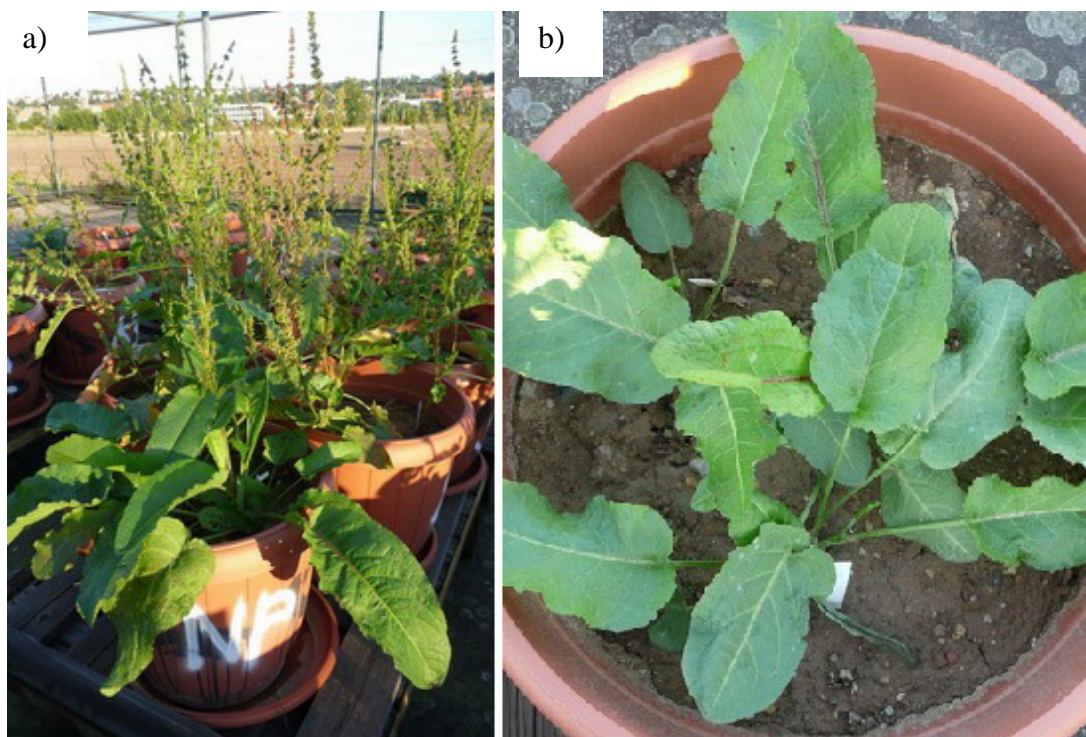
V této práci jsou v rámci rešerše shrnuty poznatky z dostupné literatury o nejvýznamnějších širokolistých šťovíkách *R. obtusifolius* a *R. crispus*. V další části rešerše jsou pak uvedeny základní informace z oblasti minerální výživy a některých vybraných živinách a prvcích týkající se prováděných pokusů. Experimentální část práce se zabývá vzcháživostí a přežívání semenáčků druhu *R. obtusifolius* na kontaminovaných půdách s různou půdní reakcí a dostupností Ca a P. Další část experimentální práce řeší problematiku minerální výživy (N, P, K) a její vliv na velikost matečných rostlin, produkci semen a klíčení u *R. crispus* a také působení těchto látek na vzcházení, morfologických charakteristik a přezimováním obou druhů.

2. Literární rešerše

2.1 Morfologie

2.1.1 Morfologie – *Rumex obtusifolius*

Tento druh má mohutný kulový, jednoduchý kořen sahající až do hloubky 25 cm, z něj vyrůstají tenčí kořínky zasahující do větší hloubky (Kneifelová et Mikulka 2003). Lodyha je vysoká 50 – 150 cm, často zbarvená červeně, většinou od poloviny větvená, větve odstávají šikmo vzhůru.



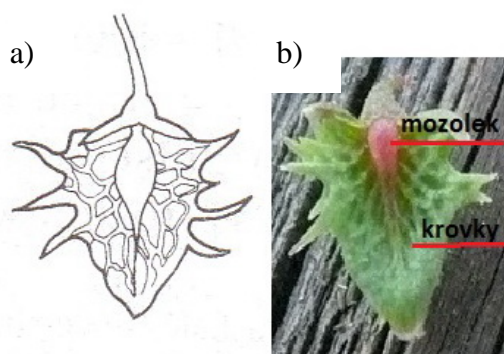
obr. č. 1: a) Dospělá rostlina *Rumex obtusifolius*, b) Přizemní růžice *R. obtusifolius*. Vlastní fotodokumentace.

Bazální listy vytváří přizemní růžici (obr. č. 1b). Přizemní a dolní lodyžní listy rostliny jsou dlouze řapíkaté, čepele listů jsou dlouhé 15 – 30 cm a široké 8 – 15 cm (Hejný et Slavík 1990). Listy bývají vejčité až široce eliptické, tupé, asi 2x delší než široké (Kubát et al. 2002), většinou nezvlněné. Na bázi jsou listy mělce srdčité, na vrcholu tupě špičaté a na rubu obvykle roztroušeně chlupaté. Lodyžní listy bývají naopak menší, krátce řapíkaté, na bázi zaokrouhlené až široce klínovité, přecházejí ve stále se zmenšující řapíkaté listeny (Hejný et Slavík 1990).

Květenství je větvené, tvořené velkým množstvím drobných kvítků uspořádaných do mnoha svazků. Květy jsou zelené, někdy zeleno-červené. Okvětní lístky bývají v počtu 3 + 3 ve dvou řadách, často trojúhelníkovité nebo vejčité (Cavers et Harper 1964).

Plodem jsou hnědé nažky 2,5 - 3,0 mm dlouhé, které jsou kryty 3 blanitými útvary – krovkami. Krovky (obr. č. 2a, b) jsou velmi různého tvaru, převážně úzce a široce trojúhelníkovité, při bázi dlouze zubaté, třásnitě zubaté až téměř celokrajné. Zubů se může vyskytovat tři až pět na jedné krovce. Mozolek bývá různě velký, na jedné nebo všech krovkách (Hejný et Slavík 1990). Plodní stopky jsou 2 - 2,5x

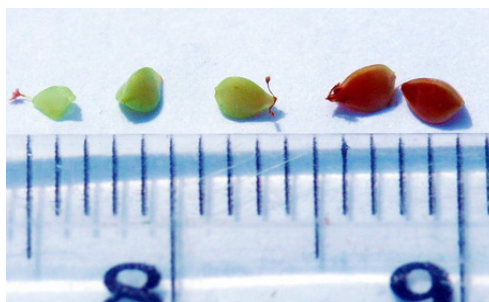
delší než krovky, které jsou 2,5 - 6,0 mm dlouhé a 1,5 - 4,0 mm široké (Hejný et Slavík 1990).



obr. č. 2: a) Krovka *Rumex obtusifolius*. Z knihy Klíč ke květeně České republiky (2002), b): Krovka *R. obtusifolius* ve střední fázi zralosti. Vlastní fotodokumentace.

Na obr. č. 3 lze vidět postupné zrání semen *R. obtusifolius*, barva se mění od světle zelenavé až do hnědě rezavé ve své zralosti. Vývoj jedné rostliny prochází několika výraznými fázemi - první fází zahrnuje klíčení a růst semenáčku, druhou fází je vytváření a růst listové růžice, třetí fáze pak zahrnuje růst hlavní lodyhy a tvoření vedlejších lodyh, utvoření květenství a semen (Křišťálová et al. 2011).

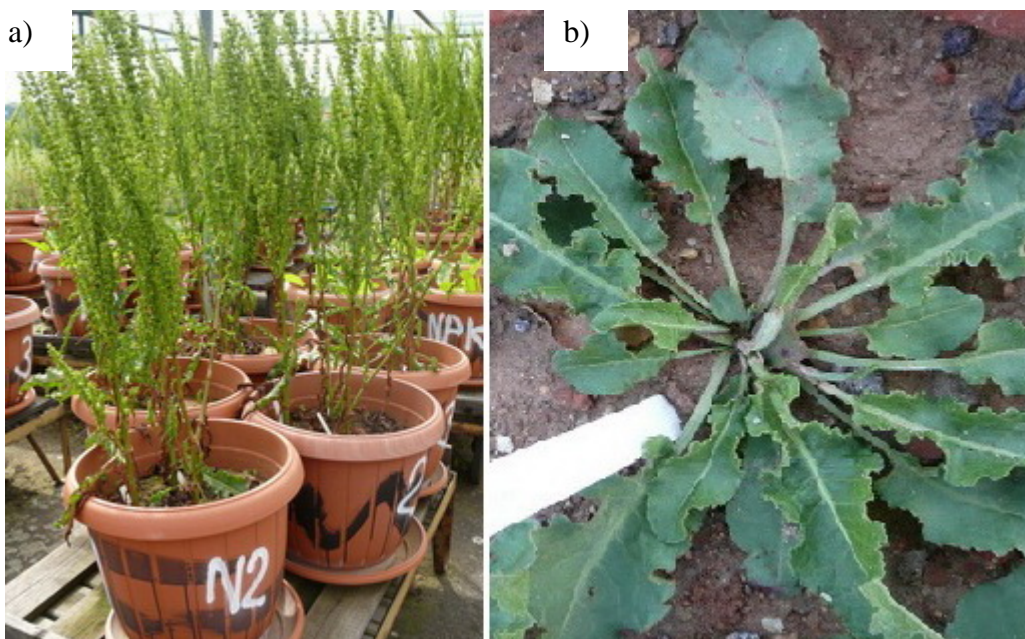
Pro svou extrémní variabilitu v morfologii můžeme podle Hejného et Slavíka (1990) rozlišovat čtyři poddruhy – subspecie (ssp. *obtusifolius*, ssp. *transiens*, ssp. *subalpinus* a ssp. *microcarpus*). Tato práce pojednává pouze o poddruhu *Rumex obtusifolius* ssp. *obtusifolius*, který je nejčastějším plevelem travních porostů a nejhornější ze všech uvedených poddruhů.



obr. č. 3: Postupné zrání semen *Rumex obtusifolius*, měřítko 1 mm. Vlastní fotodokumentace.

2.1.2 Morfologie – *Rumex crispus*

Tento plevel je lidově nazývaný vosládí, sladký list, masný kořen či sladké lupení (Hron et Zejbrlík 1974). Bylina má krátkou, chudě větvenou kořenovou hlavu, hlavní kořen a četné dlouhé rozvětvené postranní kořeny. Lodyha je vysoká 30–100 cm, přímá, často zbarvená hnědě, obvykle větvená jen v květenství.



Obr. č. 4: a) Dospělá rostlina *Rumex crispus*, b) Přízemní růžice *Rumex crispus*. Vlastní fotodokumentace.

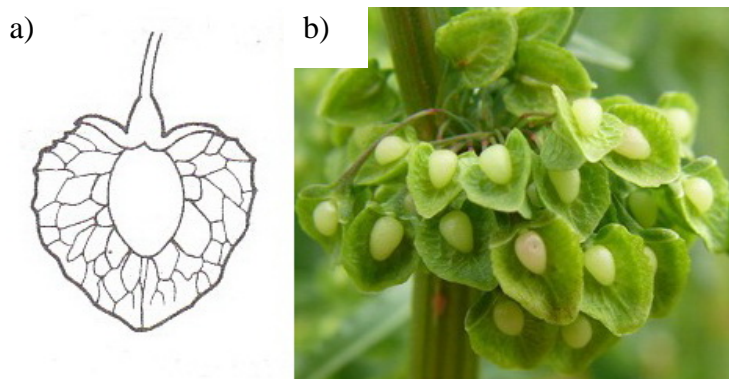
Přízemní listy (obr. č. 4b) rostliny vytvářejí velkou listovou růžici. Po obvodu bývají listy silně kadeřavé (Hron et Zejbrlík 1974), jsou dlouze řapíkaté (Hejný et Slavík 1990), alespoň 3x delší než široké (Kubát et al. 2002), až 35 cm dlouhé a široké až 8 cm, podlouhle kopinaté, na bázi klínovité až stažené (Hejný et Slavík 1990). Lodyžní listy bývají podobného tvaru, avšak menší, obvykle méně kadeřavé, v dolní části květenství přecházející v listeny (Hejný et Slavík 1990).

Květenství je tvořeno drobnými oboupohlavními nebo jednopohlavními pravidelnými kvítky v lichopřeslenech, okvětí je tvořeno ze šesti lístků uspořádaných ve dvou kruzích (Hron et Zejbrlík 1974), má přitisknuté nebo šikmo odstávající větve, jen v dolní části s listeny (Hejný et Slavík 1990).

Plodem jsou trojboké nažky s ostrými klenutými hranami, v době zralosti červenohnědé až hnědavé, povrch mají hladký a lesklý (Cavers et Harper 1964,

Hron et Zejbrlík 1974). Nažky jsou 2 - 3 mm dlouhé (Hejný et Slavík 1990), kryty třemi blanitými útvary – krovkami.

Krovky (obr č. 5a, b), bývají obvykle trojúhelníkovité, dlouhé 3,5 - 6,5 mm a široké 3-6 mm, celokrajné nebo jen s velmi drobnými zoubky, přitupé až špičaté, na bázi někdy mírně srdčité. Mozolek je na 1 nebo na všech krovkách, vřetenovitý až téměř kulovitý, delší než polovina krovky (Hejný et Slavík 1990). Křídlaté krovky s mozolky umožňují nažkám především roznášení větrem - anemochorně (Hron et Zejbrlík 1974).



obr. č. 5: a) Krovka *Rumex crispus*. Z knihy Klíč ke květeně České republiky (2002), b) Přeslen s krovkami *R. crispus*. Vlastní fotodokumentace.

Vývoj jedné rostliny *R. crispus* prochází stejně jako *R. obtusifolius* několika výraznými fázemi - první fází zahrnuje klíčení a růst semenáčku, druhou fází je vytváření a růst listové růžice, třetí fáze pak zahrnuje růst hlavní lodyhy a tvoření vedlejších lodyh, utvoření květenství a semen (Křišťálová et al. 2011).

Rumex crispus je variabilní druh především ve velikosti a tvaru krovek, hustoty a utváření květenství, dále i tvarem a povrchem listů. Všechny druhy jsou interfertilní a vytváří navzájem množství přechodů. Hejný et Slavík (1990) uvádí, že v současné době není pravděpodobně možné vytvořit přirozený systém infraspecifických taxonů.

2.2 Rozšíření

Rumex obtusifolius i *R. crispus* jsou rozšířeny převážně v mírném pásmu. *Rumex obtusifolius* pochází z Evropy, Malé Asie a Kavkazu. Byl zavlečen,

a místy zdomácněl, v Severní a Jižní Americe, jižní Africe, Austrálii a východní Asii (Hejný et Slavík 1990, Jursík et al. 2008). Vyskytuje se již od výšky hladiny moře, nejvýše byl zaznamenán v Íránu ve výšce 2800 m n. m., dále byl také pozorován v severní Skandinávii i za polárním kruhem (Cavers et Harper 1964). Hejný et Slavík (1990) uvádí, že původní areál *R. crispus* již dnes není možné stanovit. Na Blízkém východě a v jihozápadní části USA ho lze nalézt ve výšce 2500 m n. m., nebo v Argentině dokonce ve výšce 3500 m n. m. (Zaller 2004a).

V České republice zasahuje *R. obtusifolius* od nížin až do horských oblastí, nad 1 100 m n. m. však jen vzácně (Jursík et al. 2008). Nejvýše byl nalezen na Pradědu ve výšce 1450 m n. m. (Hejný et Slavík 1990). Oba druhy obsazují často zemědělsky obdělávané půdy, louky, pastviny, narušené travní porosty (Jeangros et Nösberger 1990, Zaller 2006, Van Evert et al. 2009) a ruderalní stanoviště (Sýkora 1959, Honěk et Martínková 2001).

Někdy můžeme *R. obtusifolius* a *R. crispus* spatřit na rumišťích, mýtinách a lesních světlinách (Aichele et Golte-Bechtle 2007), podél potoků, řek a cest (Klimeš 1989, Kneifelová et Mikulka 2003). *Rumex obtusifolius* se vyskytuje na plochách s nadměrným obsahem živin, ty mohou vznikat např. defekací zvířat, které se na plochách pasou (Zaller 2007). Často však kolonizuje holá místa, což právě nadměrné spásání podporuje (Mikulka et al. 1995). Vyskytuje se na stanovištích s vyšším obsahem dusíku (Honěk et Martínková 2001, Pavlů 2008) a draslíku (Mikulka et Kneifelová 2004). Oba druhy řadí Sýkora (1959) ke skupině nitrofytů, ruderalní vegetaci silně dusíkatých půd. Zaller (2004a) uvedl názor, že by tento údajně nitrofilní druh nemusel být nitrofilní ve všech růstových fázích. Tuto domněnku potvrzuje Křišťálová et al. (2011), která pozorovala u *R. obtusifolius* i *R. crispus* negativní vliv vysoké dostupnosti dusíku na vzházení rostlin.

Mikulka et al. (2005) označuje jako příčinu rozsáhlého výskytu těchto druhů nedostatečnou péči o louky a pastviny, nesečení porostů a při nedostatečném obdělávání škodí i na orné půdě.

2.3 Fenologie

Rumex obtusifolius i *Rumex crispus* obvykle kvetou v letních měsících červnu až srpnu, kdy vytváří velké množství drobných nazelenalých květů, které bývají proteandricky hermafroditické (Cavers et Harper 1964, Klimeš 1996).

Rumex obtusifolius a *R. crispus* jsou označovány jako vytrvalé rostliny s tendencí odumřít po produkci semen (Cavers et Harper 1964). Dodnes však zůstává nevyjasněnou otázkou, kdy a za jakých podmínek tyto druhy kvetou poprvé, zda v prvním druhém, nebo následujícím roce. Podle Zallera (2004a) mohou oba druhy kvést a plodit občas v prvním roce, ale zpravidla k tomu dochází až ve druhém roce, kdy rostliny kvetou od brzkého jara až do mrazů koncem podzimu. Dále ale zároveň zmiňuje, že *R. crispus* je více krátkověký druh než *R. obtusifolius*. Pavlů (2008) od sebe oba druhy odlišuje a tvrdí, že *R. obtusifolius* obvykle kvete ve druhém roce. Akeyord et Briggs (1983) pozorovali u *R. crispus* a Hongo (1989b) u *R. crispus* a *R. obtusifolius* kvetení až ve druhém roce od vzrůstu semenáčků. Weaver et Cavers (1980) pozorovali u *R. crispus* silný vliv investice do přízemní růžice na podzim s pravděpodobností následného kvetení v další sezóně. To potvrzuje ve svém pokusu i Křišťálová et al. (2011), kde bylo pozorováno kvetení v prvním roce nádobového pokusu u *R. obtusifolius*, zatímco *R. crispus* vytvořil pouze přízemní růžici a kvetl až následující sezónu.

Cavers et Harper (1964) uvádějí, že za normálních podmínek rostliny kvetou každý rok, dostatečně velké rostliny obou druhů můžou dokonce kvést a plodit dvakrát v jednom vegetačním období.

I přes to, že květy neobsahují nektar a jsou především větrosnubné, byly na květech spatřeny některé živočišné druhy jako např. *Bombus lucorum*. Většina jedinců širokolistých šťovíků *R. obtusifolius* a *R. crispus* bývá samosprašná (Cavers et Harper 1964).

2.4 Rozmnožování

Rozmnožování *Rumex obtusifolius* a *Rumex crispus* probíhá především generativně – semeny (Kneifelová et Mikulka 2003). Dalšími způsoby rozmnožování je rozmnožování vegetativní (Hron et Zejbrlík 1974, Kneifelová et Mikulka 2003), odnožováním a fragmentací kořene (Mikulka et al. 1995, Pino et al. 1995). Vegetativní způsob je podle některých autorů (Hron et Zejbrlík 1974, Kneifelová et Mikulka 2003) možný částmi křivého kořene, které mohou setrávat v půdě živé delší dobu. Kneifelová et Mikulka (2003) uvádějí, že *R. obtusifolius* využívá vegetativní rozmnožování jen velmi málo. Cavers et Harper (1964) zmiňují schopnost *R. obtusifolius* a *R. crispus* regenerovat ze kterékoliv části kořene. Naproti

tomu Pino et al. (1995) přišel na to že, *R. obtusifolius* je schopný regenerovat pouze z části kořene zvaného jako (volně přeloženo) kořenový límec (root collar) asi do hloubky 15 cm pod zemí, avšak tato hloubka je ovlivňována především vlhkostí půdy. Strnad et al. (2010) zjistil, že metoda ručního vypichování šťovíků 5 cm pod zemí nemá vliv na výskyt obou druhů.

2.5 Produkce a šíření semen

Počet vyprodukovaných semen závisí na velikosti rostliny (Zaller 2004a). Na přibližném počtu těchto semen se ale různí autoři rozcházejí. Cavers et Harper (1964) zmiňují u jedné rostliny druhu *R. obtusifolius* 100 - 60 000 semen, zatímco podle Mikulky (1995) jedna rostlina vytváří 4 000 - 7 000 semen.

Počet vyprodukovaných semen na jedné rostlině *Rumex crispus* může být 100 - 40 000 semen (Cavers et Harper 1964). Mikulka (1995) je ve svém odhadu skromnější, když uvádí 1 000 - 3 000, výjimečně 5 000 semen.

Vliv dostupnosti živin mateřských rostlin na produkci semen zkoumala Hrdličková et al. (2011). Rostliny byly po dvě vegetační sezóny hnojeny různými dávkami základních živin dusíku, fosforu a draslíku. Mateřské rostliny *R. obtusifolius* vyprodukovaly méně než 200 semen ve variantě s K a v nehnojené variantě, nejvíce 9 000 semen bylo zaregistrováno ve variantě NPK. Naopak nulová produkce semen byla pozorována ve variantě P. Mateřské rostliny *R. crispus* vyprodukovaly nejméně 2 000 semen v nehnojené variantě a nejvíce 25 000 semen ve variantě NPK.

Semena širokolistých šťovíků nejčastěji jednoduše spadnou v blízkosti své matečné rostliny, kde také vyklíčí. Na velké vzdálenosti se semena rozšiřují následujícími způsoby: 1) anemochorně - za pomoci větru. V zimním období jsou pak semena vyčnívající nad sněhovou pokrývkou větrem odnášena (Cavers et Harper 1964, Mikulka et al. 1995) 2) hydrochorně - využitím vodního toku-(Kohout 1997). Lze se setkat i s šířením semen 3) zochorně hospodářskými zvířaty a vysokou zvěří. V tomto směru se literatura poněkud rozchází. Cavers et Harper (1964) tvrdí, že vysoká zvěř a především daňkové přímo preferují širokolisté šťovíky. Naopak jsou podle autorů odmítány dobyt看, ovce a koňmi. Semena prochází trávicím traktem a šíří se pak pomocí trusu. S tím souhlasí i Kneifelová et Mikulka (2003), když se zmiňují o tom, že se semena mohou rozšiřovat nevyzrálým chlévským

hnojem a kejdou. Naproti tomu Kohout (1997) uvádí, že širokolisté šťovíky nejsou hospodářskými zvířaty ani zvěří spásány. Někdy nažky ulpívají na srsti živočichů (endozoochorie) či na oblečení lidí a tak jsou šířeny na mnohdy dlouhé vzdálenosti (Zaller 2004a). V neposlední řadě se mohou semena do okolí šířit 4) antropochorně – vlivem člověka, semena se roznáší zejména kompostem a nářadím (Kneifelová et Mikulka 2003).

2.6 Klíčení semen a dormance

Semena *Rumex obtusifolius* a *R. crispus* hrají klíčovou roli v životní strategii těchto druhů. Rostliny vytvářejí obrovské množství semen, které si po mnoho desítek let uchovávají uložené v půdní bance svou klíčivost (Cavers et Harper 1964, Bentley et al. 1980, Tsuyuzaki 2010). *Rumex crispus* v dlouholetém pokusu vykázal dokonce 2 % klíčivých semen po osmdesáti letech (Darlington et Steinbauer 1961). Mikulka et al. (1995) uvádí životaschopnost semen ve vodě po dobu několika měsíců. Semena mohou dozrávat dokonce i na suchých lodyhách (Maun 1974, Weaver et Cavers 1980).

Výzkumy se dodnes zabývají různými faktory majícími vliv na klíčivost semen *R. obtusifolius* a *R. crispus*. Jedním z takových faktorů může být hloubka uložení semene v půdě. Bylo zjištěno, že semena těchto druhů dokáží klíčit na loukách a pastvinách z povrchu půdy, avšak optimální hloubka je údajně 0,5 cm a maximální hloubka 5 cm (Mikulka et al. 1995). Dalším faktorem klíčení je teplota. Mnoho pokusů bylo zaměřeno na určení optimální teploty pro klíčení semen. Optimální teplota pro klíčení *Rumex* byla stanovena na 20 °C – 35 °C (Van Assche et al. 2002). Totterdell et Roberts (1979) stanovili optimální teplotní rozmezí 10 °C – 35 °C pro *R. obtusifolius*. V souvislosti se světlem klíčila lépe semena vystavená 10 minut každý den světlu než semena, která byla na světlu po celou dobu (Totterdell et Roberts 1979). Z toho vyplývá, že faktorem hrajícím roli při klíčení semen může být také fotoperiodicita.

Dormance semen obecně znamená nemožnost klíčení životaschopných semen za vhodných podmínek (Procházka et al. 2003). Literatura se v souvislosti s dormancí u semen *R. obtusifolius* a *R. crispus* rozchází. Někteří autoři uvádí vysokou klíčivost čerstvých semen (Van Assche et al. 2002, Pavlů et al. 2008), ale naproti tomu jsou zde i názory, že se dormance u semen šťovíků vyskytuje

(Martínková et Honěk 2002, Zaller 2004a). Dle pozorování dormantního cyklu byl prokázán nejmenší vliv dormance v zimě a na jaře, nejvyšší pak v létě (Van Assche et al. 2002, Zaller 2007a).

2.7 Vliv pH a dostupnosti živin na šťovíky

Půdní reakce (pH) ovlivňuje dodávku živin a má příznivý vliv na životaschopnost rostlin. Různé druhy rostlin mají různé rozmezí tolerance a různé fyziologické nároky na půdní reakci. Většina rostlin je tzv. amfitolerantní, to znamená, že jejich tolerance k půdnímu pH je široká (3,5 – 8,5), tedy od slabé kyselosti až po slabou zásaditost (Larcher 1988).

Dodnes není zcela jasné rozmezí půdní tolerance u druhů *R. obtusifolius* a *R. crispus*. Neprozkoumaná je například otázka, proč *R. obtusifolius* preferuje spíše slabě kyselé půdy chudé na vápník a hořčík. Podle Brenchley (1920) rostou rostliny *R. obtusifolius* jen zřídka na křídových půdách, z čehož vyvozuje špatnou snášenlivost půd bohatých na Ca a Mg. Humphreys et al. (1999) ve svém experimentu prokázal pozitivní vztah mezi dostupností draslíku v půdě a hustotou rostlin *R. obtusifolius* v porostu a zároveň naznačil negativní vliv půdního pH na hustotu rostlin v porostu. S tím korelují také výsledky pokusu z Rakouska, kde Hann et al. (2012) zaznamenal podstatně vyšší úmrtnost rostlin *R. obtusifolius* v porostu bohatém na Ca a Mg a zároveň nižší úmrtnost zaznamenal na půdách s vysokou dostupností draslíku. Bohner (2001) popisuje *R. obtusifolius* jako “kalcifobní” druh, který nadbytečné množství Ca přetváří na krystaly vápničkového oxalátu. Kalcifobní chování tohoto druhu může být spojeno s vysokými nároky na dostupnost K v půdě. Naproti tomu podle Jeangeros et Nösberger (1990) a Van Eekeren et al. (2006) nemá K mimořádný vliv na produkci biomasy těchto druhů.

Vlivem dostupnosti základních živin (dusík, fosfor a draslík) na vzcházení semen a morfologii rostlin *R. obtusifolius* a *R. crispus* se zabývala Křišťálová et al. (2011) v Praze. Vzcházení a růst sazeniček byl pozitivně ovlivněn dostupností P, avšak příliš vysoká dostupnost N působila jako inhibitor klíčení. *R. crispus* přezimoval ve fázi přizemní růžice a *R. obtusifolius* vytvořil květenství a plodil. Rostliny *R. obtusifolius* ve fázi vytváření hlavní lodyhy rostly nejlépe v kombinaci NPK. Proto Křišťálová et al. (2011) vyslovila domněnku, že oba druhy nejsou

nitrofilní v počátečních fázích růstu a stávají se nitrofilními až od doby plně rozvinuté přízemní růžice.

Hypotézu, že *R. obtusifolius* a *R. crispus* neupřednostňují dusík ve všech vegetačních fázích, uvádí shodně i Zaller (2004a). Naproti tomu Milberg (1997) popisuje pozitivní vliv N na klíčení obou druhů. Výrazné zlepšení růstu za přítomnosti kombinace N, P, K bylo zaznamenáno i u jiných druhů rostlin (Kiehl et al. 1997, Kolodziej 2007). Podle výsledků měření reagoval *R. obtusifolius* obecně výrazněji na dodávané živiny než *R. crispus* (Křišťálová et al. 2011).

2.8 Alelopatie

Alelopatické látky jsou organické látky vylučované rostlinami, které poškozují jiné rostliny nebo zabraňují jejich trvalému usídlení v sousedství. Rostliny mohou tyto látky uvolňovat do ovzduší, vylučovat kořeny nebo je déšť může vymývat z prýtlů do půdy (Larcher 1988). Bylo zjištěno, že v blízkosti *Rumex obtusifolius* a *R. crispus* dokáží růst jen některé jiné druhy rostlin (Zaller 2006b). Novák (1992) se zmiňuje v souvislosti s *Rumex obtusifolius* a *R. crispus* o vylučování velkého množství sekundárních metabolitů do půdy. Důkladnějším zkoumáním se zjistilo, že tyto produkty sekundárního metabolismu vylučované kořeny obsahují alelopatické látky, které jsou pro mnohé druhy toxické (Zaller 2006b). Výzkumem efektu těchto látek u *R. obtusifolius* na výskyt jiných travních druhů a bylin provedl např. Zaller (2006b). Výsledky jeho pokusu prokázaly účinky alelopatických látek na opožděné klíčení a v některých případech dokonce inhibici klíčení zkoumaných travinných druhů s výjimkou *Plantago lanceolata*.

Druhy rostoucí v sousedství s *R. obtusifolius* jsou tedy pravděpodobně více odolné vůči alelopatickým látkám (Zaller 2006b).

2.9 Vliv sucha a mrazu

Sucho a mráz jsou jedny z nejdůležitějších podmínek ovlivňujících život šťovíků. Mateřské rostliny s dobře vyvinutým kořenovým systémem mohou přežít kruté zimy a sucha, avšak semenáčky jsou mrazem a delším suchem ohroženy a zabíjeny. O tom se ve své práci zmiňují Cavers et Harper (1964). Zaller (2004a) uvádí, že dodnes není jasné, zda klima (např. sucho, chladné zimy či periody dešťů)

a předchozí polní historie přispívají k různým výskytům obou druhů šťovíků v jednotlivých letech.

Cavers et Harper (1964) uvádí, že silná sucha a kruté zimy *R. crispus* nijak nezasahují a je dokonce schopný růst i na trvale zamokřené půdě. Vysokou mortalitu přes zimní období u *R. obtusifolius* i *R. crispus* zaznamenal Hongo (1989a) na ostrově Hokaido. Hongo (1989b) při dalším experimentu ve stejném regionu pozoroval úmrtí 98 % rostlin *R. obtusifolius* ve 4. a 5. roce, zatímco rostlin *R. crispus* přežilo 17 %. Na základě těchto výsledků pak Hongo (1989b) označil *R. obtusifolius* jako krátkověký a *R. crispus* jako krátkověký nebo dlouhověký druh, oba s tendencí umřít po odkvětu. Vzhledem k tomu, že doposud není jasné, zda jsou oba druhy monokarpické či polykarpické, zůstává také nezodpovězenou otázkou, za jakých podmínek jsou oba druhy schopné přezimovat. O přezimování *R. obtusifolius* a *R. crispus* ve fázi vytvořené listové růžice se zmiňují např. Maun (1974) a Grime et al. (1988). V České republice se přezimováním v jedné sezóně obou druhů zabývala Křišťálová et al. (2011). Rostliny *R. obtusifolius* vykvetly a vytvořily semena, u těchto rostlin byla zjištěna vysoká mortalita ukazující nízkou rezistenci vůči mrazům. Naopak *R. crispus* přezimoval ve fázi listové růžice s vytvořenými růstovými vrcholy s nulovou úmrtností, v další sezóně pak tyto rostliny vykvetly a plodily. *R. crispus* se tak zdá být odolnější vůči tuhým zimám než *R. obtusifolius*.

2.10 Nechemické způsoby odstraňování šťovíků

Rumex obtusifolius i *Rumex crispus* působí velké škody převážně na zemědělsky obhospodařovaných půdách a je velice těžké ho nějakým způsobem potlačit. K obecně doporučovaným principům obrany proti zaplevelování těmito druhy je především používání čistého osiva, využívání nedopasků a co největší omezování aplikace kejdy (Mikulka et al. 1995). Šťovíky se často nacházejí také v rozvolněných travních porostech a vzhledem k jejich nízké konkurenceschopnosti vůči ostatním druhům doporučuje Zaller (2006a) neustále udržovat hustý a vitální trávník. Hustého vitálního trávníku lze dosáhnout dosíváním konkurenčních rostlin (Martínková et Honěk 2001).

Dlouhodobým cílem kontrolního managementu je především bránit šíření semen a oslabovat jejich schopnost obnovování růstu odstraňováním nebo poškozováním jejich podzemních a nadzemních částí (Zaller 2004a, Zaller

2004b). Strnad et al. (2010) zkoumal vliv ručního odstraňování vypichováním *R. obtusifolius* a *R. crispus* 5 cm pod zemí zároveň při různé dostupnosti živin N, P a K. Jejich výsledky ukazují, že metoda vypichování nemá žádný vliv na regulaci obou druhů.

V současnosti se dnes jako nechemických kontrol kromě sečení (Mikulka et al. 1995, Zaller 2006a) a pastvy vysokou zvěří (Cavers et Harper 1964), skotu a kozami (Sakanoue 1995, Pavlů et al. 2008b), ovce (Zaller 2006a), využívá například biologického boje – zejména aplikace *Gastrophysa viridula* z řádu brouků (Bentley et Whittaker 1979, Cottam et al. 1986, Martínková et Honěk 2004) a sněti zvané *Uromyces rumicis* (Hatcher et al. 1994, Martínková et Honěk 2004).

2.11 Minerální výživa rostlin

Živiny označujeme takové prvky, které rostliny potřebují k zajištění svých životních funkcí. Ke svému životu potřebují rostliny mnoho anorganických prvků, které pocházejí z minerálů nebo jsou dostupné v minerální formě po rozkladu organické hmoty (Larcher 1988, Vaněk et al. 2007).

Nejběžnějším kořenovým substrátem je půda vzniklá z povrchových zvětralin zemské kůry a ze zbytků organismů. Fyzikální, chemické i biologické vlastnosti půdy se vytvářejí působením půdotvorných činitelů (Procházka et al. 2003).

V půdním roztoku se nacházejí půdní koloidy, což jsou malé částice s pozitivním nebo negativním nábojem, které na sebe váží různé minerální látky. Mezi půdním roztokem, půdními koloidy a půdní zásobou minerálních živin se vytváří rovnováha, která se přizpůsobuje neustále se měnícím podmínkám (Larcher 1988, Vaněk et al. 2007). Největší význam pro rostliny mají ionty v půdním roztoku (Procházka et al. 2003).

Příjem živin z půdního substrátu se dělí na dvě fáze. V první fázi příjmu živin přilnou ionty na povrch kořene, ve druhé fázi pak probíhá příjem iontů proti koncentračnímu spádu, který se navíc vyznačuje selektivitou (Slavíková 1986, Vaněk et al. 2007). Předpokládá se, že rychlost příjmu minerálních živin rostlinami závisí na jejich obsahu v rostlinách a dochází tak k regulaci na základě mechanismu zpětné vazby (Slavíková 1986, Procházka et al. 2003). Rychle se k povrchu kořene většinou dostávají dusičnanové ionty, naopak pomaleji se pohybují ionty fosforečnanové a draselné (Larcher 1988).

Ionty, které již pronikly do vnitřní části kořene, jsou dále transportovány do míst jejich potřeby vodivými cestami. Některé putují v nezměněné iontové formě jako např. K^+ nebo Na^+ , ale řada z nich se již v kořenech váže na organické sloučeniny a jsou v těchto sloučeninách také transportovány. Díky tomu je rozdílná pohyblivost různých živin v rostlině (*Vaněk et al. 2007*).

Proces příjmu živin je ovlivňován vnitřními faktory, ovlivněné samotnou rostlinou (např. dědičné dispozice k přijímání některých iontů, rozvoj kořenového systému) a vnějšími faktory, především klimatické, povětrnostní a půdní. Z povětrnostních podmínek má největší vliv množství dešťových srážek a jejich rozdělení. Se zvýšenou vlhkostí půdy se zpravidla zvyšuje příjem např. fosforu a draslíku. Mezi důležité půdní podmínky patří např. zrnitost, pórovitost, obsah živin (*Vaněk et al. 2007*) a hodnota půdní reakce pH (*Slavíková 1986*), které mohou hrát důležitou roli ve výživě rostlin. Při nízkých hodnotách půdního pH (menších než 3) může docházet ke zmenšování kořenového systému rostlin a omezování množství kořenových vlásků (*Kováčik 2009*), vyšší hodnoty půdního pH snižují koloběh a fixaci dusíku (*Slavíková 1986*).

Převážná část příjmu a inkorporace (začleňování) živin probíhá ve vegetačním období, dříve než začne rychle narůstat hmotnost rostliny. Nejdůležitější živiny musí být rostlině k dispozici co nejdříve, nedostatečné dodání minerálních živin totiž omezuje produkci organické hmoty. Rozvíjející se listy v sobě hromadí hlavní živiny N, P, K pro další využití (*Larcher 1988*). Nakonec rychlost produkce organické hmoty převyší rychlost příjmu minerálních látek. Podíl anorganických látek v rostlině se začne měnit ve prospěch organické hmoty. Dochází tak k ředění způsobenému produkovanou organickou hmotou. Tento jev bývá nazýván jako zředovací efekt (*Vaněk et al. 2007*).

Velký ekologický význam má vylučování minerálních látek rostlinami, které hraje důležitou roli mezi živými organismy. Vylučované látky např. přitahují opylovače, odpuzují býložravce nebo působí inhibičně na jiné organismy při vnitrodruhové a mezidruhové kompetici (např. alelopatie). Alelopatické jevy byly pozorovány také u širokolistých šťovíků *R. obtusifolius* a *R. crispus* (*Novák 1992, Zaller 2006b*) viz kapitola 2.8. Alelopatie.

2.12 Projevy dostatku a nedostatku živin na rostliny

Charakteristickými znaky živin jsou nezbytnost – při její absenci v živném prostředí nemohou rostliny dokončit svůj cyklus, nezastupitelnost jinými živinami a přímé zapojení do metabolismu rostlin (Vaněk et al. 2007). V souvislosti s požadavky rostlin na živiny lze zmínit tzv. Liebigův zákon minima poprvé popsany v roce 1840 (Procházka et al. 2003). Z hlediska minerální výživy ho lze chápat tak, že živina přístupná v nedostatečném množství působí jako činitel omezující výnos. Na Liebiga později navázal Mitscherlich. Podle tzv. Mitscherlichova zákona o působení vegetačních faktorů existují vztahy mezi výnosy rostlin a množstvím živin přidávaných do půdy. Rostlina musí přijímat jak hlavní živiny, tak stopové prvky nejen v dostatečném množství, ale také ve vhodném poměru. (Larcher 1988).

Nadbytečné koncentrace živin mohou na rostlinu působit až jedovatě, především pokud je v převaze jediná živina (Larcher 1988, Vaněk et al. 2007).

2.13 Charakteristika minerálních látek N, P, K, Ca

Nejdůležitějšími základními prvky v minerální výživě nejen širokolistých šťovíků, ale vůbec všech rostlin, jsou dusík (N), fosfor (P) a draslík (K). Výzkumem vlivu N, P, K na druhy *Rumex obtusifolius* a *R. crispus* se zabývali např. Jeangeros et Nösberger (1990), Niggli et al. (1993), Milberg (1997), Humphreys et al. (1999), Van Eekeren et al. (2006), Křišťálová et al. (2011). V této kapitole je věnována pozornost zejména působení nedostatku a nadbytku N, P, K, Ca na zjevné projevy u rostlin. Zjednodušený přehled funkcí N, P, K a Ca viz tab. č. 1.

tab. č. 1: Zjednodušený přehled funkcí živin N, P, K. Upraveno podle Larchera (1988) a Vaňka et al. (2007).

Bioelement	Přijímané formy	Místa hromadění	Příznaky nedostatku	Příznaky nadbytku
Dusík (N)	NO_3^- , NH_4^+ , (močovina)	mladé prýty, listy, pupeny, semena, zásobní orgány	zakrslý nebo tprasličí vzrůst, větvenovitý tvar rostliny, poměr nadzemních prýtů ke kořenům posunut ve prospěch kořenů, předčasné žloutnutí listů, někdy červenání rostliny	zvýšené větvení a omezený růst kořenů, rostliny sytě zelené, dobře vyvinuté až robustní, zasychání okrajů až odumření listů
Fosfor (P)	HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-	více v reprodukčních orgánech než ve vegetativních	poruchy reprodukčních procesů (zpožděné kvetení), tmavě zelené nebo bronzově fialové zbarvení listů	snížená přijatelnost některých kovů
Draslík (K)	K^+	meristémy, mladá pletiva, korový parenchym, místa intenzivního metabolismu	poruchy vodní bilance (zasychání vrcholků), zvlněné okraje starších listů, kořenová hniloba	zhoršená klíčivost a vzcházivost některých druhů rostlin, zvyšování koncentrace solí v půdě
Vápník (Ca)	Ca^{2+}	listy	Poruchy při dělivém růstu (malé buňky), zasychání vrcholků, deformace listů, zbrzděný růst kořenů	Snížená přijatelnost některých kovů (Fe, Mn)

2.13.1 Dusík (N)

Dusík je jedním z nejdůležitějších prvků v koloběhu živin v přírodě. Nejvíce dusíku se nachází v litosféře, avšak pro koloběh dusíku má největší význam dusík nacházející se v atmosféře. Do půdy se dusík z atmosféry dostává fixací mikroorganismy, hnojivy, rostlinnými zbytky a ve formě srážek (Vaněk et al. 2007).

Dle Vaňka et al. (2007) se celkový obsah N v půdě pohybuje přibližně v rozmezí 0,1 – 0,2 %, přičemž většinou kolem 95 % z tohoto dusíku tvoří organické sloučeniny, jako jsou například rostlinné a živočišné zbytky, biomasa mikrobů a jejich metabolity. Dusík z těchto sloučenin je pro rostliny nedostupný a musí projít procesem mineralizace na kationt amonný NH_4^+ nebo aniont nitrátu dusičnanového NO_3^- , které jsou pro rostliny přijatelné (Slavíková 1986, Larcher 1988, Vaněk et al. 2007). Obsah dusíku v půdě je závislý např. na hodnotě půdního pH, nejlépe je pro rostliny dostupný mezi hodnotami 6 a 9 (Slavíková 1986, Kováčik 2009).

V rostlinných bílkovinách je obsaženo asi 15 – 18,9 % dusíku, bílkoviny tvoří podstatnou část všech živých buněk a pletiv. Jsou obsaženy zvláště v mladých orgánech, dělivých pletivech a látkách, které se významně podílejí na růstu rostliny a tvorbě nejdůležitějších orgánů a tvorbě biomasy (*Vaněk et al. 2007*). Dusík je také spolu s hořčíkem důležitou součástí chlorofylu. Obecně poruchy v příjmu N způsobují narušení metabolismu, omezení růstu, zjevné změny v zabarvení rostlin, snížení výnosu a zhoršení kvality produkce (*Vaněk et al. 2007, Kováčik 2009*).

Nedostatek dusíku se projevuje omezením růstu rostlin a tvorby podstatných orgánů rostlin jako jsou např. listy, stébla, lodyhy apod. Rostliny s nedostatkem N bývají slabší a nižší, často jsou porosty nevyrovnané a světlejší. Dochází ke snížení tvorby chlorofylu, což snižuje fotosyntézu a tedy i produkci biomasy. Zároveň je omezená tvorba kořenů a jejich energetické zásobování. Snižuje se příjmová kapacita kořenů a klesá příjem dalších živin. Omezená výživa dusíkem většinou zkracuje vegetační dobu a porosty rychleji dozrávají. Zkrácením doby vegetace se však snižuje výnos i kvalita produkce, obzvláště semen (*Vaněk et al. 2007*).

Jednotlivé druhy rostlin reagují na nízký příjem dusíku rozdílně. Důležitou roli hraje také vegetační fáze, ve které se jednotlivé rostliny nacházejí. Nedostatek N může např. u obilnin v době odnožování snížit počet odnoží. Při dlouhotrvajícím nedostatku N si chce rostlina zachovat vegetační vrchol, transportuje tedy dusíkaté látky včetně chlorofylu ze starších listů právě do vegetačního vrcholu. Starší listy tím postupně žloutnou, až nakonec usychají (*Zehnálek et al. 2006, Vaněk et al. 2007*).

Na působení nadbytku N reagují rostliny různě a to v závislosti na druhu a také na jejich růstové fázi. Velmi citlivé na nadbytek dusíku bývají porosty v raných fázích vegetace, především při vzcházení. Pokud má rostlina dobré růstové podmínky, využívá dusík k růstu vegetativních orgánů (listů, stonků a částečně i květních orgánů). Rostliny jsou sytě zelené, dobře vyvinuté až robustní. Do generativní fáze růstu přecházejí později a prodlužuje se dozrávání. Zjevné příznaky při nadbytku N jsou nekrózy a zasychání okrajů listů vedoucí až k odumření. Tento jev je důsledkem toho, že dusík se hromadí v okrajích listů. Pokud jeho obsah překročí toxickou hladinu, poškozují se pletiva, což může vést k polehání rostlin (*Vaněk et al. 2007, Kováčik 2009*). Poruchy z nadbytku dusíku se běžněji vyskytují u rostlin pěstovaných na umělých substrátech a s omezeným množstvím zeminy (*Vaněk et al. 2007*).

Někteří autoři se zabývali výzkumem vlivu N na *Rumex obtusifolius* a *R. crispus*. Oba tyto druhy jsou označovány jako nitrofilní (Hejduk et Doležal 2004 ex Weissbach 1998), tedy že mají vyšší nároky na obsah N v půdě. Millberg (1997) uvádí, že klíčení *R. obtusifolius* i *R. crispus* není dusíkem negativně ovlivňováno, naopak je jím klíčení stimulováno. Zaller (2004a) však naopak uvádí názor, podle kterého nejsou tyto druhy nitrofilní v raných růstových fázích. Jeangeros et Nösberger (1990) ve svém výzkumu ukázali zvyšující se listovou plochu *R. obtusifolius* v závislosti na rostoucí dostupnosti dusíku. Niggli et al. (1993) tento názor potvrzuje a zároveň dodává, že se zvýšenou dostupností dusíku roste schopnost konkurence.

2.13.2 Fosfor (P)

Fosfor v půdě se nachází přibližně v rozmezí 0,01 – 0,15 %. Lehké půdy s nízkým obsahem organické hmoty mají většinou méně P než půdy s vyšším obsahem. Zdrojem pro výživu rostlin je fosfor v minerálních a organických sloučeninách. Fosfor je v půdě málo pohyblivý a jen málo proniká do hlubších horizontů půdy. Pro rostliny je důležitý především P z půdy, hnojením se spíše doplňují živiny odebrané sklizněmi (Vaněk et al. 2007).

Fosfor rostliny přijímají ve formě aniontů kyseliny trihydrogenfosforečné ve formě H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} . Fosfor ve formě kyseliny fosforečné se v rostlinách stává součástí nukleotidů, které jsou základem nukleových kyselin. Je hlavní součástí adenosindifosfátů (ADP) a adenosintrifosfátu (ATP) a proto se podílí na energetických procesech v buňce (Vaněk et al. 2007). Rostliny přijímají dusík nejlépe při hodnotách půdního pH v rozmezí 6,5 a 7,5 (Kováčik 2009). Přijatý P rostlinami se transportuje do míst jeho nejvyšší potřeby – mladé listy, vegetační vrchol, později květy a semena (Vaněk et al. 2007).

Nedostatek fosforu se u rostlin projevuje spíše latentní formou, tedy nejsou viditelné příznaky nedostatku, ale jeho obsah v rostlině je nízký. Kritické období pro příjem P je počátek vegetace, kdy rostliny nemají ještě dostatečně vyvinutý kořenový systém. Zvláště je zhoršený příjem za chladného případně suchého počasí. Po zlepšení podmínek pro příjem fosforu se však rostlina zcela nevyrovná s dřívějším výrazným deficitem P (Vaněk et al. 2007). Zjevné příznaky výrazného dlouhotrvajícího nedostatku fosforu jsou: nízké rostliny, listy užší, menší

a vzpřímené, stonky bývají slabší. Omezená bývá také tvorba kořenů. Listy mají barvu špinavě zelenou s červeným až fialovým odstínem (Vaněk et al. 2007, Kováčik 2009). Vaněk et al. (2007) uvádí, že rostliny s nedostatkem fosforu mají sníženou odolnost proti mrazu.

Rostliny s dostatkem fosforu obecně dříve přichází do generativní fáze růstu a dříve dozrávají. Přítomnost fosforu je důležitá pro zakládání a tvorbu květů – dostatek fosforu podporuje větší květenství, větší počet květů a tvorbu semen.

V České republice se nadbytek fosforu téměř nevyskytuje. Vaněk et al. (2007) se zmiňuje, že v zahraničí se potýkají s vyšším obsahem fosforu v půdě ze statkových hnojiv díky vysoké hustotě dobytka. Nadbytek P u nás byl zaznamenán v souvislosti se zásobním nebo melioračním hnojením, kdy se např. v sadech aplikovala fosforečná hnojiva na celé období sadu (Vaněk et al. 2007).

Někteří autoři se zmiňují o vyšší konkurenceschopnosti *Rumex obtusifolius* a *R. crispus* při vyšší dostupnosti N, P a K v půdě (Niggli et al. 1993, Humphreys et al. 1999).

2.13.3 Draslík (K)

Množství draslíku v půdách se pohybuje v rozmezí 0,5 – 3,2 %, přičemž písčité a rašelinné půdy obsahují menší množství K. Draslík se vyskytuje hlavně v křemičitanech (živce a slídy) a zvětráváním se postupně uvolňuje z jílových minerálů skupiny illitu. Rostliny přijímají draslík jako kationt K^+ . Příjem draslíku je ovlivňován vlhkostí, teplotou a intenzitou slunečního záření. Při vyšších teplotách a vyšší vlhkosti půdy roste potřeba draslíku. Se zvyšující se intenzitou slunečního záření rostliny potřebují méně draslíku a naopak. Nároky na výživu K během vegetační doby narůstají s rostoucí tvorbou biomasy a vrcholí těsně před květem (Vaněk et al. 2007).

Funkce draslíku spočívá především v ovlivňování osmotického tlaku, tím i turgoru buněk, který úzce souvisí s hospodařením rostliny s vodou. Rostliny s dostatkem K mají také silnější buněčné stěny a snižuje se tak nebezpečí polehání (důležité např. u obilnin). Květy a plody s dostatkem draslíku jsou sytěji vybarvené (Vaněk et al. 2007, Kováčik 2009).

Nedostatek draslíku se může u rostlin také vyskytnout v nepříznivých podmínkách pro příjem této živiny (sucho, chlad) a to i v případě, že je množství

draslíku v půdě dostatečné. Jednotlivé druhy rostlin jsou různě uzpůsobeny na příjem K, např. jeteloviny přijímají draslík hůře než trávy. Listy rostlin s nedostatkem draslíku zasychají od okraje spodních listů, dochází k nekrozi a vede až k opadu spodních listů. U některých rostlin dochází ke žloutnutí listů až s nádechem do červena. Jeteloviny s nedostatkem draslíku mají nejprve světlé tečky až skvrny na listech a na konci listy usychají. Hlavně u rostlin s velkými a širokými listy v letních měsících způsobuje K v pozdější fázi vegetace vadnutí, což souvisí se špatným hospodařením s vodou. Porosty s nedostatkem draslíku jsou náchylnější na mráz, hůře regenerují a jsou snáze napadány houbovými chorobami (Vaněk et al. 2007).

Nadbytek K se může nacházet na místech skladování organických hnojiv, většinou u polních hnojišť a na pozemcích, kde se často aplikují močůvky, kejdy apod. Na těchto pozemcích se obzvláště daří ruderalním plevelům a rostlinám snášejícím vysoké koncentrace draslíku a solí (např. merlík, lebeda, šťovík tupolistý a šťovík kadeřavý). Nadbytek draslíku v rostlinných pletivech snižuje příjem Na, Mg a Ca. Zvyšuje se tedy koncentrace solí v půdě, která může vést až k zasolení půd. Při nadbytku K může docházet k polehání obilnin. Draslík sice vylepšuje stavbu buněk, ale pouze do určité hranice. Nad tuto hranici se pak výrazný nadbytek draslíku chová podobně jako nadbytek dusíku (Vaněk et al. 2007). Vaněk et al. (2007) uvádí, že zvýšené množství K může na počátku vegetace negativně ovlivňovat klíčivost a vzcháživost některých druhů rostlin.

Vlivu dostupnosti draslíku na *Rumex obtusifolius* se zabýval např. Van Eekeren et al. (2006), který zjistil, že draslík nemá výrazný vliv na počet rostlin v porostu ani na produkci jejich biomasy. To potvrzuje i Jeangeros et Nösberger (1990), když zmiňují zvýšený výskyt draslíku v rostlině po jeho aplikaci, avšak nijak výrazný vliv na její růst. Humphreys et al. (1999) uvádí, že nízká dostupnost K v půdě růst u *R. obtusifolius* omezuje.

2.13.4 Vápník (Ca)

Vápník je v půdě vázaný především v uhličitanech, sádrovcích, fosforečnanech a křemičitanech (živce, augit). Do rostliny se dostává především jako iont a v rozpuštěných solích (Larcher 1988). Přiměřený obsah Ca v půdě zaručuje dobrý průběh většiny biologických, chemických i fyzikálních procesů. Vápník

ovlivňuje tvorbu a růst kořenů, zvláště kořenového vlášení, které zajišťuje větší příjmovou kapacitu pro živiny. Rostlinou je Ca přijímán především pasivně přes kořenové špičky jako kationt Ca^{2+} . Pokud se v živném roztoku nachází dostatečné množství K^+ , H^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} či Mn^{2+} , je příjem Ca^{2+} výrazně omezen (Vaněk et al. 2007).

Nedostatek vápníku se projevuje především ovlivněním půdních vlastností. Nízký obsah Ca způsobuje snížení pH a tím i zhoršení podmínek pro růst rostlin. Byly pozorovány poruchy výživy rostlin při nedostatku Ca v souvislosti s antagonistickým působením K^+ (Vaněk et al. 2007).

Nadbytek vápníku jako takový rostlinám většinou nevádí, negativně působí však v souvislosti se zvyšováním hodnoty pH. Dostatečné množství Ca v půdě zajišťuje harmonickou výživu rostlin a zároveň působí na omezení příjmu rostlinami a tím i průniku některých rizikových prvků (Al, Fe, Mn, Pb, Cd). Nedostatek Fe se často vyskytuje u tzv. kalkofobních rostlin, které nesnáší vysoké množství Ca v půdě. Mezi kalkofobní rostliny patří např. borůvky, maliníky, vřes, ale také pravděpodobně i rostliny druhu *Rumex*. Prostředím s dostatečným až nadbytečným množstvím Ca bývají stanoviště s vysokým podílem uhličitanů, zasolené půdy a půdy po radikálním vápnění (Vaněk et al. 2007).

2.14 Rizikové prvky v půdě

Znečištění neboli kontaminace zvýšeným množstvím rizikových prvků negativně ovlivňuje produkční i ekologické vlastnosti půdy. Ke kontaminaci dochází jednak přirozenými procesy, v současnosti však především díky antropogenním činnostem (Sanita di Toppi et Gabrielli 1999). V České republice jsou povolené limity rizikových prvků v zemědělské půdě upraveny vyhláškou č. 13/1994 Sb.

Mezi rizikové prvky můžeme řadit např. As, Cd, Zn, Pb, tyto kontaminanty mohou v půdě přetrvávat i tisíce let (Benavides et al. 2005). Dostupnost mnoha rizikových prvků je spojována s množstvím P v půdě, zejména se jedná o As a Cd. Arzen soupeří s fosforem o půdní vazby (Száková et al. 2009) a kadmium se vysráží do fosfátů (Dong et al. 2007). Dobrá dostupnost Cd a Zn se objevuje v kyselých půdách (Tyler et Olsson 2001, Hejzman et al. 2009, Uprety et al. 2009). Přidání vápníku či fosforu do půdy ve formě aditiv tak může zvýšit dostupnost rizikových prvků (Wang et Wu 1995, Kumpiene et al. 2008, Hejzman et al. 2010).

Pro každý rostlinný druh je hranice přijatelného množství rizikového prvku v půdě jiná. Některé rostliny snáší velmi vysoké obsahy těchto prvků a proto je možné takové rostliny využít např. k tzv. fytořemediaci. Fytořemediace znamená využití zelených rostlin k přesunu, akumulaci nebo odstraňování kontaminantů životního prostředí (Kučerová et al. 1999). Z dostupné literatury vyplývá, že pokus s rizikovými prvky na rodu *Rumex* provedli Barrutia et al. (2009) ve Španělsku se šťovíkem kyselým (*R. acetosa* L.). Jednalo se o pokus fytoextrakce tímto šťovíkem na dvou silně kontaminovaných místech s Cd a Zn. Výsledky ukázaly velice úspěšnou fytoextrakci Zn.

Dosud však nebylo prozkoumáno, jaký vliv má přítomnost velkého množství rizikových prvků v půdě na vzcházení a růst druhů *Rumex obtusifolius* a *R. crispus*, a zda by případně také mohly být využity k fytořemediaci.

2.14.1 Zinek (Zn)

Zinek se v půdě vyskytuje v minerální formě jako součást mřížky minerálů (např. biotit, augit), část je vázána jako Zn^{2+} v sorpčním komplexu a v menším množství je Zn vázán v organických sloučeninách. Mobilita zinku v půdě je poměrně malá a navíc se snižuje při vyšších hodnotách pH a vyšším obsahu P. Rostlinami je zinek přijímán ve formě Zn^{2+} (Vaněk et al. 2007). Příjem Zn rostlinami při vyšším pH klesá a stejně tak i při vyšším obsahu fosforu. Spolupůsobením těchto dvou faktorů je příjem Zn ovlivněn výrazně. Vyšší množství P omezuje pohyb Zn v rostlinách. Příjem Zn je nižší také v přítomnosti vyššího obsahu Fe a Cu. Zinek se podílí na řadě enzymových reakcí, a proto je jeho přítomnost v přiměřeném množství v rostlinách nezbytná (Reichman 2002, Vaněk et al. 2007).

Nedostatek zinku může způsobovat poruchy v dělení buněk na špičkách kořenů, vegetačních vrcholech a v kambiálních pletivech. Vliv nedostatku zinku může být patrný i pouhým okem, kdy je možné spatřit chlorotické skvrny. Při nedostatku Zn se totiž snižuje počet chloroplastů a tím dochází i k úbytku chlorofylu (Vaněk et al. 2007).

Nadbytek zinku a jeho toxické působení je v přirozených podmínkách výjimečné, avšak přichází v úvahu vznik nadbytku vlivem antropogenních činností. Zvýšený přísun Zn může vznikat i používáním některých hnojiv a jeho nadměrné množství lze snížit vápněním. Vysoký obsah Zn v prostředí může omezovat příjem

Fe, rostliny pak špatně rostou a mohou mít silnou chlorózu (Reichman 2002, Vaněk et al. 2007). Rostliny vystavené toxickému působení Zn mohou mít menší žluté, nahnědlé až načervenalé listy a žluté zbarvení kořenů (Reichman 2002, Sagardoy et al. 2009, Song et al. 2011).

2.14.2 Kadmium (Cd)

Kadmium se řadí do tzv. rizikových či toxických prvků (Vaněk et al. 2007). Cd se v životním prostředí nachází především díky antropogenní činnosti např. z průmyslu, spalování pohonných hmot a olejů motorových vozidel, v poslední řadě také z hnojiv používaných v zemědělství (Sanita di Toppi et Gabbrielli 1999). Kadmium rostliny ke svému životu nepotřebují a při vyšším množství v půdě se pro ně stává toxické. Rostliny se vyznačují různou citlivostí vůči Cd (Benavides et al. 2005). Do rostlin se Cd (převážně ve formě Cd^{2+}) dostane nejčastěji se Zn, který je chemicky příbuzný a který rostliny ke svému životu naopak potřebují (Soudek et al. 2008). Převažující podíl přijatého kadmia zůstává již v kořenech rostlin (Sanita di Toppi et Gabbrielli 1999). Příjem Cd rostlinami bývá ovlivněn hodnotou pH a obsahem P v půdě (Dong et al. 2007).

Toxický nadbytek kadmia se viditelně projevuje hlavně hnědnutím kořenových vlásků, červenohnědé zbarvení žilnatin, červenohnědé nekrózy na mladých listech a výrazným omezením růstu (Sanita di Toppi et Gabbrielli 1999). Zvýšené množství kadmia může zhoršovat podmínky pro klíčení semen rostlin (Benavides et al. 2005).

3. Experimentální část

V této části budou ve formě článku zpracována témata zabývající se experimentální prací při výzkumu vybraných částí ekologie *Rumex obtusifolius* a *R. crispus*. První článek (kapitola 3.1) se zaměřuje na otázku vlivu půdního pH, přítomností přidaného fosforu a vápníku a také přítomností rizikových prvků v půdě na vzcházení *R. obtusifolius*. Druhý článek (kapitola 3.2) se zabývá vlivem minerálních látek N, P, K na velikost matečných rostlin, produkci semen a klíčící schopnost semen *R. crispus*. Poslední článek (kapitola 3.3) řeší otázku vlivu N, P, K na vzcházení, růst a přezimování *R. crispus* a *R. obtusifolius*.

(v recenzním řízení)

3.1 Effect of quick lime and superphosphate additives on emergence and survival of *Rumex obtusifolius* seedlings in acid and alkaline soils contaminated by trace elements

Kristýna Červená · Michal Hejcman · Stanislava Vondráčková · Vladimíra Müllerová · Jiřina Száková · Pavel Tlustoš

K. Červená · M. Hejcman (Corresponding author) · V. Müllerová

Department of Ecology, Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences, Kamýcká 129, CZ-165 21 Prague 6 - Suchdol, Czech Republic, e-mail address: hejcman@fzp.czu.cz

S. Vondráčková · J. Száková · P. Tlustoš

Department of Agroenvironmental Chemistry and Plant Nutrition, Faculty of Agrobiological Sciences, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences, Kamýcká 129, CZ-165 21 Prague 6 - Suchdol, Czech Republic

Abstract

Aims: We asked how emergence and survival of *Rumex obtusifolius* seedlings is affected by soil pH and by quick lime (Ca) and superphosphate (P) additives in soils contaminated by arsenic, cadmium, lead and zinc, with the aim of estimating the suitability of *R. obtusifolius* for indication of contaminated soils.

Methods: In May 2011, we initiated the pot seeding experiment in Prague (Czech Republic) with slightly acid (Litavka) and slightly alkaline (Malín) soils. We used a control without any additives, Ca and P treatments. We recorded seedlings for 37 days following the start of the experiment.

Results: Higher and quicker emergence, together with substantially higher mortality of seedlings, was recorded in Litavka than in Malín. A positive effect of Ca on seedlings was recorded in Litavka, but negative in Malín. There was a slightly positive effect of P on the speed of emergence in both soils. P increased mortality in Litavka, but there was no effect in Malín.

Very small seedlings with narrow and long leaves of reddish colour were recorded in Litavka soil in the control and P. In Ca, leaves of seedlings were more elliptic and less reddish. In Malín soil, seedlings were green and substantially more vital in the control and P than in Litavka soil. In Ca, small and unviable seedlings were recorded.

Conclusions: *Rumex obtusifolius* is a “calciphobic” species, suffering due to high Ca and Mg levels in the soil. High availability of Zn, Cd and Pb in the soil can be efficiently indicated by decreased growth, increased mortality and by conspicuous changes in colour and shape of seedlings.

Keywords: Broad-leaved dock, cadmium, lead and zinc toxicity, germination and mortality, indicator and calciphobic species, recruitment

Introduction

Rumex obtusifolius subsp. *obtusifolius* (hereafter referred to as *R. obtusifolius*, broad-leaved dock) is a highly problematic weed species particularly in temperate grasslands in many countries (Cavers and Harper 1964; Martínková et al. 2009; Decruyenaere et al. 2012). *Rumex obtusifolius* is highly successful, especially in moderately moist and disturbed grasslands with high N, P and K supply, most frequently from application of slurry and farmyard manure or on pastures with high deposition of faeces (Hopkins and Johnson 2002; Zaller 2004; Hejcman et al. 2012; Strnad et al. 2012). If eaten in high quantity by cattle or horses, *R. obtusifolius* can cause serious digestive problems and therefore a decrease in livestock performance (Hejduk and Doležal 2004). Control of this species without any herbicides is very difficult and therefore *R. obtusifolius* is the most detrimental grassland weed species, especially under conditions of organic farming (Pino et al. 1995; Martinková and Honěk 2004; Zaller 2006; Latsch and Sauter 2010; Strnad et al. 2010). Factors that determine *R. obtusifolius* to be a highly successful weed are: 1) high seed production per plant, 2) long-term viability of seeds in the soil seed bank, 3) regeneration of plants from fragments of underground organs, and 4) the perennial character of the species. According to Cavers and Harper (1964), one *R. obtusifolius* plant can produce annually up to 60,000 seeds and seeds can be viable in the soil seed bank for several decades (Tsuyuzaki 2010). Based on a pot fertiliser experiment, Hrdličková et al. (2011) estimated annual production of seeds per plant of normal size to be up to 10,000. Emergence and seedlings of *R. obtusifolius* are negatively affected by high N availability up to the rosette phase, but are affected positively by increased P supply. *Rumex obtusifolius* is therefore not nitrophilous in early development stages but tends to be nitrophilous from the stage of fully developed rosette (Křišťálová et al. 2011).

A question which has never been adequately investigated experimentally is why *R. obtusifolius* prefers Ca and Mg poor soils with slightly acid soil pH. Brenchley (1920) concluded that the plants of *R. obtusifolius* very rarely grew on chalk so they evidently do not like Ca and Mg rich soils. Humphreys et al. (1999) recorded a positive correlation between K availability in the soil and the density of *R. obtusifolius* plants in grasslands in UK, but a negative effect due to Mg availability. In addition, a negative correlation between soil pH and plant density was recorded.

Hann et al. (2012) recorded substantially higher mortality of *R. obtusifolius* plants in grasslands of Ca and Mg rich soil than on K rich soil in Austria. Bohner (2001) described *R. obtusifolius* as a “calciphobic” species which precipitated excessive Ca into calcium oxalate crystals. Calciphobic behaviour of *R. obtusifolius* can also be connected with its high K requirements and therefore with insufficient K supply on Ca and Mg rich soils because of antagonism between K and Ca/Mg uptake.

In addition to N, P, K, Ca and Mg availability in the soil and soil pH, growth of *R. obtusifolius* can be highly affected by availability of trace elements. Although *R. obtusifolius* is a common species in highly disturbed mining areas, and other areas frequently contaminated by trace elements, there has not been, according our literature searches, any studies investigating the effect of As, Cd, Pb and Zn contamination in the soil on emergence and survival of *R. obtusifolius* seedlings. As *R. obtusifolius* is a widely spread species with high biomass production, it could potentially be a suitable plant for remediation of contaminated soils, or if highly sensitive to increased availability of trace elements, as an indicator species suitable for detection of soils contaminated by trace elements during the field mapping of vegetation.

Availability of many trace elements to plants, As and Cd in particular, is also connected with soil P status. In the case of As this is because of competition between phosphates and arsenates for binding sites in the soil (Száková et al. 2009; Liu et al. 2012), and in the case of Cd, because of Cd precipitation into phosphates (Dong et al. 2007). In addition, the availability of Cd and Zn to plants is high, especially in acidic soils (Tyler and Olsson 2001; Dong et al. 2007; Hejcman et al. 2009; Uprety et al. 2009). Addition of Ca (CaO – quick lime) or P (Ca(H₂PO₄)₂ – superphosphate) additives can therefore substantially decrease the availability of many trace elements in the soil (Wang and Wu 1995; Puschenreiter et al. 2005; Kumpiene et al. 2008; Hejcman et al. 2010).

Using a pot experiment with Ca and P additives using two soils differing in pH, As, Ca, Cd, Mg, Pb and Zn status, the aim of this study was to answer the following questions: 1) how sensitive is *R. obtusifolius* to soil contamination and can it be used for indication of contaminated soils? 2) how is the emergence and survival of *R. obtusifolius* seedlings affected by the addition of Ca and P into contaminated soils?

Material and methods

Design of the pot experiment

In May 2011 we established the pot experiment in the open vegetation hall of the Department of [Agroenvironmental Chemistry and Plant Nutrition](#) in Prague – Suchdol (Czech Republic, 50° 7' 53.244" N, 14° 22 '13.114" E) with natural temperature and light conditions.

We used two contaminated soils: (1) slightly acidic fluvisol termed “Litavka” from alluvium of the Litavka river collected in the village Trhové Dušňky (60 km south of Prague, 49° 43' N, 14° 0' E). The Litavka soil was contaminated with Cd, Zn, and Pb by wastes from smelter setting pits (Borůvka et al. 1996; Šichorová et al. 2004) and (2) alkaline luvisol termed “Malín” collected from a bank of the streamlet Beránky near Malín village (close to Kutná Hora town 82 km east of Prague, 49° 58' N, 15° 17' E). The Malín soil was contaminated by As, Cd, and Zn due to tailings of silver mining in the 13 – 16th century (Száková et al. 2009). Chemical properties of the soils used analysed before establishment of the experiment are given in Table 1.

In addition to the effect of soil type, an effect of Ca (CaO – quick lime) and P (Ca(H₂PO₄)₂ – superphosphate) additives on emergence of *R. obtusifolius* was investigated. The soil additives were applied to pots in the following amount: 7.3 g CaO per 1 kg of soil and 1.3 g Ca(H₂PO₄)₂ per 1 kg of soil. The pot experiment was therefore composed of six treatments replicated five times (30 pots altogether): LC – Litavka soil without any additive as the control, LCa - Litavka soil with Ca additive, LP - Litavka soil with P additive, MC - Malín soil without any additive as the control, MCa – Malín soil with Ca additive, and MP – Malín soil with P additive.

We used 5 l pots of white colour. Each pot was filled with 5 kg of air dried soil sieved through a 10 mm sieve. We then applied the following fertilisers: 0.5 g N (in the form of NH₄NO₃), 0.16 g P (in the form of K₂HPO₄) and 0.4 g K (in the form of K₂HPO₄) into each pot and mixed with the soil. Application of N, P and K fertilisers was performed in order to make N, P and K availability non-limiting for growth of *R. obtusifolius* in all treatments, as the main aim of the study was to observe effects of soils and additives on emergence and survival of seedlings. The additives were mixed with the soil after application of N, P and K fertilisers and then all pots were watered. The fertilisers and additives were applied on the morning of

the 3rd May 2011. In the evening of the same day, we sowed 100 seeds, 1 – 2 cm deep, into the soil of each pot.

Seeds of *R. obtusifolius* were collected during spring 2011 from a region near Prague in central Czech Republic. The collection sites were mainly roadside ditches or abandoned fields with neutral soil pH. The seeds were stored at room temperature in paper bags and in the dark. Germination of used seeds was 86 % tested under laboratory conditions in a day/night light regime at 25 °C directly before establishment of the experiment. Pots were regularly watered if necessary to maintain optimal growth conditions during the course of the experiment.

We recorded the number of seedlings daily in each pot from the start of the emergence on the 9th day of the experiment and for the following 28 days from 12th May to 8th June 2011. A field emergence was defined as the maximal number of seedlings recorded during the course of the experiment in each treatment. We used field emergence because the maximal number of seedlings was recorded on different days for each treatment. In addition to field emergence, we analysed separately the final number of seedlings on the 28th day of the experiment.

Soil pH was measured in a 1:5 (w/v) solution (10 g of soil + 50 ml of solution) containing 0.01 mol l⁻¹ CaCl₂ at 20 ± 1 °C.

Data analysis

Repeated measures and factorial ANOVA followed by comparison using Tukey HSD test were applied to obtained data. We used ANOVA as all assumptions for the use of ANOVA were met. The relationship between soil pH and field emergence was evaluated using linear least square regression analysis. All statistical analyses were performed using the Statistica 8.0 program (Statsoft, Tulsa, OK, USA).

Results

Effect of additives on soil pH

Calculated by factorial ANOVA, effects of locality, additive and additive x locality interaction on soil pH were significant at the end of the experiment (Fig. 1a). In Litavka soil, the pH value was highly increased after application of Ca additive, but only slightly increased in Malín soil. There was no effect of P addition on the pH value in either soil.

Seedling number during the experiment and field emergence

Calculated by repeated measure ANOVA, the number of seedlings in Litavka soil was significantly affected by day and by day x additive interaction, but there was no effect due to soil additives (Fig. 2a). In Malín soil, the number of seedlings was significantly affected by all factors - day, additive and by day x additive interaction (Fig. 2b). In Litavka soil, higher emergence values and quicker emergence was recorded than in Malín soil, but in Malín soil, substantially lower mortality of seedlings was recorded than in Litavka soil. In Litavka soil, there was somewhat positive effect due to Ca additive on emergence and survival of seedlings in comparison to the control. In Malín soil, opposite results were recorded and there was a large negative effect of Ca additive on the emergence and survival of seedlings in comparison to the control. There was a slightly positive effect of P addition on the speed of emergence in both soils but there were differing effects due to P addition on survival of seedlings in both soils. In Litavka soil, P addition increased mortality while there was no effect of P addition on the mortality of seedlings in Malín soil.

Calculated by factorial ANOVA, the field emergence was significantly affected by locality and by additive*locality interaction, but not by the additive (Fig. 2c). The lowest mean emergence (27 %), was recorded in Malín soil with Ca additive and the highest (73 %), in Litavka soil with Ca additive. The emergence was not affected by the pH value in Litavka soil, but was significantly negatively related to pH value in Malín soil (Fig. 1b).

Calculated by factorial ANOVA, the final number of living seedlings recorded on the last (37th) day of the experiment was not significantly affected by the locality and additive, but was significantly affected by locality*additive interaction, indicating a location specific effect of additives (Fig. 2d). The lowest number of seedlings (18) was recorded in Litavka soil in P treatment and in Malín soil with Ca treatment (17). The highest number of seedlings (65) was recorded in Litavka soil with Ca treatment.

The effect of all treatments on number, vitality and size of seedlings on the 37th day of the experiment is obvious in photographs of individual pots shown in Fig. 3. Very small seedlings with narrow and long leaves with a characteristic reddish colour of leaf tips were recorded in Litavka soil in the control and P treatment. In Ca treatment, leaves of seedlings were more elliptic and less reddish. In Malín soil,

lower number of seedlings was recorded than in Litavka soil, but seedlings were green and substantially more vital in the control and P additive treatment than in Litavka soil. In Ca treatment, low numbers of small and unviable seedlings was recorded.

Discussion

Field emergence and consequent survival of *R. obtusifolius* seedlings was highly affected by soil chemical properties. The most detrimental for emergence and survival of *R. obtusifolius* seedlings was high pH, connected to high Ca and Mg availability in the soil. This was clear in the Ca and Mg rich Malín soil where addition of Ca resulted in very low emergence and survival of *R. obtusifolius* seedlings. To the best of our knowledge, this is the first experimental study showing negative effects of high Ca and Mg availability on emergence and consequent survival of *R. obtusifolius* seedlings. Negative effects of high Ca and Mg availability, together with low K availability in the soil, on the survival of well established *R. obtusifolius* plants was recorded by Hann et al. (2012) in Austria. A lower density of *R. obtusifolius* plants on Ca and Mg rich soils than on Ca and Mg poor soils was recorded by Humphreys et al. (1999) in Ireland. Bohner (2001) directly classified *R. obtusifolius* as a “calciphobic” species which precipitated excessive Ca into insoluble calcium oxalate crystals. As the enhanced synthesis of oxalic acid in Ca rich soils is highly energy demanding, this can, together with low K supply, increase mortality of *R. obtusifolius* on Ca rich soils. Results of our study fully support the calciphobic classification of the species. Not only are adult plants with well developed root systems calciphobic, but also young seedlings. Negative effects of high Ca and Mg availability on *R. obtusifolius* can already be recorded during germination of seeds and early development of seedlings. In the first days of the experiment we observed the highest emergence in P treatments in both soils. This is in accordance with results by Křišťálová et al. (2011), recording the positive effect of high P availability in the soil on emergence and early growth of *R. obtusifolius* seedlings. A relatively low effect due to P addition on the emergence of seedlings in our study can be explained by P fertiliser application in all pots before the start of the experiment which removed the strong P limitation on early seedlings growth in all treatments.

In contrast to Malín soil, application of Ca increased the survival of *R. obtusifolius* seedlings in Litavka soil. This was due to 1) substantially lower initial

availability of Ca and Mg in this soil, and 2) a substantial decrease in the availability of Zn and Cd and hence their toxicity on seedlings after application of the Ca additive. From the previous incubation experiment with Ca additive (CaO) we learned that there was immediate, long-lasting and highly significant decrease in Cd and Zn availability after application of Ca additive into Litavka soil (Vondráčková et al. 2012). In Malín soil no, or only slight, decrease in Cd and Zn availability was recorded and initial concentrations of Cd and Zn available to plants were about three fold lower than in Litavka soil (0.05 mg kg^{-1} versus 30 mg kg^{-1} for Zn and 0.005 versus 0.8 mg kg^{-1} for Cd extracted by CaCl_2), therefore there was no Cd or Zn toxicity even without any Ca application in Malín soil. In Litavka soil, toxicity of Cd and Zn for *R. obtusifolius* seedlings was indicated also by substantially higher concentrations of both elements in leaves than in Malín soil (Vondráčková, unpublished data). In Litavka soil in all treatments, the concentration of Zn in leaves exceeded the critical limit for Zn toxicity, estimated by Broadley et al. (2007) for wide range of species to be $300 \text{ mg Zn kg}^{-1}$. Although the concentration of Zn was the lower in Ca treatment in comparison to P treatment and the control, the concentration of Zn in leaves was 500 mg kg^{-1} in Ca treatment and this is still far above the limit for Zn toxicity. In addition, toxicity of Zn was clearly visible by the reduction in biomass growth and yellow, brown and reddish colour of leaves (see Fig. 3). All of these symptoms are connected with Zn toxicity resulting in Fe and P deficiency in leaves, as has been described in other studies on other plant species (Sagardoy et al. 2009; Song et al. 2011; Cui and Zhao 2011; Yang et al. 2011).

In addition to Zn toxicity in Litavka soil, Cd and Pb toxicities were probably also highly important, as concentrations of Cd in leaves of *R. obtusifolius* ranged from $5 - 14 \text{ mg kg}^{-1}$ and concentrations of Pb were around 100 mg kg^{-1} . These concentrations were approximately one order higher than in Malín soil (Vondráčková, unpublished data).

Finally we can conclude that *R. obtusifolius* is a “calciphobic” plant and suffers due to high Ca and Mg availability in the soil and therefore is successful on slightly acid rather than on Ca and Mg rich soils. High Ca and Mg availability in the soil negatively affects emergence and survival of seedlings and therefore restricts generative reproduction of the species. High availability of Zn, Cd and Pb in the soil can be efficiently indicated by decreased growth, increased mortality and by conspicuous changes in leaf shape and colour (yellow, brown and reddish rather than

green) of *R. obtusifolius* seedlings. As *R. obtusifolius* is a widely spread weed species with high seed production and generative reproduction, soils with high Zn, Cd and Pb availability can be efficiently indicated by the high mortality, restricted growth and colour changes of *R. obtusifolius* seedlings.

Acknowledgement

The useful comments of two anonymous reviewers are gratefully acknowledged. The completion of the present paper was funded by the projects CIGA 20102019 and NAZV QJ 1210211.

References

- Anonymous (2009) Public notice No. 271/2009, which changed Public notice No. 474/2000 concerning determination requirements of fertilisers. Czech Ministry of Agriculture, Prague (in Czech).
- Bohner A (2001) Physiologie und futterbaulicher Wert des Ampfers. Bericht über das 7. Alpenländische Expertenforum, 22. und 23. März 2001, BAL Gumpenstein, Austria, pp 39-44
- Borůvka L, Huan - Wei CH, Kozák J, Křištofková S (1996) Heavy contamination of soil with cadmium, lead and zinc in the alluvium of the Litavka River. Rostl Výr 42: 543-550
- Brenchley WE (1920) Weeds of farm land. Longmans. Green and co, London
- Broadley MR, White PJ, Hammond JP, Zelko I, Lux A (2007) Zinc in plants. New Phytol 173: 677-702
- Cavers PB, Harper JL (1964) Biological flora of the British Isles, *Rumex obtusifolius* L. and *Rumex crispus* L. J Ecol 52: 737-766
- Cui Y, Zhao N (2011) Oxidative stress and change in plant metabolism of maize (*Zea mays* L.) growing in contaminated soil with elemental sulfur and toxic effect of zinc. Plant Soil Environ 57: 34-39

- Decruyenaere V, Clément C, Agneessens R, Losseau C, Stilmant D (2012) Development of near-infrared spectroscopy calibrations to quantify starch and soluble sugar content in the roots of *Rumex obtusifolius*. *Weed Res.* DOI: 10.1111/j.1365-3180.2011.00895.x
- Dong J, Mao WH, Zhang GP, Wu FB, Cai Y (2007) Root exudation and plant tolerance to cadmium toxicity – a review. *Plant Soil Environ* 53: 193-200
- Hann P, Trska C, Kromp B. (2012) Effects of management intensity and soil chemical properties on *Rumex obtusifolius* in cut grasslands in Lower Austria. *J Pest Sci.* DOI 10.1007/s10340-011-0390-1.
- Hejcman M, Strnad L, Hejcmanová P, Pavlů V (2012) Effects of nutrient availability on performance and mortality of *Rumex obtusifolius* and *R. crispus* in unmanaged grassland. *J Pest Sci.* DOI 10.1007/s10340-012-0414-5.
- Hejcman M, Száková J, Schellberg J, Šrek P, Tlustoš P (2009) The Rengen Grassland Experiment: soil contamination by trace elements after 65 years of Ca, N, P and K fertiliser application. *Nutr Cycl Agroecosyst* 83: 39-50
- Hejcman M, Száková J, Schellberg J, Tlustoš P (2010) The Rengen Grassland Experiment: relationship between soil and biomass chemical properties, the amount of applied elements and their uptake. *Plant Soil* 333: 163-179
- Hejduk S, Doležal P (2004) Nutritive value of broad-leaved dock (*Rumex obtusifolius*) and its effect on the quality of grass silages. *Czech J Anim Sci* 49: 144 – 150
- Hopkins A, Johnson RH (2002) Effect of different manuring and defoliation patterns on broad-leaved dock (*Rumex obtusifolius*) in grassland. *Ann Appl Biol* 140: 255–262
- Hrdličková J, Hejcman M, Křišťálová V, Pavlů V (2011) Production, size and seed germination of broad-leaved dock collected from mother plants grown under different nitrogen, phosphorus, and potassium supplies. *Weed Biology Manage* 11: 190-201

- Humphreys J, Jansen T, Culleton N, Macnaeide FS, Storey T (1999) Soil potassium supply and *Rumex obtusifolius* and *Rumex crispus* abundance in silage and grazed grassland swards. *Weed Res* 39: 1-13
- Křišťálová V, Hejcman M, Červená K, Pavlů V (2011) Effect of nitrogen and phosphorus availability on the emergence, growth and over-wintering of *Rumex crispus* and *Rumex obtusifolius*. *Grass Forage Sci* 66: 361-369
- Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C (2008) Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments - A review. *Waste Manage* 28: 215-225
- Latsch R., Sauter J. 2010. Microwave technology for controlling broad-leaved dock. *Agrarforschung Schweiz* 1: 286-289
- Liu Q, Zheng C, Hu CX, Tan Q, Sun XC, Su JJ (2012) Effects of high concentrations of soil arsenic on the growth of winter wheat (*Triticum aestivum* L) and rape (*Brassica napus*). *Plant Soil Environ* 58: 22-27
- Martínková Z, Hoňek A, Pekár S, Strobach J (2009) Survival of *Rumex obtusifolius* L. in an unmanaged grassland. *Plant Ecol* 205:105-111
- Martínková Z, Honěk A (2004) *Gastrophysa viridula* (Coleoptera: Chrysomelidae) and biocontrol of *Rumex* – a review. *Plant Soil Environ* 50: 1-9
- Pino J, Hagggar RJ, Sans FX, Masalles RM, Sackville Hamilton RN (1995) Clonal growth and fragment regeneration of *Rumex obtusifolius* L. *Weed Res* 35: 141-148
- Puschenreiter M, Horak O, Friesl W, Hartl W (2005) Low-cost agricultural measures to reduce heavy metal transfer into the food chain - A review. *Plant Soil Environ* 51: 1-11
- Sagardoy R, Morales F, López-Millán AF, Abadía A, Abadía J (2009) Effects of zinc toxicity on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants grown in hydroponics. *Plant Biol* 11: 339-350
- Song A, Li P, Li Z, Fan F, Nikolic M, Liang Y (2011) The alleviation of zinc toxicity by silicon is related to zinc transport and antioxidative reactions in rice. *Plant Soil* 344: 319-333

- Strnad L, Hejzman M, Hejzmanová P, Křišťálová V, Pavlů V (2012) Performance and mortality of *Rumex obtusifolius* and *R. crispus* in managed grasslands are affected by nutrient availability. *Folia Geobot.* DOI 10.1007/s12224-012-9122-4.
- Strnad L, Hejzman M, Křišťálová V, Hejzmanová P, Pavlů V (2010) Mechanical weeding of *Rumex obtusifolius* L. under different N, P and K availability in permanent grassland. *Plant Soil Environ* 56: 393-399
- Száková J, Tlustoš P, Goessler W, Frková Z, Najmanová J (2009) Mobility of arsenic and its compounds in soil and soil solution: the effect of soil pretreatment and extraction methods. *J Hazard Mat* 172: 1244-1251
- Šichorová K, Tlustoš P, Száková J, Kořínek K, Balík J (2004) Horizontal and vertical variability of heavy metals in the soil of a polluted area. *Plant Soil Environ* 50: 525-534
- Tsuyuzaki S (2010) Seed survival for three decades under thick tephra. *Seed Sci Res* 20: 201-207
- Tyler G, Olsson T (2001) Plant uptake of major and minor mineral elements as influenced by soil acidity and liming. *Plant Soil* 230: 307-321
- Uprety D, Hejzman M, Száková J, Kunzová E, Tlustoš P (2009) Concentration of trace elements in arable soil after long-term application of organic and inorganic fertilizers. *Nutr Cycl Agroecosyst* 85: 241-252
- Vondráčková S, Hejzman M, Tlustoš P, Száková J (2012) Effect of quick lime and dolomite application on mobility of elements (Cd, Zn, Pb, As, Fe, and Mn) in contaminated soils (v recenzním řízení).
- Wang X, Wu YY (1995) Effect of modification treatments on behaviour of heavy metals in combined polluted soil. *Chin J Appl Ecol* 6: 440-444
- Yang Y, Sun C, Yao Y, Zhang Y, Achal V (2011) Growth and physiological responses of grape (*Vitis vinifera* “Combier”) to excess zinc. *Acta Physiol Plant* 33: 1483-1491

Zaller JG (2004) Ecology and non-chemical control of *Rumex crispus* and *R. obtusifolius* (Polygonaceae): a review. *Weed Res* 44: 414-432

Zaller JG (2006) Sheep grazing vs. cutting: regeneration and soil nutrient exploitation of the grassland weed *Rumex obtusifolius*. *BioControl* 51: 837-850

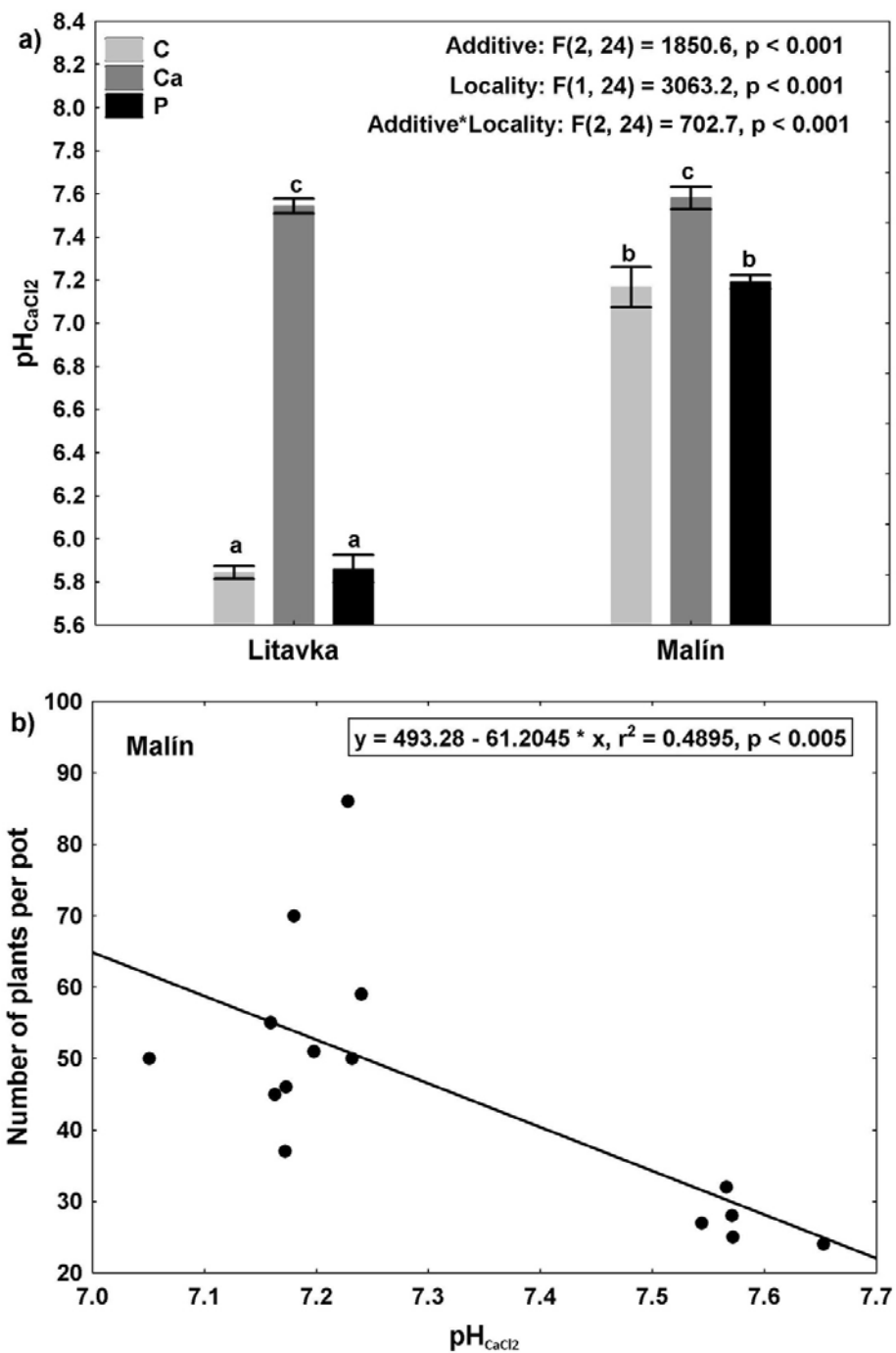


Fig. 1. (a) Effect of additive, locality and additive*locality interaction on soil pH and (b) effect of soil pH on emergence of *Rumex obtusifolius* (maximal recorded number of seedlings during the experiment) in Malín soil. Soil pH higher than 7.5 was recorded only in Ca treatment. Treatment abbreviations: C – control treatment without any additive, Ca – application of Ca additive, P – application of P additive. Error bars represent standard errors of the means (SE). F and P values – results of ANOVA analyses for particular effects (day, additive, day*additive interaction,

locality, additive*locality interaction). Using Tukey post-hoc test, treatments with the same letter were not significantly different at the 0.05 probability value.

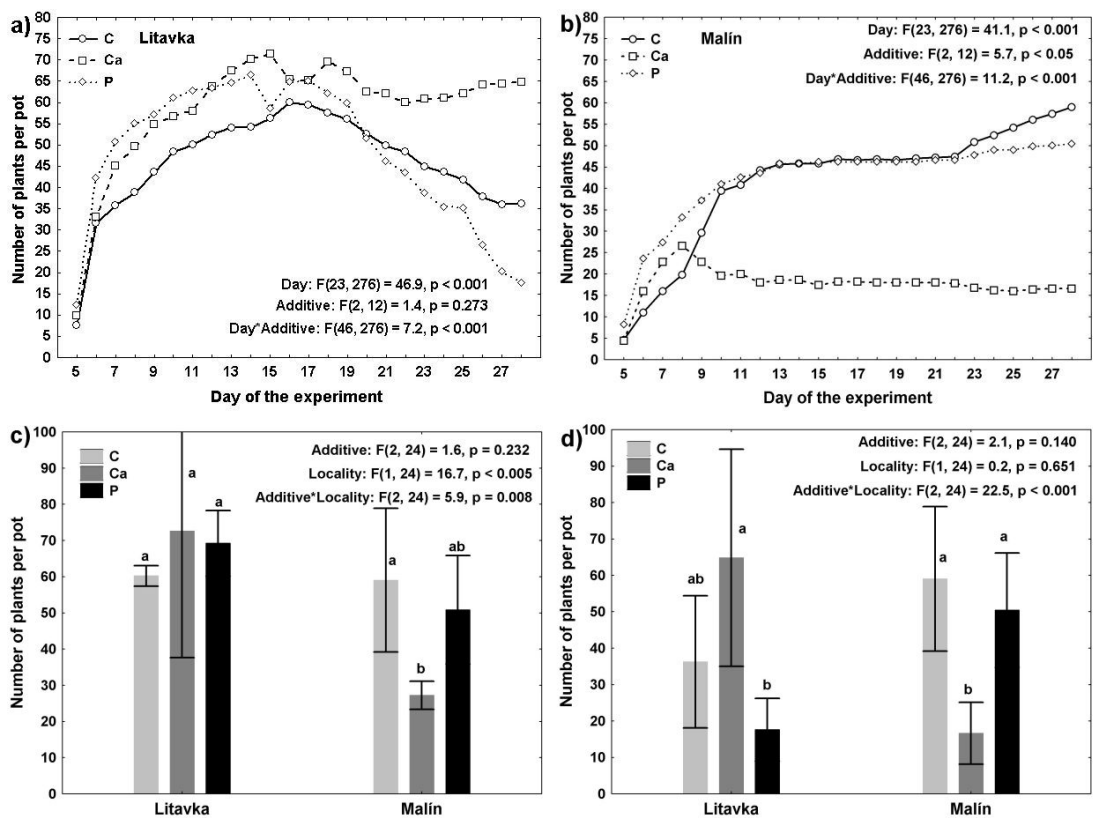


Fig. 2. Effect of additives on number of *Rumex obtusifolius* seedlings during the 28 days of the experiment in (a) Litavka soil and in (b) Malin soil. (c) Field emergence (maximal number of seedlings) recorded over the study period in Litavka and Malin soils and (d) final number of seedlings recorded on the 28th day of the experiment in Litavka and Malin soils. Treatment abbreviations: C – control treatment without any additive, Ca – application of Ca additive, P – application of P additive. Error bars represent standard errors of the means (SE). F and P values – results of ANOVA analyses for particular effects (day, additive, day*additive interaction, locality, additive*locality interaction). Using Tukey post-hoc test, treatments with the same letter were not significantly different at the 0.05 probability value.

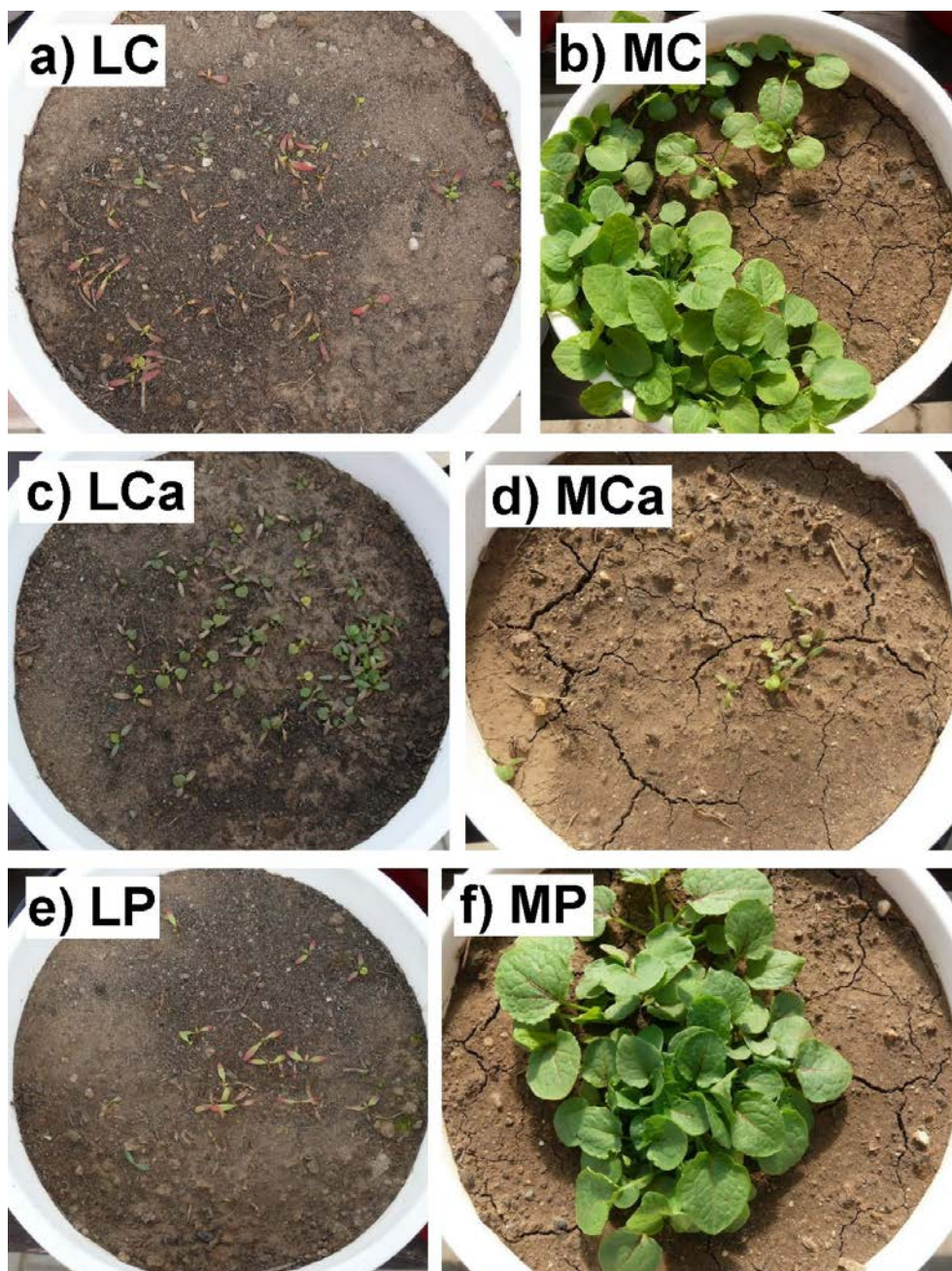


Fig. 3. Photographs of *Rumex obtusifolius* plants in investigated treatments on the 28th day of the experiment. (a) LC – Litavka soil control treatment , (b) MC – Malín soil control treatment, (c) LCa – Litavka soil with CaO additive, (d) MCa – Malín soil with CaO additive, (e) Litavka soil with $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ additive, (f) Malín soil with P additive.

Table 1 Basic characteristics of soil collection sites and chemical properties of investigated soils. Mean values calculated from three replicates ($n = 3$), together with standard deviations (SD), are provided for each measured property. Cation exchange capacity (CEC) was analyzed only in mixed soil samples without any replication.

Soil property	Soil	
	Litavka (49° 43' N, 14° 0' E)	Malín (49° 58' N, 15° 17' E)
Altitude (m a.s.l.)	450	230
Mean annual temperature (°C)	7.3	8.5
Mean annual precipitation (mm)	623	575
Soil texture	Clay loamy sand	Loam
Soil type	Fluvisol	Luvisol
pH _{CaCl2} **	5.8 ± 0.03	7.2 ± 0.04
CEC (mmol kg ⁻¹)	55	346
C _{org} (%)	3.6 ± 0.15	2.7 ± 0.22
Ca ^a (mg kg ⁻¹)**	1856 ± 43	8914 ± 139
Mg ^a (mg kg ⁻¹)**	160 ± 6.5	354 ± 17
K ^a (mg kg ⁻¹)*	192 ± 11	234 ± 5
P ^a (mg kg ⁻¹)**	9 ± 0.4	56 ± 4
Cd _(total) (mg kg ⁻¹)**	53.8±1.5	11.3±0.4
Zn _(total) (mg kg ⁻¹)**	6172 ± 73	1022 ± 31
Pb _(total) (mg kg ⁻¹)**	3305 ± 147	98 ± 53
As _(total) (mg kg ⁻¹)**	354 ± 4	688 ± 45
Fe _(total) (mg kg ⁻¹)**	21193 ± 252	17379 ± 388
Mn _(total) (mg kg ⁻¹)**	2688 ± 28	371 ± 7

^a - plant available concentrations of nutrients determined by Mehlich III extraction procedure and _{total} - total concentrations of elements extracted by *Aqua Regia*. Legislation limits for total concentrations of elements in light-textured and other soils, respectively (in mg kg⁻¹) are: for Cd 0.4 and 1.0, for Zn 130 and 200, for Pb 100 and 140, for As 30 and 30 (Anonymous, 1994). Calculated by one-way ANOVA, differences between localities were not statistically significant (^{n.s.}), were significant on 0.05(^{*}) or were significant on 0.01 (^{**}) probability level.

(publikováno online DOI: 10.1111/j.1365-3180.2012.00914.x)

**3.2 Effect of nitrogen, phosphorus and potassium availability
on mother plant size, seed production and germination ability
of *Rumex crispus***



Effect of nitrogen, phosphorus and potassium availability on mother plant size, seed production and germination ability of *Rumex crispus*

M HEJCMAN*†, V KŘIŠŤÁLOVÁ*, K ČERVENÁ*, J HRDLIČKOVÁ*
& V PAVLŮ*†

*Department of Ecology, Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences, Prague 6 – Suchbát, Czech Republic, and †Crop Research Institute, Prague 6 – Ruzyně, Czech Republic

Received 18 September 2011

Revised version accepted 20 February 2012

Subject Editor: Bert Lotz, WUR, the Netherlands

Summary

Rumex crispus is believed to be a highly nutrient-demanding weedy species that spreads mainly by seeds. However, the effects of nutrient availability on its performance and seed production have never been fully investigated. In this study, we investigated how plant size, seed production and germination were affected by the supply of N, P and K. In May 2008, a pot N, P and K fertiliser experiment was established in Prague (Czech Republic). During 2009, plant growth data were collected, and fully ripe seeds were tested for germination and N, P and K concentrations. *Rumex crispus* showed high phenotypic plasticity in plant height, number of leaves, leaf length and number of stems per plant in relation to N, P and K supply. Seed production per plant ranged from < 2000 in the control and low P treatment

up to almost 25 000 in the high NPK treatment. More than 16 000 seeds were produced per plant in all treatments where N and P were applied together. To produce a high quantity of rapidly germinating seeds, *R. crispus* requires a balanced N, P and K supply, as a deficiency of P and K together with a high N supply can result in the production of P- and K-deficient seeds (P and K < 3 g kg⁻¹) with lower germination ability. In central Europe, at least some populations of *R. crispus* do not flower in the seeding year and are strictly monocarpic. Given the short lifespan and monocarpic character of the species, control is probably most effective if applied at the rosette stage, prior to the production of viable seeds.

Keywords: curled dock, germination, maternal nutrient effect, monocarpic biennial, phenotypic plasticity, plant nutrition.

Hejzman M, Křišťálová V, Červená K, Hrdličková J & Pavlů V (2012). Effect of nitrogen, phosphorus and potassium availability on mother plant size, seed production and germination ability of *Rumex crispus*. *Weed Research*.

Introduction

Rumex crispus L. (curled dock) is native in temperate Europe and today is a widely distributed weed species around the world (Cavers & Harper, 1964; Zaller, 2004). Thus, it is frequently studied in many countries. Using *R. crispus* or curled dock as a keyword in a search in the Web of Science database (<http://apps.isiknowledge.com>) retrieved 546 records (129 with *R. crispus* directly in the

title) from 1945 to November 2011. The majority of these studies were connected with the control of *R. crispus* on agricultural land (Hatcher, 1996; Zaller, 2004; Dimitrova & Marinov-Sarafimov, 2008), the germination ecology of seeds (Cavers & Harper, 1966; Totterdell & Roberts, 1979; Baskin & Baskin, 1985; Pye & Andersson, 2009) and recently its medicinal use (Coruh *et al.*, 2008). *Rumex crispus* is a highly variable species that is particularly abundant in cultivated fields,

Correspondence: M Hejzman, Department of Ecology, Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences, Kamýcká 129, CZ-165 21 Prague 6 – Suchbát, Czech Republic. Tel: (+420) 224 382 129; Fax: (+420) 234 382 868; E-mail: hejzman@fzp.czu.cz

wasteland, demolition sites, riverbanks and along roadsides (Weaver & Cavers, 1979; Grime *et al.*, 1988).

Grime *et al.* (1988) described *R. crispus* as a short-lived perennial or, more rarely, as an annual herb that is able to flower in its seeding year. *Rumex crispus* often dies after flowering and tends to disappear from permanent grassland if new seedlings fail to establish (Bond *et al.*, 2007). Perennation of *R. crispus* can be supported by cutting before flowering, although *R. crispus* is generally much more negatively affected by severe defoliation than *Rumex obtusifolius* L. (broad-leaved dock) (Bentley & Whittaker, 1979; Hongo, 1989). According to Hume and Cavers (1983a), plants of *R. crispus* do not flower in the seeding year in North America, unlike in Britain and the rest of Europe. Nevertheless, in Central Europe (Prague, Czech Republic), no flowering of *R. crispus* was documented in the seeding year under optimal growth conditions (Křišťálová *et al.*, 2011). Likewise, Hongo (1989) recorded no flowering of *R. crispus* in the seeding year in the cold winter region of Hokkaido (Japan). Further research is therefore required to adequately describe the flowering behaviour of *R. crispus*.

Although many related studies have been conducted, the effect of nutrient availability on the phenotypic plasticity of *R. crispus* has rarely been investigated. According to Jursík *et al.* (2008), *R. crispus* is generally believed to be nitrophilous, but it probably has lower nitrogen (N) requirements than *R. obtusifolius*. In a similar manner to *R. obtusifolius* (Humphreys *et al.*, 1999; Hiltbrunner *et al.*, 2008; Strnad *et al.*, 2010), soils rich in phosphorus (P) and potassium (K) are probably more favourable for *R. crispus* growth than P- and K-poor soils, but detailed experimental data are missing. Furthermore, to the best of our knowledge, no study has investigated how the growth, plant longevity and seed production of *R. crispus* are affected by nutrient availability. Such information is only available for the related weedy species *R. obtusifolius* (Hrdličková *et al.*, 2011).

Estimates of seed production and the weight of achenes in *R. crispus* are highly variable, ranging from 100 to over 40 000 achenes per individual plant and from 0.7 to 2 g per 1000 achenes (Cavers & Harper, 1964, 1966). In a study of 11 different *R. crispus* populations, seed production per individual plant ranged from 13 700 to 28 300, and the weight of 1000 achenes without perianths ranged from 1.25 to 1.72 g in ideal garden conditions (Hume & Cavers, 1983b). Bentley *et al.* (1980) recorded 2400 to 3900 seeds produced per individual plant and a 1000 seed weight ranging from 1.45 to 1.9 g. It is well known from grain crops that the nutritional status of the mother plant affects the chemical composition of seeds, particularly the N concentration (Acreche & Slafer, 2009). This

maternal nutrient effect can affect seed germination and the subsequent performance of offspring, as documented for *R. obtusifolius* (Hrdličková *et al.*, 2011), several *Plantago* species (Miao *et al.*, 1991; Latzel *et al.*, 2009), *Chenopodium album* L. (Wulff *et al.*, 1999) and *Pisum sativum* L. (Amjad *et al.*, 2004). However, no study has been performed to investigate the effect of the nutritional status of the mother plant on seed production per individual plant of *R. crispus*, on seed weight, seed chemical properties or germination. The results of such a study would help to identify the optimal N, P and K availability in the soil, enabling maximal growth and seed production of *R. crispus*.

The aim of this study was therefore to answer the following questions: (i) How are the number of leaves per plant, number of leaves per main stem, length of the longest leaf, plant height, number of stems per plant, seed production per plant, seed size and seed weight of *R. crispus* affected by nutrient availability? and (ii) How are the germination and chemical composition of seeds affected by the nutritional status of the mother plant?

Material and methods

Study site and design of the pot experiment

In May 2008, a pot experiment was established in the open-air vegetation-growing hall at the Crop Research Institute in Prague-Ruzyně (Czech Republic, 50°57'7.574"N, 14°18'13.286"E) with ambient rain, temperature and light conditions (Křišťálová *et al.*, 2011). Ten fertiliser treatments were applied: Control, N₁, N₂, P₁, P₂, K₁, N₁P₁, N₁P₁K₁, N₂P₁K₁, N₂P₂K₁, (see Table 1 and Fig. 1 for details). Each treatment was replicated five times (thus 50 pots altogether). The pots were fertilised twice in 2008 and 2009 on 12 May and 20 July each year using the following fertilisers: ammonium nitrate with lime (NH₄NO₃ + CaCO₃, 27.5% N, 10% Ca), super phosphate [Ca(H₂PO₄)₂ + CaSO₄, 8.5% P, 20% Ca, 10% S] and potassium chloride (KCl, 50% K, 47% Cl).

Table 1 List of fertiliser treatments and amount of nutrients applied in one dressing (in kg of N, P and K per ha)

Treatment abbreviation	N (kg ha ⁻¹)	P (kg ha ⁻¹)	K (kg ha ⁻¹)
Controls	–	–	–
N1	150	–	–
N2	300	–	–
P1	–	40	–
P2	–	80	–
K	–	–	100
N1P1	150	40	–
N1P1K	150	40	100
N2P1K	300	40	100
N2P2K	300	80	100

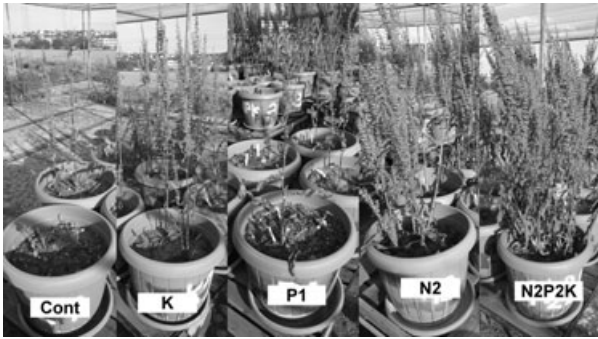


Fig. 1 Photograph of selected fertiliser treatments taken on 14 June 2009. The size of individual *Rumex crispus* plants was greatly affected by fertiliser treatment. Treatment abbreviations are given in Table 1.

The position of individual pots was changed at weekly intervals to avoid any side effects. Pots were watered when necessary to avoid water stress.

The pot volume was 30 L, and the pot surface area was 1963 cm² (pot diameter, 50 cm, see Fig. 1). Clay soil with the following chemical properties was used: N_{total} = 919 mg kg⁻¹, K_{MehlichIII} 160 mg kg⁻¹ (good K availability), P_{MehlichIII} 16 mg kg⁻¹ (low P availability), Mg_{MehlichIII} 373 mg kg⁻¹ (high Mg availability), Ca_{MehlichIII} 10 501 mg kg⁻¹ (very high Ca availability) and pH/CaCl₂ of 7.96. Potassium-rich soil was used to avoid any risk of K limitation on growth, as the emphasis was on N and P nutrition in this study. To ensure that growth was not limited by K, treatments containing K (K, N₁P₁K and N₂P₂K) were included.

At the study site, the mean annual temperature was 8.2°C (ranging from 6.4 to 9.7°C), and the mean annual precipitation was 422 mm (ranging from 255 to 701 mm; Prague-Ruzyně meteorological station, 1955–2007). The mean temperature from June to September 2008 and 2009 (main vegetative season) was 17.6 and 17.9°C and from December 2008 and 2009 to March 2009 and 2010 (winter season), it was 2.4 and 0°C respectively. During the 2008/2009 winter season, the lowest measured temperature (−13.2°C) was recorded on 3 January 2009, and during the 2009/2010 winter season, the lowest temperature (−19.8°C) was recorded on 27 January 2010 (Meteorological station of the Crop Research Institute Prague-Ruzyně; <http://www.vurv.cz/meteo>). Pots were not protected by covering or insulated from frost and were exposed to normal weather conditions during the winter.

Seeds of *R. crispus* were collected during autumn 2007 from a region near Prague city in the central part of the Czech Republic. The collection sites were mainly roadside ditches or abandoned fields. Seed material was collected from a group of plants at three nearby localities. Five plants were randomly selected at each

site, taking care not to favour tall or small plants. Twenty visually undamaged and fully ripened seeds of *R. crispus* were sown into each pot with pre-fertilised soil on 19 May 2008. All but three of the most well-developed plants were removed from each pot on 26 June 2008. The experiment was terminated in April 2010, as no plants survived the 2009/2010 winter season. Mechanical weeding took place throughout the experiment.

Data collection

The effect of nutrient availability on the emergence and early growth of *R. crispus* was studied by Křišťálová *et al.* (2011) in the first vegetative season in 2008. No flowering or formation of stems was recorded in the first vegetative season, and plants terminated the season as rosettes in all treatments. From the beginning of the second vegetative season in 2009, the following data were collected at 2-week intervals: (i) number of leaves per rosette, (ii) number of leaves per main stem, (iii) length of the longest leaf, (iv) height of the plant and (v) number of stems per plant. Fertile stems with fully ripe seeds were harvested 5 cm above ground level on 9 August 2009. All achenes were collected from each stem, dried at room temperature (22°C) and weighed along with the perianth. The weight of 1000 seeds without the perianth was also measured, and the proportion of the weight of the perianth (49% of weight of achenes) was determined, and seed production per individual plant calculated. The length and width of 200 seeds from each treatment were measured using a light microscope equipped with the image analysis software Analysis (Olympus, Tokyo, Japan (<http://www.olympus-global.com>)).

The concentration of total nitrogen in seeds (without perianth) was determined via the Dumas method using the Dumatherm Nitrogen Determination System (<http://www.gerhardt.de>). Phosphorus and potassium concentrations were determined by spectrophotometry and emission flame spectrometry after digestion in sulphuric acid, in an accredited national laboratory. Only one mixed sample of seeds was analysed per treatment owing to insufficient production of seeds in several treatments.

Germination experiment

Following harvest on 9 August 2009 to the start of the germination experiment on 18 June 2010, seeds were stored in stable laboratory conditions (room temperature, 20°C) in paper bags in the dark. Seeds of many *Rumex* populations are dormant when persisting on dry stems (Martinková & Honěk, 2001). Therefore, a long after-ripening period under room conditions that

elapsed between the harvest and the germination experiment was used to remove the dormancy. Only full and entire seeds collected from senescent and almost dry stems were used. The germination test was carried out in a klimabox using 90-mm-diameter Petri dishes containing KA2 filter paper regularly dampened with distilled water to avoid seed desiccation. Light conditions were set to a long-day photoperiod alternating 16 h light and 8 h dark under constant temperature (20°C). Three replicates of 50 seeds were used for each fertiliser treatment. Germination was observed daily for a period of 3 weeks.

Data analysis

All analyses were conducted using STATISTICA 8.0 software (Statsoft, Tulsa, Oklahoma). One-way and repeated measures ANOVA followed by comparison using Tukey's HSD test were conducted to identify significant differences between treatments, time and their interactions. The relationship between seed length and width was evaluated by linear regression analysis.

Results

Plant characteristics

In the first year of the study (2008), only rosettes developed in all treatments. All rosettes survived the 2008/2009 winter season and started to grow again in spring 2009. During the second vegetative season in 2009, the number of stems per plant, number of leaves per rosette, number of leaves per main stem, plant height and length of the longest leaf in the rosette were high in all treatments where N and P were applied together, but low in the control and treatments in which N, P and K were applied separately. The effects of treatment, time and the treatment by time interaction were significant on all measured plant characteristics (Table 2).

The size of rosettes was greatly affected by fertiliser treatment in spring 2009. On 11 April 2009, the mean number of newly arising stems ranged from < 1 in the control to almost five in the N1P1 treatment, and the number of leaves in the rosette ranged from 2 to 22 in the same treatments (Figs 2 and 3A). In almost all treatments, the number of newly arising stems decreased slightly between April and May and was then stable up to the mid-August harvest. Plant regrowth and the formation of new rosettes with growing points and leaves were recorded at the end of August. The number of leaves per rosette was highest on 24 May. Later on, the leaves of the rosettes disappeared as the expanding leaves on the stems shaded the rosettes, the leaves of which subsequently died. The number of leaves on the

Table 2 Results of repeated measures ANOVA of number of stems per plant, number of leaves per rosette, number of leaves per main stem, plant height and length of the longest leaf in the rosette

Tested variable	Treatment	Time	Treatment x time
No. of stems per plant	<i>F</i> 66 <i>P</i> < 0.001	60 < 0.001	3.7 < 0.001
No. of leaves per rosette	<i>F</i> 52 <i>P</i> < 0.001	172 < 0.001	8.2 < 0.001
No. of leaves per main stem	<i>F</i> 25 <i>P</i> < 0.001	132 < 0.001	7.2 < 0.001
Plant height	<i>F</i> 32 <i>P</i> < 0.001	227 < 0.001	6.2 < 0.001
Length of the longest leaf in the rosette	<i>F</i> 42 <i>P</i> < 0.001	140 < 0.001	5.1 < 0.001

Degrees of freedom: nine for treatment, 10 for time and 90 for treatment by time interaction.

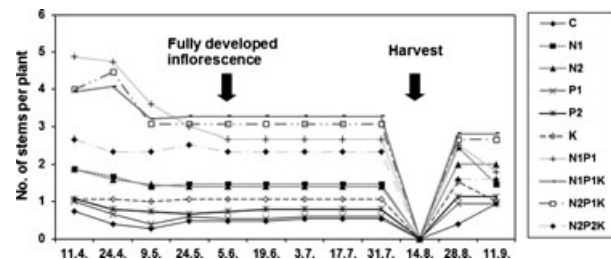


Fig. 2 Effect of fertiliser treatment on mean number of stems per plant. Treatment abbreviations are given in Table 1.

main stem was highest on 19 June and then decreased as the lower leaves died and disappeared (Fig. 3B). On 19 June, the number of leaves per main stem ranged from 2 in the control to 12 in the N1P1K and N2P1K treatments. Plant height rapidly increased between 9 May and 5 June, particularly in the N1P1, N1P1K and N2P1K treatments (Fig. 3C). The period from 9 May to 5 June was the main stem elongation period. On 3 July, plant height ranged from 21 cm in the control, P1 and P2 treatments up to 125 cm in the N1P1, N1P1K and N2P1K treatments. The longest leaves in rosettes were recorded in the period from 9 to 24 May. On 24 May, the length of the longest leaves ranged from 5 cm in the P1 treatment up to 43 cm in the N2P1K treatment. No plants survived the 2009/2010 winter season, and no living plants were recorded in April 2010.

Seed production

The number of seeds per plant was greatly affected by fertiliser treatment and ranged from < 2000 in the control and P1 treatment up to almost 25 000 in the N2P2K treatment (Table 3). More than 16 000 seeds were produced per plant in all treatments in which N and P were applied together.

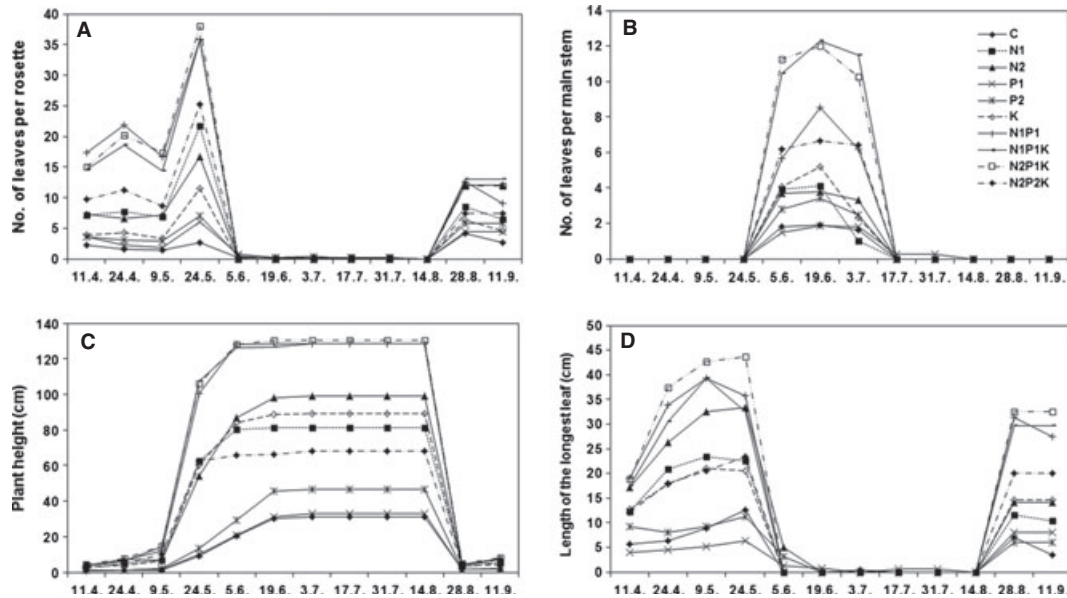


Fig. 3 Effect of fertiliser treatment on (A) number of leaves per rosette, (B) number of leaves per main stem, (C) plant height and (D) length of the longest leaf. Treatment abbreviations are given in Table 1.

Table 3 Mean seed production per individual plant and concentration of N, P and K (in g kg^{-1}) in seeds of *Rumex crispus* from different treatments. Treatment abbreviations are given in Table 1

Treatment abbreviation	Seeds per plant	N	P	K
Controls	1831	19.9	4.0	5.1
N1	11 443	20.7	3.0	2.9
N2	9512	22.0	2.7	2.5
P1	1575	20.9	4.1	5.3
P2	3080	21.2	4.0	5.3
K	2815	18.6	3.6	4.1
N1P1	17 617	19.7	3.7	4.4
N1P1K	16 750	19.7	3.8	4.2
N2P1K	20 982	21.6	3.1	3.2
N2P2K	24 932	21.6	3.5	3.7

Seed chemical composition, weight, length and width

The N concentration in seeds ranged from 18.6 g kg^{-1} in the K treatment up to 22.0 g kg^{-1} in the N2 treatment; the P concentration ranged from 2.7 g kg^{-1} in the N2 treatment up to 4.1 g kg^{-1} in the P1 treatment and the K concentration ranged from 2.5 to 5.3 g kg^{-1} in the P1 and P2 treatments respectively (Table 3). The weight of 1000 seeds was significantly affected by treatment and was $< 1.3 \text{ g}$ in the N1, N2 and N1P1K treatments and above 1.5 g in the control, P2, N2P1K and N2P2K treatments (Fig. 4A). Seed length and width were significantly affected by treatment (Fig. 5A,B). Seeds shorter than 2.1 mm were recorded in the N2 and N1P1K treatments, while seeds longer than 2.2 mm were recorded in the control, P1, P2, N2P1K and N2P2K

treatments. Seed widths lower than 1.45 mm were recorded in the N1, N2, K, N1P1 and N1P1K treatments, and seeds wider than 1.45 mm were recorded in the control, P1, P2, N2P1K and N2P2K treatments respectively. Seed length and width were significantly positively correlated (Fig. 5C).

Seed germination

Seed germination and the time required for the 50% of the seeds to germinate were significantly affected by treatment (Fig. 4B,C). With the exception of the N2 treatment (80% germination) and N1 and N1P1K treatments (95% germination), seed germination was above 95% in all treatments. One hundred per cent seed germination was recorded in the control, P2, K and N2P1K treatments.

With the exception of the N1 and N2 treatments, the time required for the germination of 50% of seeds was approximately 2.6 days. In the N1 and N2 treatments, it was 3.2 and 3.6 days respectively.

Discussion

Plant characteristics

Large differences in plant height and number of stems or leaves can be recorded even in plants of the same origin under different nutrient availability. The phenotypic plasticity of *R. crispus* is high, and plant characteristics such as plant height, number of stems, and number and size of leaves must be interpreted with caution when

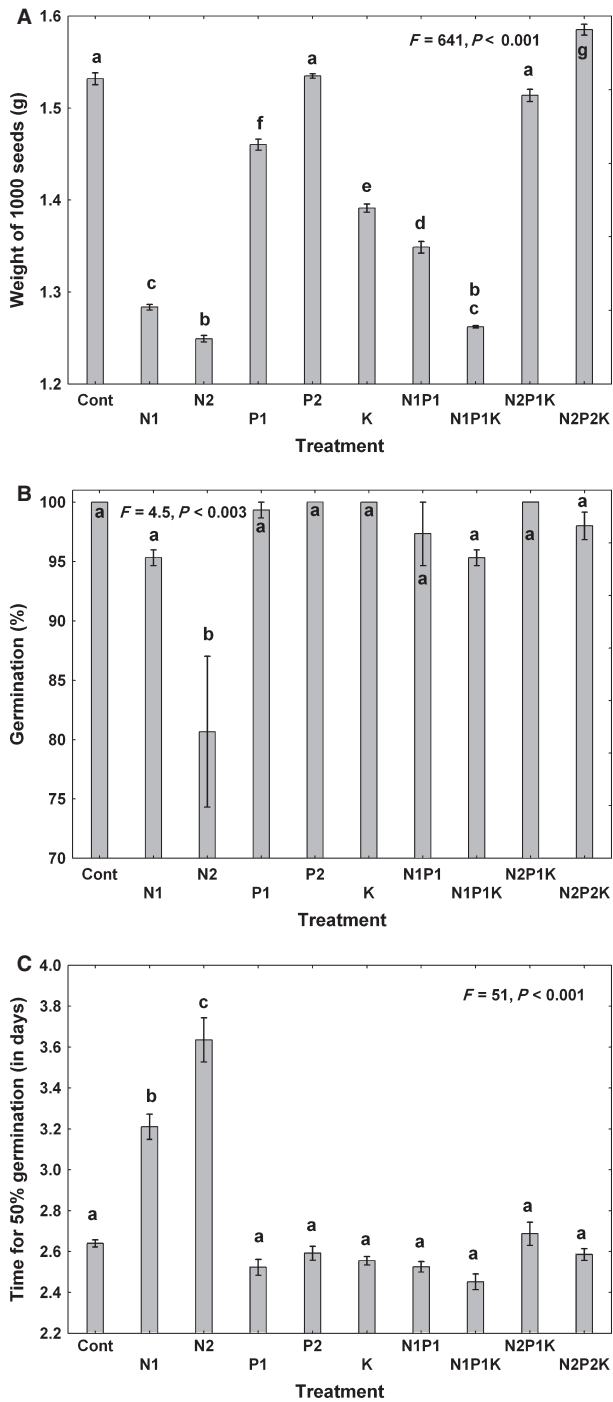


Fig. 4 (A) Weight of 1000 seeds without perianth, (B) germination and (C) time required to achieve 50% germination. Seeds of *Rumex crispus* were collected from individuals planted in different fertiliser treatments. Treatment abbreviations are given in Table 1. Vertical lines represent standard error of the mean (SE), and F and P values were obtained from one-way ANOVA. According to the Tukey's test, treatments with the same letter were not significantly different.

describing different populations, as quantitative characteristics can be markedly affected by nutrient availability. For example, the maximum plant height of *R. crispus* (130 cm) recorded in this study was lower than the

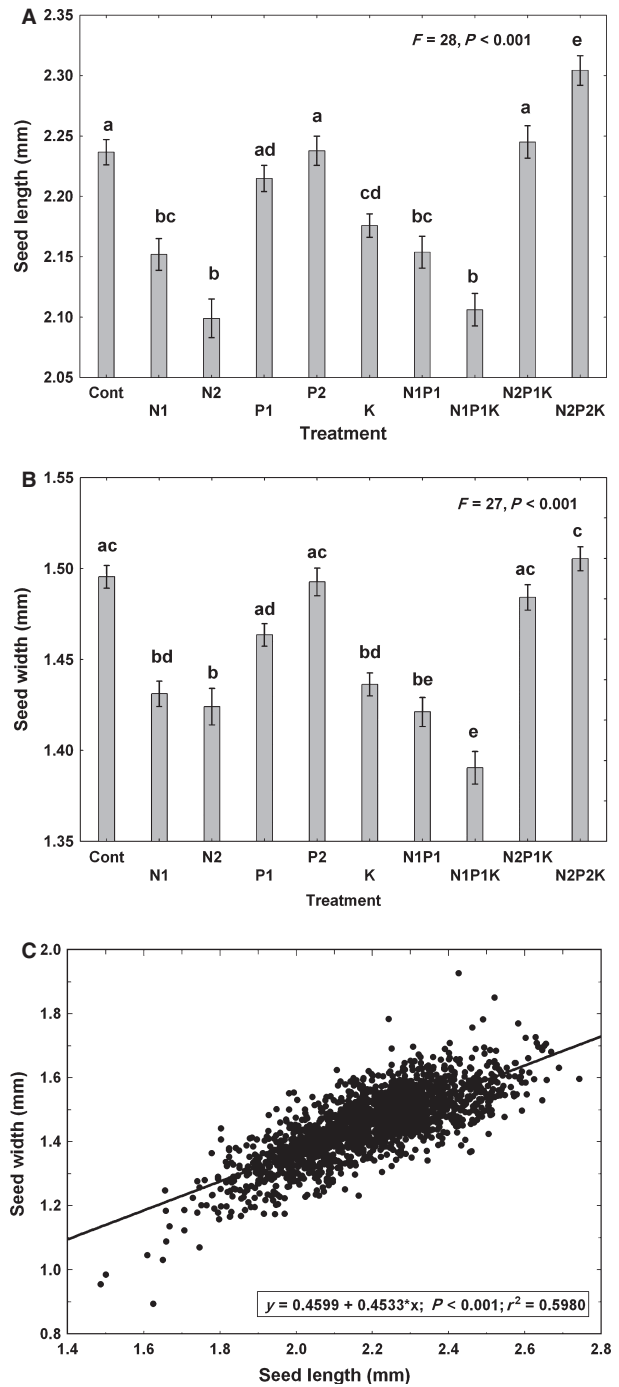


Fig. 5 Effect of fertiliser treatment on (A) seed length (B) seed width and (C) correlation between length and width. Treatment abbreviations are given in Table 1. Vertical lines represent standard error of the mean (SE), and F and P values were obtained from one-way ANOVA. According to Tukey's test, treatments with the same letter were not significantly different.

maximum height (150 cm) given in the flora of Germany (Rothmahler *et al.*, 2000), but higher than the maximum height (100 cm) given in the flora of the Czech Republic (Hejny & Slavik, 1990). It seems that the maximum height of *R. crispus* plants under optimum N, P and K

nutrition and water availability and in the absence of competition from other species is 130 cm.

In our study, *R. crispus* behaved strictly as a biennial monocarpic species, although Grime *et al.* (1988) described *R. crispus* as a short-lived polycarpic perennial. Rosettes developed in the first vegetative season and stems, flowers and fruits in the second season. Although regrowth of plants and the formation of new rosettes were recorded after harvesting dry stems with fully ripe achenes in mid-August 2009, no plants survived the 2009/2010 winter season. We cultivated *R. crispus* plants of the same origin in field conditions under a two-cut management regime, performed in May and August. Cutting before or during flowering enabled some plants to survive for 4 years in permanent grassland (Strnad, 2011). The positive effect of cutting on the survival of *R. crispus* was also reported by Hongo (1989). Therefore, it seems that *R. crispus* can behave as a perennial if cut early, but not if cutting takes place at the ripe seed stage. It is highly likely that at least some populations of *R. crispus* in central Europe are monocarpic, rather than polycarpic.

Seed production

Seed production by *R. crispus* varies, depending on nutrient supply. In comparison with the nutrient-poor control, seed production was increased 14-fold by optimal N, P and K availability. Such a high increase in seed production was attributed to (i) an increase in the number of fertile stems per plant (Fig. 2) and (ii) an increase in the number of seeds per individual stem. The highest number of seeds produced under optimal nutrient and water supply was 24 932 seeds per plant. This was substantially lower than the values of over 40 000 seeds per plant mentioned in a review by Cavers and Harper (1964) and frequently referred by other authors (Zaller, 2004; Bond *et al.*, 2007). It seems that 40 000 seeds per plant may have been an overestimate. For example, Hume and Cavers (1983b) recorded seed production per individual plant of 28 300 seeds under optimal growth conditions in the garden, Stevens (1932) recorded 29 500 under the same growth conditions, and Bentley *et al.* (1980) only 3900 seeds per plant under normal pasture management. Based on our results and their comparison with the results of the other authors, we estimated the maximum seed production per individual plant of *R. crispus* to be 30 000.

Seed chemical composition, weight, length and width

Nutrient availability in the soil and therefore the nutritional status of the mother plant greatly affect the concentrations of N, P and K in the seeds of *R. crispus*.

For example, the concentration of N in seeds was above 2.15% only in treatments with a high N supply (N2). This positive effect of N application on N concentration in seeds is well known from grain crops (Acreche & Slafer, 2009), but has not been reported for *R. crispus* previously. Similarly, P and K concentrations were positively affected by P and K application. The lowest P and K concentrations in seeds were recorded in the N1 and N2 treatments, probably due to the restricted P and K supply and the dilution effect caused by the increased growth of plants owing to the improved N supply. The weight of 1000 seeds, ranging from 1.25 in the N2 to 1.58 g in the N2P2K treatment, was comparable with data published by other authors. According to Cavers and Harper (1964), the normal weight of 1000 seeds ranges from 1 to 2 g; Bentley *et al.* (1980) reported a range of 1.45 to 1.9 g and Hume and Cavers (1983b) a range of 1.25 to 1.72 g. The most interesting result was the high weight of individual seeds in the control, along with the low number of seeds and low weight of seeds in the N1 and N2 treatments, in which low P and K concentrations in the seeds were caused by an insufficient P and K supply. The length and width of seeds were highly positively correlated and reflected the weight of seeds in particular treatments. A high nutrient supply can therefore increase the number of seeds produced per individual plant, but need not increase the weight of individual seeds.

Seed germination

Seed germination may be affected by the nutritional status of the mother plant and therefore by nutrient concentrations in the seeds. Although the germination of *R. crispus* has been investigated previously (Cavers & Harper, 1966; Baskin & Baskin, 1985; Honěk & Martinková, 2001; Pye & Andersson, 2009), no study has investigated the effect of the nutritional status of the mother plant on the germination of its seeds. It seems that P and K concentrations of below 0.3% in seeds negatively affect their total germination and rate of germination and this is in accordance with the results given by Hrdličková *et al.* (2011) for *R. obtusifolius*. Further, this was demonstrated by the lowest rate of germination of seeds from the N2 treatment, which had the lowest P and K concentrations and seed size. Lower rates of germination of small compared to large seeds of *R. crispus* were recorded by Cidecyian and Malloch (1982), but no information was provided about the chemical composition of the seeds. A maternal nutrient effect on the germination of seeds and the performance of offspring was also recorded for several other species, but its connection with the chemical composition of the seeds has rarely been investigated (Miao *et al.*, 1991;

Wulff *et al.*, 1999; Latzel *et al.*, 2009). Some of the viability in seed germination can therefore be determined by the concentration of P and K in the seeds, which in turn is dependent on the nutritional status of the mother plant.

Conclusions

A typical feature of *Rumex crispus* is high phenotypic plasticity in plant height, number of leaves, length of leaves, number of stems and seed production per plant in relation to N, P and K availability in the soil. To produce a large quantity of rapidly germinating seeds, *R. crispus* requires a balanced N, P and K supply. Deficiency of P and K supply to the mother plants, together with a high N supply, can result in the production of P- and K-deficient seeds (P and K < 3 g kg⁻¹) with a lower capacity for germination. In central Europe, at least some populations of *R. crispus* do not flower in the seeding year and are strictly monocarpic. Given the short lifespan and monocarpic character of the species, control is probably most effective at the rosette stage, prior to the production of viable seeds. Without seed production and regeneration through seedlings, *R. crispus* will find it difficult to establish long-term viable populations.

Acknowledgements

Special thanks for help with fieldwork go to Pavel Brázdil, Eva Kunzová and Petr Šrek. Useful comments from two anonymous reviewers are gratefully acknowledged. The completion of the present study was funded by the projects CIGA 20102019, MZE 0002700604 and NAZV QH 72217.

References

- ACRECHE MM & SLAFER GA (2009) Variation of grain nitrogen content in relation with grain yield in old and modern Spanish wheats grown under a wide range of agronomic conditions in a Mediterranean region. *Journal of Agricultural Science* **147**, 657–667.
- AMJAD M, ANJUM MA & AKHTAR N (2004) Influence of phosphorus and potassium supply to the mother plant on seed yield, quality and vigour in pea (*Pisum sativum* L.). *Asian Journal of Plant Sciences* **3**, 108–113.
- BASKIN JM & BASKIN CC (1985) Does seed dormancy play a role in the germination ecology of *Rumex crispus*? *Weed Science* **33**, 340–343.
- BENTLEY S & WHITTAKER JB (1979) Effects of grazing by a chrysomelid beetle *Gastrophysa viridula* on competition between *Rumex obtusifolius* and *Rumex crispus*. *Journal of Ecology* **67**, 79–90.
- BENTLEY S, WHITTAKER JB & MALLOCH AJC (1980) Field experiments on the effects of grazing by a chrysomelid beetle (*Gastrophysa viridula*) on seed production and quality in *Rumex obtusifolius* and *Rumex crispus*. *Journal of Ecology* **68**, 671–674.
- BOND W, DAVIES G & TURNER RJ (2007) *The Biology and Non-Chemical Control of Broad-Leaved Dock (Rumex obtusifolius L.) and Curled Dock (R. crispus L.)*. HDRA, Coventry, UK.
- CAVERS PB & HARPER JL (1964) Biological flora of the British Isles. *Rumex obtusifolius* L. and *R. crispus* L. *Journal of Ecology* **52**, 737–766.
- CAVERS PB & HARPER JL (1966) Germination polymorphism in *Rumex crispus* and *Rumex obtusifolius*. *Journal of Ecology* **54**, 367–382.
- CIDECYAN MA & MALLOCH AJC (1982) Effects of seed size on the germination, growth and competitive ability of *Rumex crispus* and *Rumex obtusifolius*. *Journal of Ecology* **70**, 227–232.
- CORUH I, GORMEZ A, ERCISLI S & SENGUL M (2008) Total phenolic content, antioxidant and antibacterial activity of *Rumex crispus* grown wild in Turkey. *Pharmaceutical Biology* **46**, 634–638.
- DIMITROVA T & MARINOV-SARAFIMOV P (2008) Chemical control of curled dock (*Rumex crispus* L.) and other weeds in noncropped areas. *Pesticidi i fitomedicina (Belgrad)* **23**, 123–126. Available at: http://www.pesting.org.rs/download.php/documents/23-2/23_2_123-126.pdf (last accessed 22 March 2012).
- GRIME JP, HODGSON JG & HUNT R (1988) *Comparative Plant Ecology – a Functional Approach to Common British Species*. Unwin Hyman, London, UK.
- HATCHER PE (1996) The effect of insect–fungus interactions on the autumn growth and over-wintering of *Rumex crispus* and *R. obtusifolius* seedlings. *Journal of Ecology* **84**, 101–109.
- HEJNÝ S & SLAVÍK B (1990) *Květena České Republiky 2 [Flora of the Czech Republic 2]*. Academia, Prague, CZ.
- HILTBRUNNER J, SCHERRER C, STREIT B, JEANNERET P, ZIHLMANN U & TSCHACHTLI R (2008) Long-term weed community dynamics in Swiss organic and integrated farming systems. *Weed Research* **48**, 360–369.
- HONĚK A & MARTINKOVÁ Z (2001) Geographic variation in germinability of *Rumex obtusifolius* and *R. crispus* seeds in Europe. *Biologia-Bratislava* **56**, 103–110.
- HONGO A (1989) Survival and growth of seedlings of *Rumex obtusifolius* L. and *Rumex crispus* L. in newly sown grassland. *Weed Research* **29**, 7–12.
- HRDLÍČKOVÁ J, HEJCMAN M, KRÍŠŤÁLOVÁ V & PAVLŮ V (2011) Production, size and germination of broad-leaved dock seeds collected from mother plants grown under different nitrogen, phosphorus and potassium supplies. *Weed Biology and Management* **11**, 190–201.
- HUME L & CAVERS PB (1983a) Differences in the flowering requirements of widespread populations of *Rumex crispus*. *Canadian Journal of Botany* **61**, 2760–2762.
- HUME L & CAVERS PB (1983b) Resource allocation and reproductive and life-history strategies in widespread populations of *Rumex crispus*. *Canadian Journal of Botany* **61**, 1276–1282.
- HUMPHREYS J, JANSEN T, CULLETON N, MACNAEIDHE FS & STOREY T (1999) Soil potassium supply and *Rumex obtusifolius* and *Rumex crispus* abundance in silage and grazed grassland swards. *Weed Research* **39**, 1–13.

- JURSIK M, HOLEC J & ZATORIOVÁ B (2008) Biology and control of another important weed of the Czech Republic: broad-leaved dock (*Rumex obtusifolius*) and curled dock (*Rumex crispus*). *Listy Cukrovarnické a Řepářské* **124**, 215–219.
- KŘIŠŤÁLOVÁ V, HEJCMAN M, ČERVENÁ K & PAVLŮ V (2011) Effect of nitrogen and phosphorus availability on the emergence, growth and over-wintering of *Rumex crispus* and *R. obtusifolius*. *Grass and Forage Science* **66**, 361–369.
- LATZEL V, HÁJEK T, KLIMEŠOVÁ J & GOMÉZ S (2009) Nutrients and disturbance history in two *Plantago* species: maternal effects as a clue for observed dichotomy between resprouting and seeding strategies. *Oikos* **118**, 1669–1678.
- MARTINKOVÁ Z & HONĚK A (2001) Termination of innate seed dormancy in *Rumex obtusifolius* under field conditions. *Journal of Plant Diseases and Protection* **108**, 284–289.
- MIAO SL, BAZZAZ FA & PRIMACK RB (1991) Persistence of maternal nutrient effects in *Plantago major*: the third generation. *Ecology* **72**, 1634–1642.
- PYE A & ANDERSSON L (2009) Time of emergence of *Rumex crispus* L. as affected by dispersal time, soil cover, and mechanical disturbance. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil and Plant Science* **59**, 500–505.
- ROTHMAHLER W, JAGER EJ & WERNER K (2000) *Exkursionsflora von Deutschland, Bd. 3, Gefäßpflanzen: Atlasband*. Spectrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, Germany.
- STEVENS OA (1932) The number and weight of seeds produced by weeds. *American Journal of Botany* **19**, 784–794.
- STRNAD L (2011) Ecology and Control of Broad-Leaved Dock (*Rumex obtusifolius* L.) and Curled Dock (*Rumex crispus* L.). PhD thesis. Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences, Prague, CZ.
- STRNAD L, HEJCMAN M, KŘIŠŤÁLOVÁ V, HEJCMANOVÁ P & PAVLŮ V (2010) Mechanical weeding of *Rumex obtusifolius* L. under different N, P and K availability in permanent grassland. *Plant Soil Environment* **56**, 393–399.
- TOTTERDELL S & ROBERTS EH (1979) Effects of low temperatures on the loss of innate dormancy and the development of induced dormancy in seeds of *Rumex obtusifolius* L. and *Rumex crispus* L. *Plant Cell Environment* **2**, 131–137.
- WEAVER SE & CAVERS PB (1979) Dynamics of seed populations of *Rumex crispus* and *Rumex obtusifolius* (*Polygonaceae*) in disturbed and undisturbed soil. *Journal of Applied Ecology* **16**, 909–917.
- WULFF RD, CAUSIN HF, BENITEZ O & BACALINI PA (1999) Intraspecific variability and maternal effects in the response to nutrient addition in *Chenopodium album*. *Canadian Journal of Botany* **77**, 1150–1158.
- ZALLER JG (2004) Ecology and non-chemical control of *Rumex crispus* and *R. obtusifolius* (*Polygonaceae*): a review. *Weed Research* **44**, 414–432.

3.3 Effect of nitrogen and phosphorus availability on the emergence, growth and over-wintering of *Rumex crispus* and *Rumex obtusifolius*.

Effect of nitrogen and phosphorus availability on the emergence, growth and over-wintering of *Rumex crispus* and *Rumex obtusifolius*

V. Křišťálová*, M. Hejčman*†, K. Červená* and V. Pavlů*†

*Department of Ecology, Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences, Kamýčká, Prague, Suchdol, and †Crop Research Institute, Drnovká, Prague, Ruzyně, Czech Republic

Abstract

Rumex crispus and *R. obtusifolius* are known to be nitrophilous but it is not known whether either or both species require a high N supply at all developmental stages. Furthermore, it is not clear whether both species require a high P supply, attain flowering in the seeding year, or have similar levels of winter resistance. The effect of nutrient availability on the emergence, growth and over-wintering of both *Rumex* species was investigated in a pot experiment (ten N, P and K fertilizer treatments) in Prague, Czech Republic. In both species, emergence of seedlings was negatively affected by very high N, but positively affected by increased P availability in the soil. No effect of K supply on the emergence, or subsequent growth, was recorded. High flowering in the seeding season and high winter mortality of *R. obtusifolius* contrasted with no flowering and no mortality of *R. crispus*. Over-wintering was not markedly affected by N, P or K supply. Both *Rumex* species are sensitive to a very high N supply in early developmental stages but tend to require a high N supply from the fully developed rosette-stage onwards. In addition to high N requirements during stem growth, flowering and seed ripening, both species also require a high P supply. At least some Central European populations of *R. crispus*, in contrast to *R. obtusifolius*, do not flower in the seeding year. In Central Europe, the frequently reported high field winter mortality of *R. obtusifolius* can be caused by its low frost resistance.

Keywords: curled dock, broad-leaved dock, nutrients, winter mortality, pot experiment, nitrophilous species

Introduction

Rumex crispus L. (curled dock) and *R. obtusifolius* L. (broad-leaved dock) are perennial species native to temperate Europe (Cavers and Harper, 1964) and nowadays are cosmopolitan and are troublesome weeds worldwide, especially on arable land and in temperate grasslands (Jeangros and Nösberger, 1990; Hopkins and Johnson, 2002; Gebhardt *et al.*, 2006; Zaller, 2006; van Evert *et al.*, 2009; Stilmant *et al.*, 2010). For farmers in temperate regions, the fear of infestation of pastures by *R. crispus* and *R. obtusifolius* is one of the major obstacles preventing the switch from conventional to organic farming (Zaller, 2004). Both *Rumex* species are detrimental for livestock production as they decrease forage quality and have adverse animal health effects, causing serious digestive problems if eaten in high quantities (Holm *et al.*, 1977; Hejduk and Doležal, 2004).

Large numbers of viable and germinable seeds, which last in the soil for many years, are produced by both *Rumex* species; up to 60 000 seeds per plant per year have been reported (Cavers and Harper, 1964). In addition to generative reproduction, both *Rumex* species are able to regenerate from fragmented roots. High reproduction and regenerative capacity allows *R. crispus* and *R. obtusifolius* to be highly successful weeds (Honěk and Martinková, 2004; Šilc and Čarni, 2007), and their control without herbicides is extremely difficult (Pino *et al.*, 1998; Hopkins and Johnson, 2002; Strnad *et al.*, 2010).

Although the ecology of both species has received much research attention (Hatcher *et al.*, 1995, 1997a,b; Benvenuti *et al.*, 2001; Honěk and Martinková, 2002), the timing of the first flowering and seed production after the establishment of seedlings still remains unclear. According to Cavers and Harper (1964),

Correspondence to: M. Hejčman, Department of Ecology, Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences, Kamýčká 129, CZ 165 21 Prague 6, Suchdol, Czech Republic.
E-mail: hejčman@fzp.czu.cz

Received 6 September 2010; revised 15 February 2011

flowering and seed set occasionally occur in the seedling year, but usually not until the second year after germination. According to Akeroyd and Briggs (1983), the flowering of *R. crispus* occurs from the second season after seedling establishment, and the same finding was also reported for *R. obtusifolius* (Hongo, 1989b). Unlike in Britain and the rest of Europe, plants of *R. crispus* in most North American populations are reported to require over-wintering before flowering can occur (Hume and Cavers, 1983; Bond *et al.*, 2007).

Germination under natural conditions in Western Europe can occur throughout the growing season, but occurs mostly during spring and autumn because of a loss of dormancy at low temperatures (Roberts and Totterdell, 1981; van Assche and Vanlerberghe, 1989). Seeds of *R. obtusifolius* germinate more slowly than *R. crispus*, but early development of seedlings occurs more quickly in *R. crispus* (Cavers and Harper, 1964, 1979).

Both *Rumex* species are known to be nitrophilous (Novak and Slamka, 2003; Hejduk and Doležal, 2004), although there are doubts as to whether or not both *Rumex* species are nitrophilous in all developmental stages (Zaller, 2004). According to Klimeš (1996), low concentrations of nutrients have a stimulating effect on the germination of *R. obtusifolius*, whereas high concentrations slow down germination and decrease the proportion of germinating seeds. A low concentration of nitrates (0.01 mol L^{-1}) was found to stimulate the germination of *R. obtusifolius*, whereas a high concentration (0.1 mol L^{-1}) reduced its germination (Milberg, 1997). Although the requirement for high nitrogen (N) in mature plants of *R. obtusifolius* is generally known (Jeangros and Nösberger, 1990), little attention has been paid to the nutrient requirements of young plants or to the phosphorus (P) and potassium (K) nutrition of mature plants (Humphreys *et al.*, 1999).

Similarly, the winter resistance of both species has received little research attention up to now. In a study performed in a cool-winter region of Central Europe, winter mortality of *R. obtusifolius* prevailed over summer mortality, and half of the plants died within the first 4 years of the field experiment and only 4% survived more than 8 years under a no-cutting management (Martinkova *et al.*, 2009). In the same region, high mortality of mature *R. obtusifolius* plants on unmanaged semi-natural grassland was recorded (Pavlů *et al.*, 2008a,b). High winter mortality of *R. obtusifolius* and *R. crispus* (approximately 50% mortality in the seedling year) was recorded in the cool winter season in Hokkaido, Japan (Hongo, 1989a). In the grassland experiment by Hongo (1989b) in the same region, 98% of transplanted seedlings of *R. obtusifolius* died in the third and fourth years, whereas the mortality of *R. crispus* was gradual and 17% of transplanted plants

survived for 5 years. Differences in winter resistance may explain the differences in the world distribution of both these species, as *R. crispus*, in contrast to *R. obtusifolius*, can occur in northern and continental regions with severe winter frosts (Cavers and Harper, 1964). Although winter resistance may be a factor contributing to the different world distributions of the two species, differences in winter resistance between *R. crispus* and *R. obtusifolius* have not been investigated experimentally.

The aim of this study was to answer following questions: (i) is there any effect of high N, P and K availability on the emergence of *R. crispus* and *R. obtusifolius*? (ii) How is the performance (in terms of number of leaves, plant height and number of stems) of these two *Rumex* species affected by different N, P and K availabilities? (iii) How is winter survival different between the two species and how is it affected by different N, P and K availabilities?

Materials and methods

Experimental design

In May 2008 and in May 2009, a factorial pot experiment was established in the open-air vegetation hall of the Crop Research Institute in Prague-Ruzyně (Czech Republic, $50^{\circ}5'N$; $14^{\circ}18'E$) with natural rain, temperature and light conditions. The investigated factors were species (two levels: *Rumex crispus* and *R. obtusifolius*) and nutrient availability (ten levels: Control, N₁, N₂, P₁, P₂, K, N₁P₁, N₁P₁K, N₂P₁K, N₂P₂K; see Table 1 for details) providing a total of 20 treatments. Each treatment was replicated five times (thus, 100 pots in total). The pots were fertilized twice per vegetation season, on 12 May and 20 July, using the following fertilizers dissolved in

Table 1 Fertilizer treatments and amount of nutrients applied in one dressing. Numbers given in brackets correspond to the total seasonal amount of applied nutrients (two dressings together).

Treatment abbreviation	N (kg ha ⁻¹)	P(kg ha ⁻¹)	K(kg ha ⁻¹)
Cont	–	–	–
N ₁	150 (300)	–	–
N ₂	300 (600)	–	–
P ₁	–	40 (80)	–
P ₂	–	80 (160)	–
K	–	–	100 (200)
N ₁ P ₁	150 (300)	40 (80)	–
N ₁ P ₁ K	150 (300)	40 (80)	100 (200)
N ₂ P ₁ K	300 (600)	40 (80)	100 (200)
N ₂ P ₂ K	300 (600)	80 (160)	100 (200)

water: ammonium nitrate with lime ($\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CaCO}_3$, 27.5% N, 10% Ca), superphosphate ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{CaSO}_4$, containing 8.5% P, 20% Ca, 10% S) and potassium chloride (KCl, 50% K, 47% Cl). The position of individual pots was changed at weekly intervals to avoid any pseudoreplication and edge effects.

The pot volume was 30 L, and the pot surface area was 1963 cm^2 (pot diameter 50 cm). Clay soil with the following chemical properties was used: $\text{N}_{\text{total}} = 919 \text{ mg kg}^{-1}$, $\text{K}_{\text{MehlichIII}} = 160 \text{ mg kg}^{-1}$ (good K availability) (Madaras and Lipavský, 2009), $\text{P}_{\text{MehlichIII}} = 16 \text{ mg kg}^{-1}$ (low P availability) (Kulhánek *et al.*, 2007), $\text{Mg}_{\text{MehlichIII}} = 373 \text{ mg kg}^{-1}$ (high Mg availability), $\text{Ca}_{\text{MehlichIII}} = 501 \text{ mg kg}^{-1}$ (very high Ca availability) and CaCl_2 pH 7.96. Potassium-rich soil was used to avoid any risk of K limitation on growth, as the emphasis was placed on N and P nutrition in this study. To ensure that growth was not limited by K, treatments with K applications ($\text{K}_1\text{P}_1\text{K}$ and $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}$) were used.

At the study site, the long-term mean annual temperature was 8.2°C (ranging from 6.4 to 9.7°C), and the mean annual precipitation was 422 mm (ranging from 255 to 701 mm; Prague-Ruzyně meteorological station, 1955–2007). The mean temperature from June to September 2008 and 2009 (main vegetation season) was 17.6 and 17.9°C , respectively, and from December to March 2008/2009 and 2009/2010 (winter season), it was 2.4 and 0°C respectively. During the winter season 2008/2009, the lowest measured temperature (-13.2°C) was recorded on 3 January 2009, and during the winter season 2009/2010, the lowest temperature (-19.8°C) was recorded on 27 January 2010.

Seedling emergence

Seeds of *R. obtusifolius* subsp. *obtusifolius* (hereafter referred to as *R. obtusifolius*) and *R. crispus* were collected during autumn 2007 and 2008 from a region near Prague city in central Czech Republic. The collection sites were mainly roadside ditches or abandoned fields. Seed material was collected from a group of plants at three localities. Five plants were selected randomly at each site, taking care not to favour tall or small plants. The seeds were stored at room temperature, in paper bags in the dark. Germination was tested under laboratory conditions in a day/night light regime at 20°C . Germination was performed in four Petri dishes, each with fifty seeds for each species before seeding. Germination was 95% for both species. Twenty visually undamaged and fully ripened seeds of *R. obtusifolius* and *R. crispus* were sown into each pot with pre-fertilized soil on 19 May 2008 and the following year on 18 May 2009. The depth of sowing was 1–2 cm, and the pots were watered if necessary to

maintain optimal moisture conditions for plant growth. The cumulative number of seedlings was recorded up to 26 June, in both 2008 and 2009, and no emergence of other seedlings was recorded after this date.

Plant performance

Three of the most developed plants were left in each pot after 26 June 2008 and 2009. The following data were collected at weekly intervals: (i) number of leaves per plant; (ii) number of leaves per main stem; (iii) length of the longest leaf; (iv) height of the plant; and (v) number of stems per plant.

Over-wintering

The plants were not cut during the vegetation season or in the autumn. The pots were not protected by any covering or insulation from frost, and they were exposed to normal weather conditions during the winter. The number of plants that survived the winter was counted on the 1 April 2009 and 10 April 2010.

Data analysis

All analysis was performed using STATISTICA 8.0 software (Statsoft, Tulsa, OK, USA). Emergence and winter survival data were evaluated by factorial ANOVA for species and treatment effects and their interactions. After obtaining significant results, multiple comparisons using Tukey's HSD test were applied to identify significant differences between treatments for each species. The number of stems per main stem, number of leaves per plant, length of longest leaf, number of stems or growing points and plant height data were evaluated using a mixed ANOVA model for species, treatment and time effects and time and treatment interactions.

As the results from both seasons, 2008/2009 and 2009/2010, were highly comparable, only the data from the first season have been included in the results section, and they are summarized in graphs.

Results

Emergence

When analysed by factorial ANOVA, it was found that emergence was significantly affected by species ($F = 16.9$, $P < 0.001$) and treatment ($F = 19.4$, $P < 0.001$), but not by their interaction ($F = 1.2$, $P = 0.32$). The mean emergence over all levels of nutrient availability was 39% and 49% for *R. obtusifolius* and *R. crispus* respectively. In both species, emergence was lowest in all treatments with N_2 applications (N_2 , $\text{N}_2\text{P}_1\text{K}$ and $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}$), and these treatments were

significantly different from the P₁ and P₂ treatments (Figure 1).

Plant performance

Number of leaves per main stem

The number of leaves per main stem was significantly affected by species ($F = 1064$, $P < 0.001$), treatment ($F = 29$, $P < 0.001$), time ($F = 68$, $P < 0.001$) and all of their interactions. In the case of *R. obtusifolius*, the greatest number of leaves (6.4) was recorded for the N₂P₁K treatment on 1 August. For the N₁P₁, N₁P₁K and N₂P₂K treatments, the greatest number of leaves (from 4.5 to 6) was recorded on 1 August, but for the Control, N₁, N₂, P₂ and K treatments, the greatest number of leaves (from 0.8 to 4.3) was recorded on either 21 or 28 August (Figure 2a). No stems of *R. crispus* developed in any of the fertilizer treatments during the seeding season.

Number of leaves per plant

The number of leaves per plant was significantly affected by species ($F = 25.1$, $P < 0.001$), treatment ($F = 106.4$, $P < 0.001$), time ($F = 63.8$, $P < 0.001$) and all of their interactions. In the first sampling dates (seedlings stage), the number of leaves in both species was greater in P₁ and P₂ than in other treatments (Figure 2c, d). On the other hand, the number of leaves was greatest in all treatments with N applications on the last sampling date. Generally, the greatest number of leaves was recorded in all treatments with N₁P₁ or N₁P₁K applications in the period from 24 July to 21 August. In the case of *R. obtusifolius*, the absolutely greatest number of leaves (20 per plant) was recorded

for the N₂P₁K treatment on 1 August. In the case of *R. crispus*, the absolutely greatest number of leaves (24 per plant) was recorded for the N₁P₁ treatment on the 1 August. The number of leaves was significantly and positively affected by the number of growing points (*Rumex obtusifolius*: $y = 2.0393 + 2.4171x$; $R^2 = 0.703$, $P < 0.001$; *Rumex crispus*: $y = 0.07 + 0.4x$; $R^2 = 0.95$, $P < 0.001$) and by plant height (*Rumex obtusifolius*: $y = 30.6 + 1.6x$; $R^2 = 0.15$, $P = 0.006$; *Rumex crispus*: $y = 2.38 + 0.22x$; $R^2 = 0.79$, $P < 0.001$).

Length of the longest leaf

The length of the longest leaf was significantly affected by species ($F = 15.1$, $P < 0.001$), treatment ($F = 23$, $P < 0.001$), time ($F = 82.9$, $P < 0.001$) and all of their interactions. In the seedling stage, the length of the longest leaf was greatest for the P₂, P₁ and N₁P₁K treatments (Figure 3a, b) in both species. On the other hand, leaves of *R. obtusifolius* were longest for N₂ and N₁ treatments, but the leaves of *R. crispus* were longest for the N₂P₂K, N₁P₁, N₂P₁K and N₁P₁K treatments on the last sampling date. In the case of *R. obtusifolius*, the absolutely longest leaves (33 cm) were recorded on 1 August, but in the case of *R. crispus*, the absolutely longest leaves (34 cm) were recorded for treatment N₂P₂K on 4 September.

Number of stems or growing points

The number of stems or growing points was significantly affected by species ($F = 122$, $P < 0.001$), treatment ($F = 189.5$, $P < 0.001$), time ($F = 162.5$, $P < 0.001$) and all of their interactions. In the seedling stage, the number of growing points was highest for P₂ treatment in both species (Figure 4a, b). On the

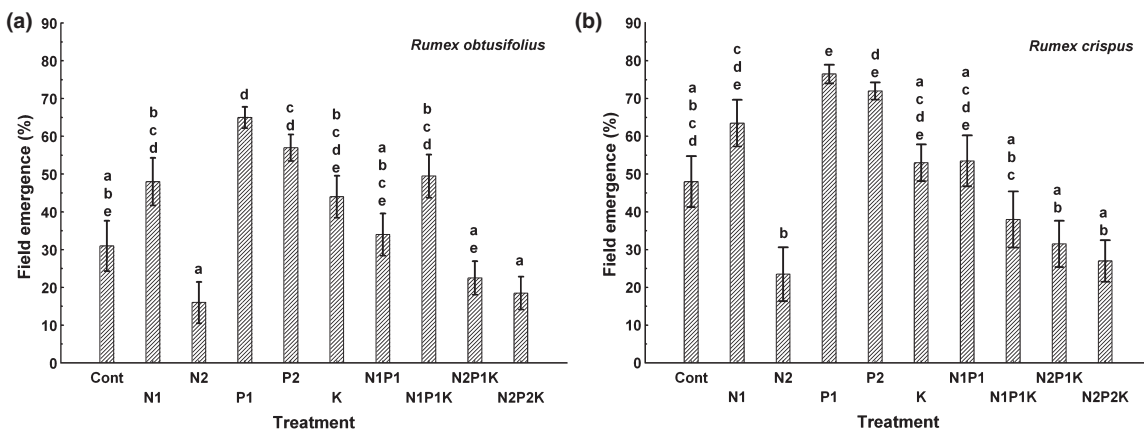


Figure 1 Effect of treatments on the emergence of *Rumex obtusifolius* (a) and *R. crispus* (b). Error bars represent standard errors of the means (SE). Treatment abbreviations are given in Table 1. Using Tukey's post-hoc test, treatments with the same letter were not significantly different at the 0.05 probability value.

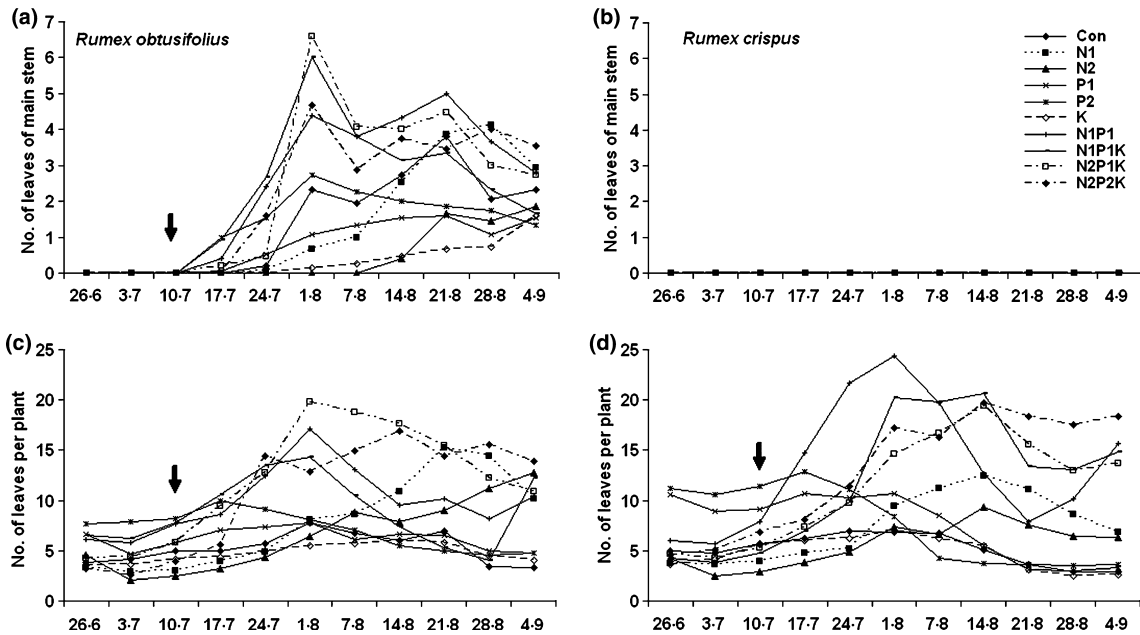


Figure 2 Effect of treatments on the number of leaves on the main stem of *Rumex obtusifolius* (a) and *R. crispus* (b) and the number of leaves on whole plants of *R. obtusifolius* (c) and *R. crispus* (d). Treatment abbreviations are given in Table 1. Arrows indicate the beginning of the stem phase.

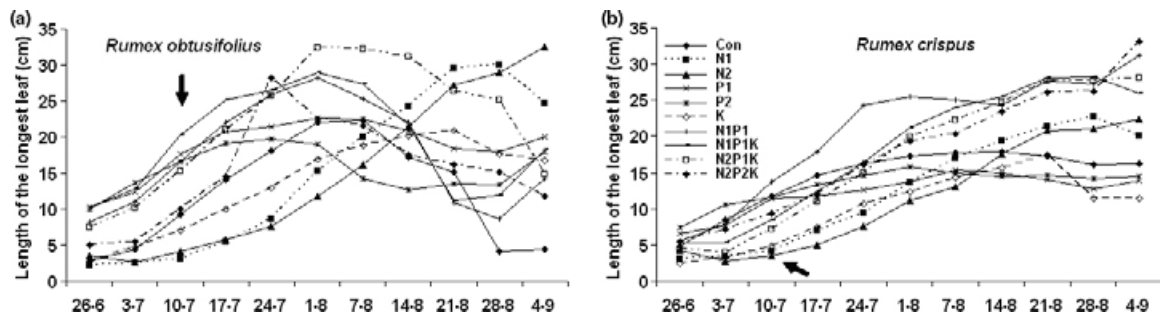


Figure 3 Effect of treatments on the length of leaves of *Rumex obtusifolius* (a) and *R. crispus* (b). Treatment abbreviations are given in Table 1. Arrows indicate the beginning of the stem phase.

other hand, the number of stems of *R. obtusifolius* was greatest for N_2P_1K and N_1P_1K treatments, and the number of growing points of *R. crispus* was greatest for the N_2P_2K and N_1P_1K treatments on the last sampling date. The greatest number of stems (4.9) and growing points (7.5) was recorded on the last sampling date, 4 September.

Plant height

Plant height was significantly affected by species ($F = 197.5$, $P < 0.001$), treatment ($F = 79$, $P < 0.001$), time ($F = 214$, $P < 0.001$) and all of their interactions.

In the seedling stage, the plant height of both species was not affected by treatment (Figure 4c, d). The growing points of both species started to become prolonged first in P_1 and P_2 treatments on 10 July, as the plant height was the highest of all treatments on this date. In both species, the highest plants were recorded for the N_1P_1 , N_2P_1K , N_1P_1K and N_2P_2K treatments on the final sampling date, 4 September. In the case of *R. obtusifolius*, the highest plants (66 cm) were recorded for N_1P_1 treatment on 4 September, and in the case of *R. crispus*, the highest plants (67 cm) were recorded for treatment N_2P_2K on the same sampling date.

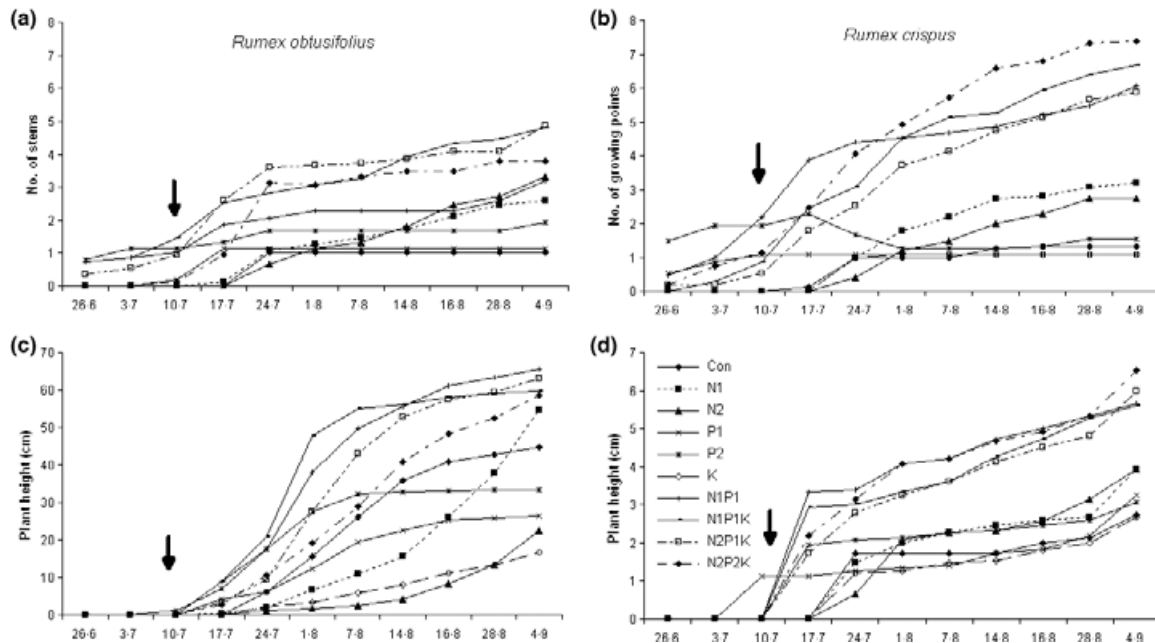


Figure 4 Effect of treatments on the number of stems of *Rumex obtusifolius* (a) on the number of growing points of *R. crispus* (b) and on the height of *R. obtusifolius* (c) and *R. crispus* (d). Treatment abbreviations are given in Table 1. Arrows indicate the beginning of the stem phase.

Over-wintering

Winter survival was significantly affected by species ($F = 1.009$, $P < 0.001$), treatment ($F = 5$, $P < 0.001$) and species and treatment interaction. Winter survival over all levels of nutrient availability was 18 and 100% for *R. obtusifolius* and *R. crispus* respectively (Figure 5a, b). Survival of *R. obtusifolius* was zero in the K treatment and was more than 30% in the N_1P_1 and N_2P_1K treatments. No mortality was recorded for *R. crispus*.

Discussion

Emergence

Emergence was negatively affected by very high N availability in both species, as the lowest rate of emergence was recorded in all the treatments with N_2 applications. However, it should be noted that emergence was only evaluated after the first application of nutrients ($N_2 = 300 \text{ kg N ha}^{-1}$). This was attributed to a negative effect of high NH_4^+ and/or NO_3^- concentrations in the soil solution on seed germination. On the other hand, applications of lower N rates ($N_1 = 150 \text{ kg N ha}^{-1}$) slightly stimulated germination. Negative effects of high NO_3^- concentrations on the germination of *R. obtusifolius*, and stimulating effects of low concentrations, were also recorded by Milberg

(1997) and Klimeš (1996). Similarly, Mandák and Pyšek (2001) reported a negative effect of a high NO_3^- concentration on the germination of *Atriplex* species. No germination, in either *Rumex* species, was recorded in an experiment with NH_4NO_3 fertilizer applications in contrast to normal germination in an experiment with $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ fertilizer applications in a laboratory germination performed by Křišťalová (2010). On the other hand, there was a clear positive effect of P_1 and P_2 treatments on the emergence of both species. This is consistent with the conclusion by Jenkins and Ali (1999) that P is an essential nutrient which is especially important in the promotion of early plant growth. Emergence was not affected by K applications because the clay soil was able to supply the seedlings with an adequate amount of K even without K application. The same results, i.e. a negative effect of a very high N supply and a positive effect of P supply on the emergence of both species, were also recorded in the second experimental year (data not shown here).

Although both species are generally believed to be nitrophilous (Milberg, 1997; Zaller, 2004), they suffer from the effects of very high N availability during seed germination and seedling emergence, in contrast to mature plants. The negative effect of a very high N application rate on the seedling emergence of both *Rumex* species seems to be a possible practical measure that might be used for decreasing *Rumex* seedling

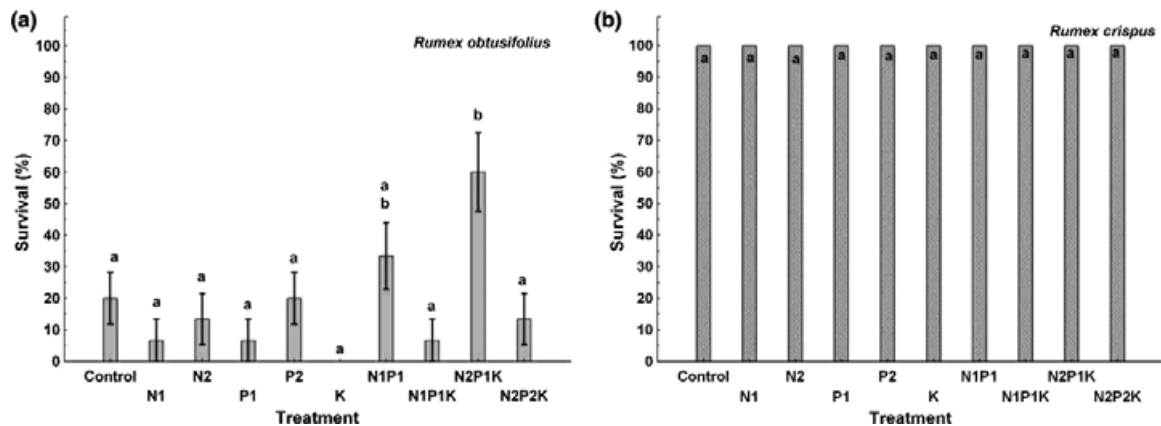


Figure 5 Effect of treatments on the over-wintering of *Rumex obtusifolius* (a) and *R. crispus* (b). Error bars represent standard errors of the means (SE). Treatment abbreviations are given in Table 1. Using Tukey's post-hoc test, treatments with the same letter were not significantly different at the 0.05 probability value.

emergence in locally disturbed patches after the removal of established *Rumex* plants in permanent grasslands, but this requires further investigation.

Plant performance

Three distinct life phases were recognized in the lifespan of *R. obtusifolius*: (i) a phase of germination and seedling emergence, (ii) a phase of rosettes and (iii) a phase of stem growth, flowering and seed ripening. Different effects of fertilizer treatments were recorded in each phase of plant growth. The germination, emergence and stabilization of seedlings took 3 weeks. Rosette growth was recorded from 19 May until 10 July, during which the supply of P appeared to play the main role. Seedlings of both species developed fastest in P₁ and P₂ in all treatments and had the greatest number of leaves during this phase. A further negative effect of a very high N supply on both species was recorded, as leaf growth during the rosette phase was depressed in all treatments with a N₂ supply (Figure 2). This clearly demonstrates a high P demand of *Rumex* plants in early development, but lower adaptation to a very high N supply.

The maturation, flowering and seeding period was recorded from 19 May until 4 September. Nitrogen, applied together with K and P, strongly increased plant performance (plant height, number of stems, number of leaves and length of the longest leaf) during the phase of stem growth, flowering and seed ripening. A delay of plant development was recorded for N₁ and N₂ treatments, probably due to P limitation in these treatments as the plants may have required time to increase their root systems to be sufficiently well developed to acquire enough P from the scarce amount in the soil. This

indicates that a plant-available concentration of Mehlich III P of 16 mg kg⁻¹ was not sufficient for the optimal growth of both species. In addition to P limitation in the N treatments, high N availability prolonged the vegetation season and seed ripening, and this effect of high N supply is in accordance with the results of Vos and Biemond (1992).

Although *R. obtusifolius* was recognized by Humphreys *et al.* (1999) as being highly K demanding, no response to K application was recorded in our study as no obvious differences in plant performance were recorded between N₁P₁ and N₁P₁K treatments. This indicates the ability of the clay soil that was used to supply an adequate amount of K for the growth of both species, even without K application. Evidently, a plant-available (Mehlich III) K concentration of 160 mg kg⁻¹ was sufficient for the growth of both species. The results of our pot experiment are consistent with the conclusions by Kayser and Isselstein (2005) that K limitation in grassland is less likely on clay soils.

Stem production and the flowering of *R. obtusifolius* were recorded in the year of seeding, but there was no stem elongation or flowering of *R. crispus* in the year of seeding. The same result was recorded with genetically similar plants in the pot experiments on sandy soil as well as under field conditions on several soil types at different altitudes and in different years (Křiššálová, 2010). It seems that *R. crispus* requires a cold period and a sufficient amount of carbohydrates to induce stem growth and flowering. According to Cavers and Harper (1964), flowering and seed set can occasionally occur in the year of seeding, but not usually until the second year after germination. According to Hume and Cavers (1983) and Bond *et al.* (2007), plants of *R. crispus* in most North American populations require over-winter-

ing before flowering can occur, unlike in the populations in Britain and the rest of Europe. The results of this study indicate that, at least in some populations of *R. crispus* in the Czech Republic, no flowering can occur in the year of seeding under all levels of nutrient availability. On the other hand, *R. obtusifolius* can flower in the year of seeding.

Over-wintering

According to Cavers and Harper (1964), both *R. crispus* and *R. obtusifolius* have a tendency to be monocarpic and to die after producing seeds. Monocarpic behaviour was supported by almost no over-wintering of *R. obtusifolius* after flowering in this study, but high over-wintering of the same genotype of *R. obtusifolius* was recorded in our field experiments in the same and other winter seasons (Křišťalová, 2010). Furthermore, there was no difference in over-wintering between sterile and fertile plants. It seems that the main reason for low over-wintering in the pot experiments was the low resistance of mature plants of *R. obtusifolius* to frost, as pots were exposed to winter conditions without any protection. On the other hand, *R. crispus* possessed substantially higher cold resistance as no winter mortality was recorded. Similar results were recorded after the next winter season (2009–2010) which had heavy and long-term frosts: 100% mortality of *R. obtusifolius* in contrast to no mortality of *R. crispus* in the pot experiments on clay and sandy soils (Křišťalová, 2010). The low frost resistance of *R. obtusifolius* probably explains why a high winter mortality of adult *R. obtusifolius* plants was recorded in field experiments by Hongo (1989a,b), Martinkova *et al.* (2009) and Pavlů *et al.* (2008a). Furthermore, the high mortality of *R. obtusifolius* after severe winters was recorded by many farmers in the Czech Republic. The substantially higher frost resistance in *R. crispus* than in *R. obtusifolius* revealed in this study may explain why *R. crispus* is common in regions with a continental climate and heavy winter frosts, whereas *R. obtusifolius* is more common in oceanic regions with less severe winters. In addition, *R. crispus*, in contrast to *R. obtusifolius*, is able to grow up to latitudes of 69°N and 65°N in Europe and North America respectively (Cavers and Harper, 1964). The over-wintering of *R. obtusifolius* was only marginally affected by N, P and K availability, and the over-wintering of *R. crispus* was not affected.

Conclusions

Seedling emergence of both *R. crispus* and *R. obtusifolius* was negatively affected by very high N availability but positively affected by increased P availability in the soil. Similarly, the seedlings were negatively affected by a

very high N supply and developed fastest and had the greatest number of leaves in P treatments during the rosette phase. Both of these *Rumex* species are therefore sensitive to a very high N supply in early developmental stages, and they tend to tolerate a very high N supply from the phase of fully developed rosettes. In addition to high N requirements during the phase of stem growth, flowering and seed ripening, both species also require a high P supply. Similarly to most North American populations, at least some Central European populations of *R. crispus* do not flower in the seeding year, in contrast to *R. obtusifolius*. The high winter mortality of *R. obtusifolius* contrasted markedly with the absence of winter mortality in *R. crispus*, indicating that *R. crispus* possesses higher frost resistance. Over-wintering was only marginally affected by N, P and K availability.

Acknowledgments

Special thanks for help with field work go to Pavel Brázdil, Eva Kunzová and Petr Šrek. Useful comments of two anonymous reviewers are gratefully acknowledged. The completion of the present paper was funded by the projects MZE 0002700604 and NAZV 72217.

References

- AKERROYD J.R. and BRIGGS D. (1983) Genecological studies of *Rumex crispus* L. I. Garden experiment using transplanted material. *New Phytologist*, **94**, 309–323.
- VAN ASSCHE J.A. and VANLERBERGHE K.A. (1989) The role of temperature on the dormancy cycle of seeds of *Rumex obtusifolius* L. *Functional Ecology*, **3**, 107–115.
- BENVENUTI S., MACCHIA M. and MIELE S. (2001) Light, temperature and burial depth effects on *Rumex obtusifolius* seed germination and emergence. *Weed Research*, **41**, 177–186.
- BOND W., DAVIES G. and TURNER R.J. (2007) *The biology and non-chemical control of broad-leaved dock (Rumex obtusifolius L.) and curled dock (R. crispus L.)*. Coventry, UK: HDRA.
- CAVERS P.B. and HARPER J.L. (1964) Biological flora of the British Isles. *Rumex obtusifolius* L. and *R. crispus* L. *Journal of Ecology*, **52**, 737–766.
- CAVERS P.B. and HARPER J.L. (1979) Dynamics of seed populations of *Rumex crispus* and *Rumex obtusifolius* (*Polygonaceae*) in disturbed and undisturbed soil. *Journal of Applied Ecology*, **16**, 909–917.
- VAN EVERT F.K., POLDER G., VAN DER HEIJDEN G.W.A.M., KEMPENAAR C. and LOTZ L.A.P. (2009) Real-time vision-based detection of *Rumex obtusifolius* in grassland. *Weed Research*, **49**, 164–174.
- GEBHARDT S., SCHELLBERG J., LOCK R. and KÜHBAUCH W. (2006) Identification of broad-leaved dock (*Rumex obtusifolius* L.) on grassland by means of digital image processing. *Precision Agriculture*, **7**, 165–178.

- HATCHER P.E., AYRES P.G. and PAUL N.D. (1995) The effect of nitrogen fertilization and rust fungus infection, singly and combined, on the leaf chemical composition of *Rumex obtusifolius*. *Functional Ecology*, **11**, 545–553.
- HATCHER P.E., PAUL N.D., AYRES P.G. and WHITTAKER J.B. (1997a) Added soil nitrogen does not allow *Rumex obtusifolius* to escape the effects of insect-fungus interactions. *Journal of Applied Ecology*, **34**, 88–100.
- HATCHER P.E., PAUL N.D., AYRES P.G. and WHITTAKER J.B. (1997b) Nitrogen fertilization affects interactions between the components of an insect-fungus-plant tripartite system. *Functional Ecology*, **11**, 537–544.
- HEJDUK S. and DOLEŽAL P. (2004) Nutritive value of broad-leaved dock (*Rumex obtusifolius* L.) and its effect on the quality of grass silages. *Czech Journal of Animal Science*, **49**, 144–150.
- HOLM L., PLUCKNETT D.L., PANCHO J.V. and HERBERGER J.P. (1977) *The worlds worst weeds: distribution and biology*. HI, USA: University Press of Hawaii.
- HONĚK A. and MARTINKOVÁ Z. (2002) Effects of individual plant phenology on dormancy of *Rumex obtusifolius* seeds at dispersal. *Weed Research*, **42**, 148–155.
- HONĚK A. and MARTINKOVÁ Z. (2004) *Gastrophysa viridula* (Coleoptera: Chrysomelidae) and biocontrol of *Rumex* – a review. *Plant Soil Environment*, **50**, 1–9.
- HONGO A. (1989a) Survival and growth of seedlings of *Rumex obtusifolius* L. and *Rumex crispus* L. in newly sown grassland. *Weed Research*, **29**, 7–12.
- HONGO A. (1989b) Transplant survival of *Rumex obtusifolius* L. and *Rumex crispus* L. in three old reseeded grasslands. *Weed Research*, **29**, 13–19.
- HOPKINS A. and JOHNSON R.H. (2002) Effect of different manuring and defoliation patterns on broad-leaved dock (*Rumex obtusifolius*) in grassland. *Annals of Applied Biology*, **140**, 255–262.
- HUME L. and CAVERS P.B. (1983) Differences in the flowering requirements of widespread populations of *Rumex crispus*. *Canadian Journal of Botany*, **61**, 2760–2762.
- HUMPHREYS J., JANSEN T., CULLETON N., MACNAEIDHE F.S. and STOREY T. (1999) Soil potassium supply and *Rumex obtusifolius* and *Rumex crispus* abundance in silage and grazed grassland swards. *Weed Research*, **39**, 1–13.
- JEANGROS B. and NÖSBERGER J. (1990) Effects of an established sward of *Lolium perenne* L. on the growth and development of *Rumex obtusifolius* L. seedlings. *Grass and Forage Science*, **45**, 1–7.
- JENKINS P.D. and ALI H. (1999) Growth of potato cultivars in response to application of phosphate fertilizer. *Annals of Applied Biology*, **135**, 431–438.
- KAYSER M. and ISSELSTEIN J. (2005) Potassium cycling and losses in grassland systems: a review. *Grass and Forage Science*, **60**, 213–224.
- KLIMEŠ L. (1996) Population ecology of *Rumex obtusifolius*. In: Prach K., Jeník J. and Large A.R.G. (eds) *Floodplain ecology and management*, pp. 155–179. Amsterdam, NL: SPB Academic Publishing.
- KŘIŠŤALOVÁ V. (2010) *Ecology of broad-leaved dock (Rumex obtusifolius L.) and curled dock (Rumex crispus L.)*. Ph.D Thesis. Faculty of Environmental Sciences, Prague, CZ: Czech University of Life Sciences.
- KULHÁNEK M., BALÍK J., ČERNÝ J., NEDVĚD V. and KOTKOVÁ B. (2007) The influence of different intensities of phosphorus fertilizing on available phosphorus contents in soils and uptake by plants. *Plant, Soil and Environment*, **53**, 382–387.
- MADARAS M. and LIPAVSKÝ J. (2009) Interannual dynamics of available potassium in a long-term fertilization experiment. *Plant, Soil and Environment*, **55**, 334–343.
- MANDÁK B. and PYŠEK P. (2001) The effect of light duality, nitrogen concentration and presence of bracteoles on germination of different fruit types in the heterocarpous *Atriplex sagittata*. *Journal of Ecology*, **89**, 149–158.
- MARTINKOVÁ Z., HONĚK A. and PEKAR S. (2009) Survival of *Rumex obtusifolius* L. in unmanaged grassland. *Plant Ecology*, **205**, 105–111.
- MILBERG P. (1997) Weed seed germination after short-term light exposure: germination rate, photon influence response and interaction with nitrate. *Weed Research*, **37**, 157–164.
- NOVAK J. and SLAMKA P. (2003) Degradation of seminatural pastures by local overmanuring with cattle or sheep excreta. *Ekologia (Bratislava)*, **22**, 143–151.
- PAVLŮ L., PAVLŮ V., GAISLER J. and HEJCMAN M. (2008a) Effect of cessation of grazing management on dynamics of grassland weedy species. *Journal of Plant Diseases and Protection*, **21**, 581–586.
- PAVLŮ V., GAISLER J., HEJCMAN M. and PAVLŮ L. (2008b) Effect of different grazing intensity on weed control under conditions of organic farming. *Journal of Plant Diseases and Protection*, **21**, 441–446.
- PINO J., SANS F.X. and MASALLES R.M. (1998) Population dynamics of *Rumex obtusifolius* under contrasting lucerne cropping systems. *Weed Research*, **38**, 25–33.
- ROBERTS E.H. and TOTTERDELL S. (1981) Seed dormancy in *Rumex* species in response to environmental factors: review article. *Plant Cell and Environment*, **4**, 97–106.
- ŠILC U. and ČARNI A. (2007) Formalized classification of the weed vegetation of arable land in Slovenia. *Preslia*, **79**, 283–302.
- STILMANT D., BODSON B., VRANCKEN C. and LOSSEAU C. (2010) Impact of cutting frequency on the vigour of *Rumex obtusifolius*. *Grass and Forage Science*, **65**, 147–153.
- STRNAD L., HEJCMAN M., KŘIŠŤALOVÁ V., HEJCMANOVÁ P. and PAVLŮ V. (2010) Mechanical weeding of *Rumex obtusifolius* L. under different N, P and K availability in permanent grassland. *Plant, Soil and Environment*, **56**, 393–399.
- VOS J. and BIEMOND H. (1992) Effects of nitrogen on the development and growth of the potato plant. 1. Leaf appearance, expansion growth, life span of leaves and stem branching. *Annals of Botany*, **70**, 27–35.
- ZALLER J.G. (2004) Ecology and non-chemical control of *Rumex crispus* and *R. obtusifolius* (Polygonaceae): a review. *Weed Research*, **44**, 414–432.
- ZALLER J.G. (2006) Sheep grazing vs. cutting: regeneration and soil nutrient exploitation of the grassland weed *Rumex obtusifolius*. *BioControl*, **51**, 837–850.

4. Závěr

Výsledky pokusů v této práci ukázaly, že oba druhy ve svém životě prochází několika výraznými vývojovými fázemi. Rozdíly v nárocích na minerální výživu jsou patrné zejména mezi vzcházením a růstem obou druhů. Nejdůležitější zjištění bylo, že druhy *Rumex obtusifolius* a *Rumex crispus* nejsou nitrofilní v raných fázích růstu, až do fáze plně vytvořené listové růžice. Názor, že *R. obtusifolius* hůře snáší zásadité půdy a je tedy kalcifobní, byl našim pokusem potvrzen. Vzcházení a růst rostlin bylo negativně ovlivněno vyšší dostupností Ca. Rostliny v těchto podmínkách měly také větší mortalitu. U *R. obtusifolius* byla zaznamenána toxicita rizikových prvků (především Zn), rostliny v silně kontaminované půdě sice přežívaly, avšak měly omezený růst, změněnou barvu a tvar listů. Semenáčky druhu *R. obtusifolius* tak mohou sloužit jako indikátory kontaminovaných půd při polním mapování vegetace.

Do budoucna doporučuji zaměřit se více na poznání ekologické tolerance obou druhů k půdnímu pH a rizikovým prvkům v půdě. Je možné začít uvažovat o vhodnosti druhů *Rumex* v souvislosti s fytoindikací kontaminovaných půd.

Výsledky této práce rozšířily poznání ekologických nároků obou druhů *R. obtusifolius* a *R. crispus*.

5. Seznam použité literatury

- Aichele D., Golte-Bechtle M., 2007: Co tu kvete? Kvetoucí rostliny střední Evropy ve volné přírodě. Euromedia Group, k. s. – Knižní klub, Praha, 432 str.
- Akeroyd J. R., Briggs D., 1983: Genecological studie of *Rumex crispus* L. I: Garden experiment using transplanted material. *New Phytologist* 94: 309 – 323.
- Barrutia O., Epelde L., García-Plazaola J. I., Garbisu C., Becerril J. M., 2009: Phytoextraction potential of two *Rumex acetosa* L., accessions collected from metalliferous and non-metalliferous sites: effect of fertilization. *Chemosphere* 74: 259 – 264.
- Benavides M. P., Gallego S. M., Tomaro L.M., 2005: Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 17: 21 – 34.
- Bentley S., Whittaker J. B., Malloch A. J. C. 1980: Field experiments on the effects of grazing by chrysomelid beetle (*Gastrophysa viridula*) on seed production and quality in *Rumex obtusifolius* and *Rumex crispus*. *Journal of Ecology* 68: 671 - 674
- Bohner A., 2001: Physiologie und futterbaulicher Wert des Ampfers. Bericht über das 7. Alpenländische Expertenforum, 22. und 23. März 2001, BAL Gumpenstein, Austria, pp 39-44
- Brenchley W. E., 1920: Weeds of farm land. Longmans. Green and co, London
- Cavers P. B., Harper J. L., 1964: Biological flora of the Brithish Isles, *Rumex obtusifolius* L. and *Rumex crispus* L.. *Journal of Ecology* 52: 737 - 766.
- Cottam D. A., Whittaker J. B., Malloch A. J. C., 1986: The effects of chrysomelid beetle grazing and plant competition on the growth of *Rumex obtusifolius*. *Oecologia* 70: 452 – 456.
- Dong J., Mao W. H., Zhang G. P., Wu F. B., Cai Y., 2007: Root exudation and plant tolerance to cadmium toxicity – a review. *Plant Soil Environ* 53: 193 - 200.

- Darlington H. T., Steinbauer G. P., 1961: The eighty-year period for dr. Beal's seed viability experiment. *American Journal of Ecology* 48: 321 - 325.
- Elberse W. Th., Berendse F., 1993: A comparative study of the growth and morphology of eight grass species from habitats with different nutrient availabilities. *Functional Ecology* 7: 223 - 229.
- Van Eekeren N., Fehér L., Smeding F., Prins U., Jansonius P. J., 2006: Controlling broad-leaved dock (*R. obtusifolius*) in grass clover mixtures. *Grassland Science in Europe* 11: 391 – 393.
- Van Evert F. K., Polder G., Van der Heijden G. W. A. M., Kempenaar C., Lotz L. A. P., 2009: Real-time vision-based detection of *Rumex obtusifolius* in grassland. *Weed Research* 49: 164 – 174.
- Grime J. P., Hodgson J. G., Hunt R., 1988: *Comparative plant ecology*. Academic Division Of Unwin Hyman Ltd, London, 742 str.
- Hann P., Trska C., Kromp B., 2012: Effects of management intensity and soil chemical properties on *Rumex obtusifolius* in cut grasslands in Lower Austria. *Journal of Pest Science*. DOI 10.1007/s10340-011-0390-1.
- Hatcher P. E., Paul N. D., Ayres P. G., Whittaker J. B., 1995: The effect of natural and simulated insect herbivory, and leaf age, on the proces of infection of *Rumex crispus* L. and *Rumex obtusifolius* L. by *Uromyces rumicis* (Schumach) Wint. *Functional Ecology* 8: 265 – 272.
- Hejcman M., Száková J., Schellberg J., Šrek P., Tlustoš P., 2009: The Rengen Grassland Experiment: soil contamination by trace elements after 65 years of Ca, N, P and K fertiliser application. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 83: 39 - 50
- Hejcman M., Száková J., Schellberg J., Tlustoš P., 2010: The Rengen Grassland Experiment: relationship between soil and biomass chemical properties, the amount of applied elements and their uptake. *Plant and Soil* 333: 163 – 179.

- Hejduk S., Doležal P., 2004: Nutritive value of broad-leaved dock (*Rumex obtusifolius*) and its effect on the quality of grass silages. Czech Journal of Animal Science 49: 144 – 150.
- Hejný S., Slavík B., 1990: Květena České republiky 2. Academia, Praha, 544 str.
- Honěk A., Martínková Z., 2001: Geographic variation in germinability of *Rumex obtusifolius* and *R. crispus* seeds in Europe. Biologia 56: 103 - 110.
- Hongo A., 1989a: Survival and growth of seedling of *Rumex obtusifolius* L. and *Rumex crispus* L. in newly sown grassland. Weed research 29: 7 – 12.
- Hongo A., 1989b: Transplant survival of *Rumex obtusifolius* L. and *Rumex crispus* L. in three old reseeded grassland. Weed research 29: 13 – 19.
- Hrdličková J., Hejzman M., Křišťálová V., Pavlů V., 2011: Production, size and seed germination of broad-leaved dock collected from mother plants grown under different nitrogen, phosphorus, and potassium supplies. Weed Biology Management 11: 190 - 201.
- Hron F., Zejbrlík O., 1974: Kapesní atlas – Rostliny polí a zahrad. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 410 str.
- Humphreys J., Jansen T., Culleton N., Macnaeide F. S., Storey T., 1999: Soil potassium supply and *Rumex obtusifolius* and *Rumex crispus* abundance in silage and grazed grassland swards. Weed Research 39: 1 – 13.
- Jeangros B., Nösberger J., 1990: Effects of an established sward of *Lolium perenne* L. on the growth and development of *Rumex obtusifolius* L. seedlings. Grass and Forage Science 45: 1 - 7.
- Jursík M., Holec J., Zatoriová B., 2008: Biologie a regulace dalších významných plevelů České republiky: Širokolisté šťovíky: šťovík tupolistý (*Rumex obtusifolius*) a šťovík kadeřavý (*Rumex crispus*). Listy Cukrovarnické a Řepářské 124, č. 7-8: 215 - 219.
- Kiehl K., Esselink P., Bakker J. P., 1997: Nutrient limitation and plant species composition in temperate salt marshes. Oecologia 111: 325 – 330.

- Klimeš L., 1989: Rozšíření a ekologická diferenciace širokolistých št'ovíků (*Rumex* L.) v nivě Lužnice mezi Novou vsí a Suchdolem v jižních Čechách. *Preslia*, Praha, 61: 129 – 144.
- Klimeš L., 1996: Population ecology of *Rumex obtusifolius* in: *Foodplain Ecology and Management* 155 - 179, SPB Academic Publishing, Amsterdam
- Kneifelová M. et Mikulka J., 2003: Významné a nově se šířící plevely. Ústav zemědělských a potravinářských informací, Praha, 59 str.
- Kohout V., 1997: *Plevely polí a zahrad*, Agrospoj, Praha
- Kolodziej B., 2007: The effect of NPK fertilization on Goldenrod (*Solidago virgaurea* L. ssp. *virgaurea*), yields and quality parameters. *Herba proucnica* 53: 129 – 134.
- Kováčik P., 2009: *Výživa a systémy hnojení rostlin*. Kurent s.r.o., České Budějovice, 109 s.
- Křišťálová V., Hejcman M., Červená K., Pavlů V., 2011: Effect of nitrogen and phosphorus availability on the emergence, growth and over-wintering of *Rumex crispus* and *Rumex obtusifolius*. *Grass and Forage Science* 66: 361 - 369.
- Kubát K., Hrouda L., Chrtěk J., Kaplan Z., Kirschner J., Štěpánek J. (eds.), 2002: *Klíč ke květeně České republiky*. Academia, Praha, 928 str.
- Kučerová P., Macková M., Macek T., 1999: Perspektivy fytořemediace při odstraňování organických polutantů a xenobiotik ze životního prostředí. *Chemické listy* 93: 19 – 26.
- Kumpiene J., Lagerkvist A., Maurice C. 2008: Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments - A review. *Waste Manage* 28: 215-225.
- Larcher W., 1988: *Fyziologická ekologie rostlin*. Academia, Praha, 361 str.
- Martínková Z., Honěk A., 2001: Regeneration of *Rumex obtusifolius* L. after cutting. *Rostlinná výroba* 47: 228 – 232.
- Martínková Z., Honěk A., 2004: *Gastrophysa viridula* (Coleoptera: Chrysomelidae) and biocontrol of *Rumex* – a review. *Plant Soil and Environment* 50: 1 - 9.

- Martínková Z., Honěk A., Pekár S., Strobach J., 2009: Survival of *Rumex obtusifolius* L. in unmanaged grassland. *Plant Ecology* 205: 105 – 111.
- Maun M. A., 1974: Reproductive biology of *Rumex crispus*. Phenology, surface area of chlorophyll-containing tissue, and contribution of the perianth to reproduction. *Canadian Journal of Botany* 52: 2181 - 2187.
- Mikulka J., Kneifelová M., 2004: Effect of meadow and pasture management system on the occurrence of *Rumex crispus* and *Rumex obtusifolius*. *Journal of Plant Diseases and Protection, Sonderheft XIX*: 619 - 625.
- Mikulka J., Kneifelová M., Martínková Z., Soukup J., Uhlík J., 2005: Plevelné rostliny. Profi Press s. r. o., Praha, 148 str.
- Mikulka J., Oliberius J., Chlupatý K., 1995: Metody průzkumu a hubení Širokolistých šťovíků na loukách a pastvinách. Ministerstvo zemědělství České republiky, Praha, 15 str.
- Milberg P., 1997: Weed seed germination after short-term light exposure: germination rate, photon fluence, response and interaction with nitrate. *European Weed Research* 37: 157 – 164.
- Niggli U., Nösberger J., Lehmann J., 1993: Effects of nitrogen fertilization and cutting frequency on the competitive ability and the regrowth capacity of *Rumex obtusifolius* L. in several grass swards. *Weed Research* 33: 131 – 137.
- Novák F. A., 1972: Vyšší rostliny – *Tracheophyta* 1, Academia, Praha, 505 str.
- Pavlů L., Pavlů V., Gaisler J., Hejcman M., 2008a: Šťovíky v travních porostech. *Úroda* 56/5: 54 - 55.
- Pavlů L., Pavlů V., Gaisler J., Hejcman M., 2008b: Effect of cessation of grazing management on dynamics of grassland weedy species. *Journal of Plant Diseases and Protection, Special Issue XXI*: 581 - 586.
- Pino J., Haggard R. J., Sans F. X., Masalles R. M., Sackville Hamilton R. N., 1995: Clonal growth and fragment regeneration of *Rumex obtusifolius* L. *Weed Research* 35: 141 – 148.

- Richman S. M., 2002: The Responses of Plants to Metal Toxicity: A review focusing on Copper, Manganese and Zinc. Australian Minerals and Energy environment foundation NO. 14, 54 str. Dostupné na http://www.plantstress.com/Articles/toxicity_i/Metal_toxicity.pdf
- Sagardoy R., Morales F., López-Millán A. F., Abadía A., Abadía J., 2009: Effects of zinc toxicity on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants grown in hydroponics. *Plant Biology* 11: 339 – 350.
- Sakanoue S., Kitahara N., Hayashi H., 1995: Biological control of *Rumex obtusifolius* L. by goat grazing. *Japan Agricultural Research Quarterly* 29: 39 – 42.
- Sanita di Toppi L, Gabbrielli R., 1999: A review: Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany* 41: 105 – 130.
- Slavíková J., 1986: Ekologie rostlin. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 366 s.
- Song A., Li P., Li Z., Fan F., Nikolic M., Liang Y., 2011: The alleviation of zinc toxicity by silicon is related to zinc transport and antioxidative reactions in rice. *Plant and Soil* 344: 319 – 333.
- Soudek P., Petrová Š., Benešová D., Kotyza J., Vaněk T., 2008: Fytoremediace a možnosti zvýšení jejich účinnosti. *Chemické listy* 102: 346 – 352.
- Strnad L, Hejman M., Křišťálová V., Hejmanová P., Pavlů V., 2010: Mechanical weeding of *Rumex obtusifolius* L. under different N, P and K availability in permanent grassland. *Plant and Soil Environment* 56: 393-399.
- Sýkora L., 1959: Rostliny v geologickém výzkumu. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 322 s.
- Száková J., Tlustoš P., Goessler W., Frková Z., Najmanová J., 2009: Mobility of arsenic and its compounds in soil and soil solution: the effect of soil pretreatment and extraction methods. *Journal of Hazard Materials* 172: 1244 - 1251.

- Totterdell S, Roberts E. H., 1979: Effects of low temperatures on the loss of innate dormancy and development of induced dormancy of *Rumex obtusifolius* L. and *Rumex crispus* L., *Plant Cell and Environment* 2: 131 – 137.
- Tsuyuzaki S., 2010: Seed survival for three decades under thick tephra. *Seed Science Research* 20: 201 - 207.
- Tyler G., Olsson T., 2001: Plant uptake of major and minor mineral elements as influenced by soil acidity and liming. *Plant and Soil* 230: 307 - 321.
- Uprety D., Hejzman M., Száková J., Kunzová E., Tlustoš P., 2009: Concentration of trace elements in arable soil after long-term application of organic and inorganic fertilizers. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 85: 241 - 252.
- Vaněk V., Balík J., Pavlíková D., Tlustoš P., 2007: *Výživa polních a zahradních plodin*. Profi Press s. r. o., Praha, 176 str.
- Wang X., Wu Y. Y., 1995: Effect of modification treatments on behaviour of heavy metals in combined polluted soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* 6: 440 - 444.
- Weaver S. E., Cavers P. B., 1980: Reproductive effort of two perennial weed species in different habitats. *Journal of Applied Ecology* 17: 505 – 513.
- Zaller J. G., 2004a: Ecology and non-chemical control of *Rumex crispus* and *R. obtusifolius* (Polygonaceae): a review. *Weed research* 44: 414 - 432.
- Zaller J. G., 2004b: Competitive ability of *Rumex obtusifolius* against native grassland species: above- and belowground allocation of biomass and nutrient. *Journal of Plant Diseases and Protection* 19: 345 - 351.
- Zaller J. G., 2006a: Sheep grazing vs. cutting: regeneration and soil nutrient exploitation of the grassland weed *Rumex obtusifolius*. *BioControl* 51: 837 – 850.
- Zaller J. G., 2006b: Allelopathic effects of *Rumex obtusifolius* leaf extracts against native grassland species. *Journal of Plant Diseases and Protection* 20: 463 – 470.

Zaller J. G., 2007: Effect of patchy distribution of soil on root morphology and biomass allocation of selected approach. Polish Journal of Ecology 55: 731 – 746.

Zehnálek J., Adam V. Kizek R., 2006: Asimilace dusičnanového, amonného a amidického dusíku u zemědělských plodin. Chemické listy 100: 508 – 514.