

HALOFYTNÍ ROSTLINY A JEJICH MOŽNÉ VYUŽITÍ VE FYTOREMEDIACÍCH

KATEŘINA MOŤKOVÁ^{a,b}, RADKA
PODLIPNÁ^a, TOMÁŠ VANĚK^a,
ZDENĚK KAFKA^b

^a Laboratoř rostlinných biotechnologií, Ústav experimentální botaniky AV ČR, v.v.i., Rozvojová 263, 165 02 Praha 6, ^b Ústav chemie ochrany prostředí, Vysoká škola chemicko-technologická, Technická 5, 166 28 Praha 6
podlipna@ueb.cas.cz

Došlo 26.10.12, přepracováno 12.7.13, přijato 22.7.13.

Klíčová slova: halofytní rostliny, fytoremediace, těžké kovy, osmoprotektanty

Obsah

1. Úvod
2. Zasolené půdy
3. Solný stres a rostliny
4. Halofytní rostliny
 - 4.1. Mechanismus tolerance k zasolení
5. Halofyty a kovy
6. Závěr

1. Úvod

Rostoucí lidská populace potřebuje ke svému nasycení stále intenzivnější zemědělství. Vzhledem k tomu, že poměrně velká část pevninského povrchu je pouštního nebo polopouštního charakteru (přibližně 6 %) a voda využitelná k zavlažování je především slaná, rostliny aklimatizované na podmínky vysokého zasolení budou v budoucnu nezastupitelným zdrojem nejen potravy, ale i krmiv, biopaliv, textilních vláken atd.

Halofyty jsou rostliny schopné využít ke svému růstu vodu i s více než 0,5% obsahem soli. Adaptace rostlin k zasolení je dvojího druhu. V první řadě se jedná o dokonale řízený příjem solí pomocí vysoce selektivní plazmatické membrány, která brání pronikání nadbytečných iontů do buněk kořenů. Druhý adaptační mechanismus spočívá ve zvýšeném ukládání solí do vakuol, případně apoplastu, kdy část solí bývá transportována do nadzemní části a následně i vylučována na povrch listů. Vysoký osmotický tlak vakuolární šťávy pak musí být vyrovnáván zvýšenou koncentrací kompatibilních osmoticky aktivních látek (kvartérní amoniové soli, aminokyseliny, cukry)

v cytosolu¹. Slané mokřady zejména v přímořských oblastech jsou často kontaminovány z okolních průmyslových i obytných zón, z lodní dopravy a pod. Zemědělské i jiné půdy mohou být vážně kontaminovány i v důsledku nadměrného používání pesticidů a hnojiv. Fytoremediace jako nové biotechnologie využívají vyšší rostliny a asociované mikroorganismy k odstranění kontaminantů z půdy a z vod². Možnosti využití halofytních druhů rostlin, které jsou schopny růst a reprodukovat se i ve velmi nehostinných podmínkách, bylo navrženo pro fytoremediační technologie již v několika studiích^{3–6}. Dominantní role halofytů v akumulaci těžkých kovů v kontaminovaných mokřadech již byla popsána⁷. Halofytní rostliny se díky svým vlastnostem hodí zejména pro fytostabilizaci a fytoakumulaci⁸.

Fytostabilizaci rozumíme imobilizaci vodních a půdních kontaminantů pomocí rostlin, které současně zabráňují erozi. Při fytoakumulaci dochází k absorpci kontaminantu kořeny a následné akumulaci v nadzemní části rostliny⁹.

2. Zasolené půdy

Podle USDA (U.S. Department of Agriculture Salinity Laboratory), slané půdy mohou být definovány jako půdy, jejichž půdní roztok má elektrickou vodivost 4 dS m⁻¹ a vyšší. Hodnoty kolem 4 dS m⁻¹ odpovídají přibližně koncentraci 40 mmol l⁻¹ NaCl (cit.¹⁰).

Pro posuzování půdní salinity se nejčastěji používá ukazatel SAR (hodnota adsorpce sodíku z půdního roztoku).

$$SAR = \frac{c(Na^+)}{c(Ca^{2+}) + c(Mg^{2+})}$$

kde $c(Na^+)$, $c(Ca^{2+})$, $c(Mg^{2+})$ představují molární koncentraci příslušných iontů.

Půdy, ve kterých je zvýšená koncentrace sodíku, se rozděluje do dvou kategorií a to na půdy alkalické a slané. Alkalické půdy se vyznačují vysokými koncentracemi sodných kationtů a uhličitanových aniontů, mají vysoké pH (vyšší než 8,5 a může dosahovat až hodnot 10,8) a vysoký sodíkový poměr SAR. Obecně se za alkalické půdy označují takové, u nichž jsou hodnoty SAR > 15 (cit.¹¹).

Ve slaných půdách, stejně jako v alkalických, dominují sodné kationty, ale převažujícími anionty jsou zde chloridové a síranové. Hodnoty pH a SAR jsou oproti alkalickým půdám nižší¹².

Zasolené půdy představují pro rostliny problém především s dostatečným příjmem vody a živin. Při dlouhodobě zvýšené salinitě nastává u rostlin nerovnováha v příjmu esenciálních látek. Již dlouho je známo, že sodík kompetitivně inhibuje absorpci pro rostliny nezbytných prvků K,

Ca a Mg. Sodík také zvyšuje pH půdy a omezuje dostupnost esenciálních mikronutrientů Fe, Mn, Zn a Cu (cit.¹³). Oproti živočichům není sodík pro většinu rostlin esenciálním prvkem a ve zvýšené koncentraci na ně působí toxicity. Rostliny postrádají Na^+/K^+ ATPasu, enzym, který zajišťuje protisměrný aktivní transport Na^+ a K^+ iontů¹⁴.

3. Solný stres a rostliny

Solný stres ovlivňuje život rostlin od klíčení semen, přes růst, kvetení až po vývoj plodů různými způsoby: snížením vodního potenciálu (nedostatečný příjem vody), přímou toxicitou Na^+ a Cl^- iontů a ovlivněním příjmu esenciálních nutrientů¹².

Hlavním poškozením v důsledku hyperosmotického stresu je inhibice růstu a po delší expozici i odumření rostliny. Dochází k porušení integrity membránového systému a ke změně v aktivitě enzymů. Důsledkem je poškození fotosyntetického aparátu a nárůst oxidativního stresu. Zvýšená koncentrace sodíku v okolí kořenů narušuje také příjem draslíku, který má významnou roli v udržování membránového potenciálu a vliv na aktivitu enzymů. Jakmile sodík pronikne do cytoplasmy, inhibuje funkci mnoha enzymů¹⁵.

Vznikající reaktivní formy kyslíku (ROS) způsobují zejména oxidativní poškození membránových lipidů, proteinů a nukleových kyselin. Na druhou stranu ROS fungují jako klíčový prvek signální kaskády vedoucí k uzavření průduchů¹⁶.

Metabolickou odpovědí rostlin na solný stres je syntéza kompatibilních organických osmolytů, které zajišťují udržení osmotického potenciálu a zároveň tím chrání subbuněčné struktury před poškozením volnými radikály. Nejběžnějšími osmolyty jsou sacharidy, polyalkoholy, aminokyseliny a kvartérní amoniové sloučeniny.

Glycinbetain a trehalosa stabilizují kvartérní strukturu proteinů a chrání membrány, mannitol vychytává volné radikály. Velmi významným osmoprotektantem je aminokyselina prolin, která slouží jako zásobárna uhlíku a dusíku a zároveň také vychytává volné radikály. Dále stabilizuje subbuněčné struktury a vyrovnává buněčný redox potenciál při stresu¹⁰.

4. Halofytní rostliny

Přibližně 1 % pevninských druhů rostlin je schopno přežít a rozmnožovat se v zasolených půdách. Jako halofytní druhy (halofyty) jsou označovány rostliny, které jsou schopny růst a reprodukovat se na místech, kde koncentrace solí, hlavně NaCl a KCl, dosahuje 200 mM a vyšších¹⁷. Nejvíce halofytních druhů najdeme v čeledi *Chenopodiaceae* (přibližně 550), dále pak v čeledích *Poaceae*, *Fabaceae* a *Asteraceae*¹³.

Na základě schopnosti přizpůsobit se slaným půdám můžeme halofyty rozdělit do tří kategorií, na pravé (obligátní) halofyty, které dosahují optimálního růstu na

zasolených půdách (nad 0,5 % NaCl), např. *Suaeda frutescens*, *Cressa cretica*, *Aeluropus lagopoides*, *Salsola baryosma*, *Haloxylon recurvum*, *Zygophyllum simplex*; fakultativní halofyty, které dobře rostou v zasolených půdách jako pravé halofyty, ale stejně dobře mohou růst v nezasolených půdách, např. *Trianthema triquetra*, *Tamarix dioica*, *Launaea nudicaulis*, *Eragrostis ciliaris*, *Salvadora persica*, *Pulicaria wightiana*; a přechodné halofyty, které optimálně prospívají na nesalinních půdách, ale rostou i na přechodně zasolených půdách, např. *Sporobolus marginatus*, *Haloxylon salicornicum*, *Datylactenium indicum*¹⁸.

U halofytních rostlin se vyvinula široká škála morfologických, fyziologických a biochemických adaptačních mechanismů, které pak určují míru tolerance k zasolení.

Podle součinnosti různých adaptačních mechanismů se halofytní rostliny klasifikují na rostliny s mechanismy, jež zabráňují vstupu soli do buněk (*Rhizophora mangale*); rostliny, které sůl přijmou, ale následně dochází k její sekreci (rostliny rodu *Tamarix*) a tzv. akumulátory soli (rostliny rodu *Atriplex*)¹⁹.

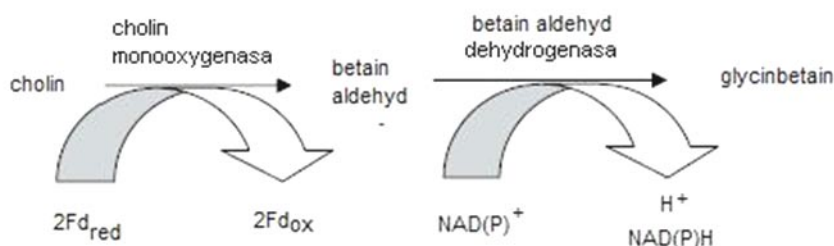
Schopnost halofyt adaptovat se na NaCl závisí ve velké míře na kontrolovaném příjmu a kompartmentalizaci Na^+ a Cl^- iontů, syntéze, případně „nadprodukci“, osmoprotektantů a stimulaci antioxidačního systému.

Mechanismus fytoexkrece je sekundárním mechanismem tolerance, který mají jen některé halofytní druhy, např. *Tamarix aphylla*. Tento proces zajišťují speciální exkretční orgány umístěné v listech: solné žlázy, solné měchýřky a trichomy, které regulují iontovou rovnováhu. V těchto orgánech rostlina sůl akumuluje a případně přebytek vylučuje na povrch listů¹⁹.

4.1. Mechanismus tolerance k zasolení u halofyt

Mechanismus tolerance k zasolení je velmi komplexní a není ještě zcela popsán. Pro bezchybnou funkci buněk je důležité udržet v cytosolu vysokou hodnotu poměru K^+/Na^+ , a to i za podmínek zvýšené salinity, kdy dochází k zvýšenému příjmu sodíku. K zabránění toxických účinků Na^+ v cytosolu a vyrovnání osmotické rovnováhy disponují halofytní rostliny účinnými mechanismy jako je transport a řízená akumulace iontů Na^+ ve vakuolách, syntéza vhodných osmolytů či schopnost akumulovat K^+ v přítomnosti vysoké koncentrace Na^+ a Cl^- iontů⁸. Velmi důležitými jsou pro halofytní rostliny transportní enzymy jako H^+ -ATPasa a H^+ -PPasa, které zajišťují ve vakuole nadbytek protonů, které se pak mohou účastnit transportu iontů Na^+ do vakuoly pomocí antiportů²⁰.

Díky vysoké koncentraci osmoticky aktivních sloučenin jsou halofytní rostliny i ve stresu schopny regulovat příjem vody do buněk^{16,21}. Jako osmolyty jsou u halofytních rostlin stejně jako u jiných druhů syntetizovány cukerné alkoholy, aminokyseliny, kvartérní amoniové a terciární sulfoniové sloučeniny. Tyto látky, které jsou lokalizovány v cytosolu, jsou nejen osmoticky aktivní, ale především „kompatibilní“ k cytosolárnímu prostředí tj. ani ve vysokých koncentracích neinhibují aktivitu cytosolárních enzymů²¹.

Schéma 1. Biosyntéza glycinebetainu²⁵

Účinným osmoprotektantem je glycinebetain nalezený např. u halofytních rostlin čeledi *Poaceae* a *Chenopodiaceae*. Glycinebetain je kvartérní amoniová sloučenina, která pomáhá chránit rostliny proti dehydrataci²². Glycinebetain je syntetizován v chloroplastech dvoukrokovou oxidací cholinu přes betainaldehyd, která je u rostlin katalyzována cholinmonooxygenasou a betainaldehyddehydrogenasou (schéma 1)^{23,24}. Některé čeledi (např. *Plumbaginaceae*) nahrazují glycinebetain jinými kvartérními amoniovými sloučeninami, jako je cholin-*O*-sulfát, betainy β-alaninu, prolinu a hydroxyprolinu¹⁷.

Dalším významným osmoprotektantem je aminokyselina prolin. Prolin produkují a akumulují rostliny jako odpověď na abiotický stres, jako je vodní deficit, zasolení, prudké změny teplot a v neposlední řadě se ukazuje, že i stres vyvolaný těžkými kovy zvyšuje produkci prolinu. Přestože někteří autoři popisují korelaci mezi zvýšenou produkcí prolinu a zvýšenou tolerancí k zasolení²⁵, přímá souvislost mezi produkcí prolinu rostlinami a stupněm zasolení půdy nebyla dostatečně prokázána²⁶. Prolin u rostlin mimo jiné reguluje množství využitelného dusíku. Vyskytuje se v cytosolu buněk a významně přispívá k vyrovnávání osmotického tlaku, má funkci ve stabilitě membrán a zmírňuje účinky NaCl na buněčné membrány²⁷. Stejně jako u mikroorganismů a živočichů biosyntéza L-prolinu může vycházet ze dvou prekurzorů L-glutamátu a L-ornithinu. Nejdůležitějšími enzymy syntézy prolinu jsou pyrrolin-5-karboxylsyntetasa a pyrrolin-5-karboxylreduktasa (schéma 2)²⁸.

Zajímavé je zjištění, že rostliny s vysokou akumulací glycinebetainu produkují málo prolinu a naopak²⁹.

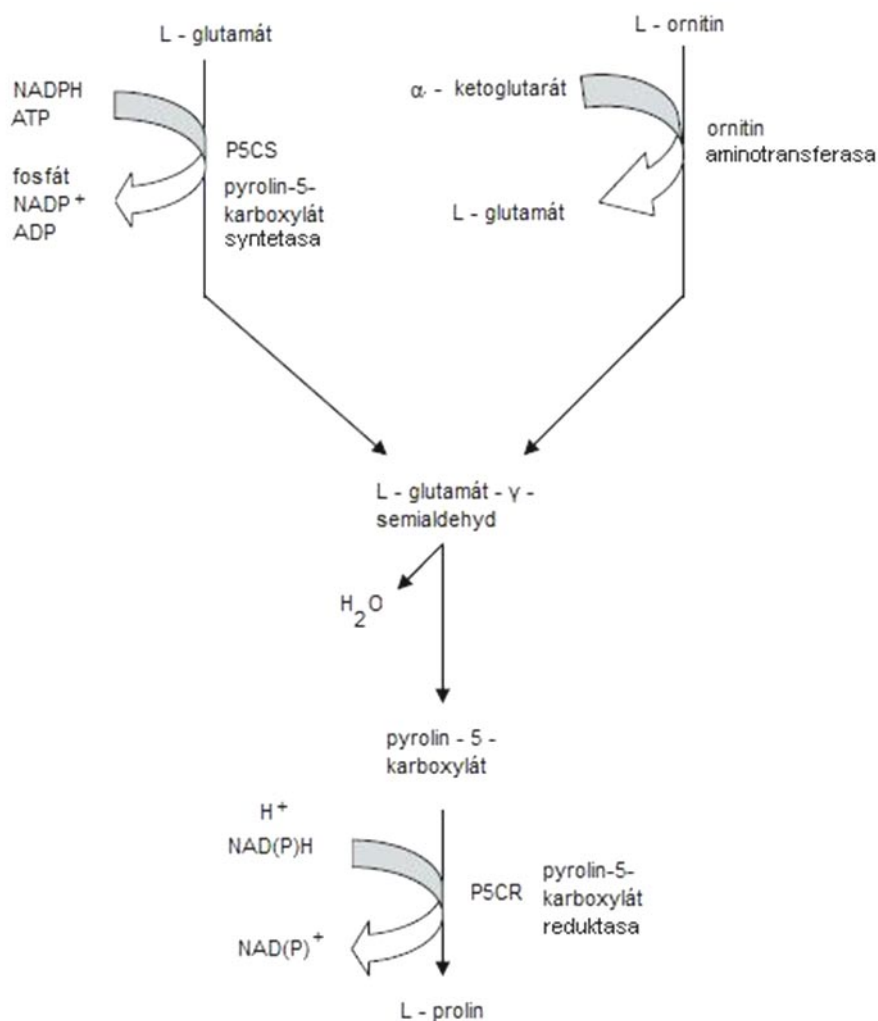
Zvýšená produkce reaktivních forem kyslíku a s tím spojené změny v aktivitě enzymů antioxidačního systému v důsledku solného stresu byly popsány mnoha autory³⁰, ale na základě jejich výzkumu nelze zatím s určitostí říci, zda halofytní druhy disponují nějakými zvláštními regulačními či stimulačními mechanismy. Stejně jako u jiných rostlinných druhů se celková aktivita enzymů jako superoxididismutasa (SOD), peroxidasy, katalasa apod. v důsledku

stresu způsobeného zvýšenou salinitou zvyšuje. Rozdíly však lze najít v aktivitě jednotlivých isoform. Např. u *Sueda salsa* nebyla při solném stresu pozorována změna celkové aktivity superoxididismutasy (SOD), ale byla potvrzena zvýšená aktivita Mn-SOD a Fe-SOD isoform, které jsou lokalizovány v mitochondriích a chloroplastech, a naopak snížená aktivita Cu/Zn-SOD I (cit.³¹). Dalším enzymem, který se podílí na udržení nízké hladiny ROS v rostlinách je katalasa. Zásadní rozdíly v aktivitě byly popsány nejen u různých rodů, ale dokonce i jednotlivých druhů. U *Bruguiera parviflora* byl pozorován pokles aktivity katalasy v důsledku solného stresu o 35 %, zatímco u *B. gymnorhiza* aktivita v porovnání s kontrolou vzrostla téměř pětkrát³². Askorbátperoxidasy hrají důležitou roli v regulaci množství H₂O₂ ve vnitřním prostředí buněk. Velké množství isoform je lokalizováno v různých buněčných kompartmentech (cytosol, stroma chloroplastů, peroxisomy), často vázaných na membránu (tylakoidní, mitochondriální)³³.

Mechanismy, které dovolují halofytním rostlinám odolávat zvýšenému příjmu iontů Na²⁺ a Cl⁻ se pravděpodobně uplatňují i při zvýšeném příjmu jiných iontů. Z těchto důvodů lze předpokládat u halofytních rostlin vyšší odolnost vůči těžkým kovům a tím pádem i možnost využití ve fytořediačních technologiích³⁴.

5. Halofyty a kontaminace těžkými kovy

V rámci hledání vhodných rostlin pro fytořediační technologie bylo nalezeno mnoho druhů schopných tolerovat a akumulovat jeden či více těžkých kovů ve vysokých koncentracích, tzv. hyperakumulátory³⁵. Tyto rostliny se však jen zřídka hodí k pěstování v oblastech s vysokou salinitou. Naopak u rostlin s vysokou tolerancí k suchu a zasolení je možné předpokládat i vyšší toleranci ke kontaminaci půdy těžkými kovy⁴. Proto se vědecké studie zaměřují na rostlinné druhy běžně se vyskytující v přímořských oblastech či jiných slaniscích, např. zástup-

Schéma 2. Biosyntéza prolinu²⁵

ci rodu *Atriplex*, *Portulaca*, *Spartina*. Druhy *Atriplex halimus* a *A. atacamensis* rostly na půdě vulkanického původu přirozeně obsahující zvýšené množství arsenu. Oba tyto halofytní druhy dobře prosperovaly bez příznaků toxicity. Přestože se arsen u obou druhů akumuloval převážně v kořenech, *A. halimus* obsahoval více arsenu v listech než *A. atacamensis*³⁶. *A. halimus* podle dalších výzkumů koncentruje těžké kovy především v kořenech, tedy nemá dostatečnou fytoextrakční kapacitu pro půdy s vysokou koncentrací těžkých kovů, přesto *A. halimus* tuto zátěž dobře snáší a hodí se k fytoestabilizačním technologiím³⁷. Důležitost výběru vhodného druhu či odrůdy pro specializované remediační technologie podtrhuje studie porovnávající akumulace různých těžkých kovů (Cu, Pb, Ni, Zn) u několika druhů rodu *Atriplex*. Jako nejvhodnější pro fytoestabilizaci byl označen *A. hortensis* var. *Purpurea*³⁸. Výhodou rostlin rodu *Atriplex* je i bohatě narostlá nadzemní část, která v případě fytoestabilizace pak může být použita pro

výrobu bioenergie⁵. Podle dalších experimentů *A. halimus* vykazuje zvýšenou toleranci k olovu a kadmii, dokonce byl pozorován pozitivní efekt salinity na množství akumulovaného kadmia³⁹.

V experimentech s tamaryškem (*Tamarix smyrnensis*), široce rozšířeným v oblasti středomoří, byl také pozorován pozitivní efekt půdní salinity (0,5 a 3 %) na příjem i translokaci těžkého kovu, konkrétně kadmia do nadzemních částí, kde bylo kadmium společně se solí akumulováno ve vesikulárních trichomech a posléze vylučováno na povrch listů⁴⁰. Pozitivní efekt salinity na translokaci kadmia do nadzemní části byl také pozorován u *Sesuvium portulacastrum*⁴¹. Naopak u rostlin *Kosteletzkya virginica* pěstovaných na médiu obohaceném solí (50 mM) byla pozorována snížená akumulace i translokace kadmia⁴².

Přítomnost soli v půdě nebo živném médiu může mít u různých rostlinných druhů rozdílný vliv jak na toxicitu, tak na akumulaci těžkých kovů. U druhu *Spartina alterni-*

flora při nízké koncentraci kadmia (1 mM) přídavek soli zvyšoval stres, který se projevoval nižším nárůstem biomasy, výškou rostlin a nižším obsahem chlorofylů a+b, současně bylo kadmium ve zvýšené míře translokováno do nadzemní části, zatímco synergický efekt obou stresových faktorů při vyšší koncentraci kadmia (3 mM) nebyl pozorován. V tomto případě převážná část kadmia zůstávala akumulována v kořenech, čehož by bylo možné využít pro fytostabilizaci⁶.

U halofytních rostlin *Sporobolus virginicus*, *Spartina patens* a *Atriplex nummularia* byla v experimentech pozorována vysoká tolerance také k zinku, mědi a niklu. Kovy byly rostlinami akumulovány bez významného vlivu na produkci biomasy⁴³.

Kosmatec (*Mesembryanthemum crystallinum*, fakultativní halofyt), který je znám svojí zvýšenou tolerancí k zasolení, také vykazoval odolnost ke kontaminaci půdy mědí⁴⁴. Rostliny vystavené současněmu působení NaCl a CuSO₄ vykazovaly stejnou míru akumulace mědi jako kontrolní rostliny, ale dvojnásobnou akumulaci prolinu v listech. Adaptace rostlin na slané prostředí formou „nadprodukce“ prolinu tak může napomáhat toleranci rostlin i k jiným kontaminantům⁴⁵.

Další halofytní rostlinou, u které byl studován fytořediační potenciál je slanorožec (*Salicornia brachiata*). Dle výsledků výzkumu se tento druh hodí pro fytoakumulaci těžkých kovů (As, Ni, Cd) pouze v nižších koncentracích⁴⁶.

Pro fytořediaci v oblastech kontaminovaných arsenem byl shledán jako velmi vhodný tlustobýl (*Sesuvium portulacastrum*). Přítomnost As neměla žádný vliv na fyziologický stav rostlin – obsah fotosyntetických pigmentů, celkové množství rozpustných proteinů ani metabolismus triolových sloučenin⁴⁷.

Možnost využití halofytních druhů rostlin ve fytořediacích potvrzují i experimenty, ve kterých je porovnáván fytořediační potenciál halofytních a glykofytních rostlin. Např. srovnání halofytní *Sesuvium portulacastrum* patříci do čeledi kosmaticovitých a brukve hořčičné (*Brassica juncea*), při kontaminaci olovem. Nárůst biomasy byl více redukován u brukve, a to při všech sledovaných koncentracích (200, 400, 800, 1000 μM Pb(NO₃)₂). U *S. portulacastrum* byla pozorována při 1000 μM koncentraci olova jeho až o třetinu vyšší translokace v porovnání s brukví⁴⁸.

6. Závěr

Halofytní rostliny jsou díky své značné odolnosti k nejrůznějším nepříznivým podmínkám (sucho, toxické prostředí) a díky mechanismům, které regulují vstup iontů do rostlin, možnými kandidáty pro využití ve fytořediacích zejména fytoakumulaci a fytostabilizaci těžkých kovů. Přestože většina rostlinných druhů akumuluje větší část přijatých těžkých kovů v kořenech, u mnoha byla prokázána alespoň částečná translokace do nadzemních částí, což musí být bráno v úvahu při volbě fytořediační technolo-

gie. Zasolená půda, jak bylo popsáno výše, může translokační faktor dokonce zvyšovat.

Práce vznikla v za podpory grantu č. OC10028 financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci programu OC – COST.

Financováno z účelové podpory na specifický vysokoškolský výzkum MŠMT (Rozhodnutí č. 21/ 2012).

LITERATURA

1. Cacador I., Vale C., Catarino F.: Mar. Environ. Res. 49, 279 (2000).
2. Pilon-Smiths E.: Annu. Rev. Plant Biol. 56, 15 (2005).
3. Eisa S. S., Eid M. A.: Aust. J. Basic Appl. Sci. 5, 88 (2011).
4. Manousaki E., Kalogerakis N.: Ind. Eng. Chem. Res. 50, 656 (2011).
5. Amer N., Al Chami Z., Al Bitar L., Mondelli D., Dumontet S.: Int. J. Phytorem. 15, 498 (2013).
6. Chai M. W., Shi F. C., Li R. L., Liu F. C., Qiu G. Y., Liu L. M.: S. Afr. J. Bot. 85, 63 (2013).
7. Otte M. L., Besterbroer S. J., Van der Linden J. M., Rozema J., Broekman R. A.: Environ. Pollut. (Dordrecht, Neth.) 72, 175 (1991).
8. Flowers T. J., Galal H.: Funct. Plant Biol. 37, 604 (2010).
9. Soudek P.: Chem. Listy 102, 346 (2008).
10. Chinnusamy V., Jagendorf A., Zhu Jian-Kang: Crop Sci. 45, 437 (2005).
11. Glenn E. P., Brown J. J.: Crit. Rev. Plant Sci. 18, 227 (1999).
12. Flowers T. J., Flowers S. A.: Agric. Water Manage. 78, 15 (2005).
13. Kudo N., Sugino T., Oka M., Fujiyama H.: Soil Sci. Plant Nutr. 56, 225 (2010).
14. Blumwald E.: Curr. Opin. Cell Biol. 12, 431 (2000).
15. Aslam R., Bostan N., Nabgha-e-Amen, Maria M., Safdar W. A.: J. Med. Plants Res. 5, 7108 (2011).
16. Hong B., Rivka B., Ho T. D.: Plant Mol. Biol. 18, 663 (1992).
17. Flowers T. J., Colmer T. D.: New Phytol. 179, 945 (2008).
18. Dagar J. C.: Bulletin of the National Institute of Ecology, New Dehli and Jaipur 15, 81 (2005).
19. Manousaki E., Kalogerakis N.: Ind. Eng. Chem. Res. 50, 656 (2011).
20. Gaxiola R. A., Palmgren M. G., Schumacher K.: FEBS Lett. 581, 2204 (2007).
21. Hare P. D., Cress W. A., Van Staden J.: Plant, Cell Environ. 21, 535 (1998).
22. Yancey P. H., v knize: *Cellular and Molecular Physiology of Cell Volume Regulation* (K. Strange, ed.), kap. 5. CRC Press, Boca Raton 1994.
23. Rathinasabapathi B., Burnet M., Russell B. L., Gage D. A., Liao P.-C., Nye G. J., Scott P., Golbeck J. H., Hanson A. D.: Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 94, 3454

- (1997).
24. Vojtechova M., Hanson A. D., Munoz-Clares R. A.: *Arch. Biochem. Biophys.* 337, 81 (1997).
 25. Munns R.: *New Phytol.* 167, 645 (2005).
 26. Boscaiu M.: *J. Plant Ecol.* 6, 177 (2012).
 27. Parvaiz A., Satyawati S.: *Salt. Plant. Soil. Environ.* 54 (3), 89 (2008).
 28. Delauney A. J., Hu C. A., Kishor P. B., Verma D. P.: *J. Biol. Chem.* 268, 18673 (1993).
 29. Tipirdamaz R., Gagneul D., Duhaze C., Ainouche A., Monnier C., Ozkum D., Larher F.: *Environ. Exp. Bot.* 57, 139 (2006).
 30. Jithesh M. N., Prashanth S. R., Sivaprakash K. R., Parida A. K.: *J. Genet.* 85, 237 (2006).
 31. Wang B., Luttge U., Ratajczak R.: *J. Plant Physiol.* 161, 285 (2004).
 32. Parida A. K., Das A. B., Mohanty P.: *J. Plant Physiol.* 161, 531 (2004).
 33. Shigeoka S., Ishikawa T., Tamoi M., Miyagawa Y., Takeda T., Yabuta Y., Yoshimura K.: *J. Exp. Bot.* 53, 1305 (2002).
 34. Parida A. K., Das A. B.: *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 60, 324 (2005).
 35. Rascio N., Navari-Izzo F.: *Plant Sci.* 180, 169 (2011).
 36. Tapia Y., Diaz O., Pizarro C., Segura R., Vines M., Zúñiga B., Moreno-Jiménez E.: *Sci. Total Environ.* 450, 188 (2013).
 37. Pérez-Esteban J., Escolástico C., Ruiz-Fernández J., Masaguer A., Moliner A.: *Environ. Exp. Bot.* 88, 53 (2013).
 38. Kachout S. S., Mansoura A. B., Mechergui R., Leclerc J. C., Rejeb M. N., Ourghi Z.: *J. Sci. Food Agric.* 92, 336 (2012).
 39. Manousaki E., Kalogerakis N.: *Environ. Sci. Pollut. Res.* 16, 844 (2009).
 40. Manousaki E., Kadukova J., Papadantonakis N., Kalogerakis N.: *Environ. Res.* 106, 326 (2008).
 41. Ghanya T., Slama I., Messedi D., Grignon C., Ghorbel M. H., Abdelly C.: *J. Plant Res.* 120, 309 (2007).
 42. Han R.-M., Lefevre I., Ruan Ch.-J.: *Presl. Plant. Growth. Regul.* 68, 97 (2012).
 43. Eid M. A., Eisa S. S.: *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 4, 1590 (2010).
 44. Thomas J. C., Malick F. K., Endreszl C., Davies E. C., Murray K. S.: *Physiol. Plantarum* 102, 360 (1998).
 45. Volkov K. S., Kholodova V. P., Kuznetsov V. V.: *Dokl. Biol. Sci.* 411, 479 (2006).
 46. Sharma A., Gontia-Mishra I., Srivastava A. K.: *J. Phyto.* 3 (9), 33 (2011).
 47. Lokhande V. H., Srivastava S., Patade V. Y., Dwivedi S., Tripathi R. D., Nikam T. D., Suprasanna P.: *Chemosphere* 82, 529 (2011).
 48. Zaier H., Ghnaya T., Lakhdar A., Baioui R., Ghabri- che R., Mnasri M., Sghair S., Lutts S., Abdelly Ch.: *J. Hazard. Mater.* 183, 609 (2010).

K. Motřková^{a,b}, R. Podlipná^a, T. Vaněk^a, and Z. Kafka^b (^a *Laboratory of Plant Biotechnologies, Institute of Experimental Botany, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague,* ^b *Department of Environmental Chemistry, Institute of Chemical Technology, Prague*): **Halophytes and Their Use in Phytoremediation**

Halophyte plants, which tolerate high NaCl concentration during growth and reproduction, have developed different strategies to survive and complete their life cycles. Generally, their salinity tolerance consists in controlled uptake of Na⁺ and Cl[−], their compartmentalization into vacuoles, and in protection of sensitive organelles such as nuclei or chloroplasts by production of stress proteins. Another important feature of salinity tolerance is production of various osmolytes such as proline, glycine, betaine, carbohydrates. There is a strong evidence that in many plants, unfavorable environmental conditions (drought, heat, cold, heavy metals, etc.) bring about the accumulation of proline, which serves not only as an osmotically active compound but also as a scavenger of reactive oxygen species (ROS). Phytoremediations uses living plants for accumulation or degradation of organic or inorganic pollutants from soil, water and air. Halophytic plants have been suggested as better adapted to cope with heavy metal stress. Hence they have a great potential in biotechnologies.