

Fytořemediace a možnosti její aplikace



Akademie věd
České republiky



Ústav experimentální
botaniky AV ČR, v. v. i.

věda 64

kolem
nás
pro všední
den

Ústav experimentální botaniky Akademie věd České republiky, v. v. i., (ÚEB) byl založen v roce 1962, kdy se osamostatnila část Biologického ústavu ČSAV se zaměřením na fyziologii rostlin. Jak již napovídá název ústavu, ÚEB se zabývá výzkumem biologie rostlin za využití experimentálních přístupů. Rostliny se v ÚEB studují na různých úrovních: od rostlinné buňky či genomu přes rostlinná pletiva nebo orgány až po rostliny a rostlinná společenstva v interakci s jejich prostředím.

Posláním ÚEB je provádět kvalitní základní výzkum, který ale v mnoha případech přechází v prakticky zaměřené bádání. Publikace v prestižních vědeckých časopisech jsou tak doplňovány mezinárodními patenty a šlechtitelskými osvědčeními nových rostlinných odrůd. V laboratořích ÚEB potkáte množství studentů z pražských i olomouckých vysokých škol, stejně tak často ale zaslechnete také angličtinu či španělštinu vědců z různých částí světa. Někteří z nich u nás pracují dlouhodobě, jiní jen po dobu omezenou získaným stipendiem či studijním pobytem.

Pracoviště ÚEB se nacházejí v Praze-Lysolajích, Praze-Krči a v Olomouci. Špičková olomoucká pracoviště jsou také součástí Centra regionu Haná pro zemědělský a biotechnologický výzkum. Olomoučtí kolegové se zabývají analýzou genetické informace více druhů rostlin, pro což vyvinuli převratnou unikátní metodu umožňující „čtení“ rozsáhlých genomů (např. pšenice). Tato metoda je založena na tom, že nejprve jsou rozříděny jednotlivé chromozómy – dědičná informace obsažená v určitém chromozómu již představuje zvládnutelný objem pro vlastní čtení. V Olomouci se dále věnují i výzkumu rostlinných hormonů (především cytokininů a brasinosteroidů). Součástí tohoto výzkumu je i analytické pracoviště, které dokáže stanovit nesmírně nízké koncentrace těchto látek již i na úrovni jednotlivých buněk. Na výzkumu rostlinných cytokininů lze demonstrovat půvab a určitou nevyzpytatelnost vědy, neboť studium hormonů rostlin přineslo trochu nečekaně významný objev nových látek s cytostatickým (protirakovinným) účinkem, které by mohly být velmi významné při výrobě nových účinných léčiv.

Pražské laboratoře se specializují na studium transportu rostlinného hormonu auxinu na buněčné úrovni, což vedlo k objasnění molekulární funkce přenašečů auxinu ven z buňky. Auxin ovšem není jediným studovaným hormonem, vědci v ÚEB se věnují i metabolismu cytokininů a kyseliny abscisové. Významných výsledků bylo v ÚEB dosaženo v oboru regulace růstu a signálních molekul rostlinných buněk, především řízení polarity klíčové pro růst pylové láčky a kořenových vlásků. Dále pak pražští kolegové studují odpověď rostlin vystavených stresovým podmínkám či po jejich napadení viry, bakteriálními a houbovými chorobami. Součástí ÚEB je i laboratoř, která studuje somatickou embryogenezi jehličnanů. V jiné laboratoři využívají výsledky svého základního výzkumu získané při studiu odezvy rostlin na stres způsobený xenobiologií pro ochranu životního prostředí pomocí tzv. fytořemediací. Některé ze získaných výsledků jsou již využívány v praxi.

Úvod

Rozvoj vědy a techniky přispěl rozhodujícím způsobem ke zvýšení životní úrovně lidské společnosti, přinesl však s sebou i řadu negativních jevů. Mezi ně nepochybně patří znečištění životního prostředí celou škálou xenobiotik, látek antropogenního původu, které jsou svou strukturou nebo množstvím pro přírodu cizí. Řada xenobiotik (např. ropné deriváty, polycyklické aromatické uhlovodíky, halogenované uhlovodíky i výbušniny) nachází vzhledem ke svým fyzikálním a chemickým vlastnostem široké uplatnění v průmyslových odvětvích. Naneštěstí však byly tyto látky řadu let používány bez podstatných znalostí o jejich vlastnostech a chování v životním prostředí, nebyl kontrolován ani jejich únik, ani jejich působení na živé i neživé složky životního prostředí. Důsledkem této situace je kontaminace atmosféry, vod i půd. Může být o to závažnější, že tyto látky, kromě své vlastní toxicity, mohou být v biosféře transformovány na metabolity podstatně nebezpečnější, než byl primární polutant. V této formě mohou vstupovat do potravních řetězců organismů včetně člověka a negativně ovlivnit jejich zdravotní stav.

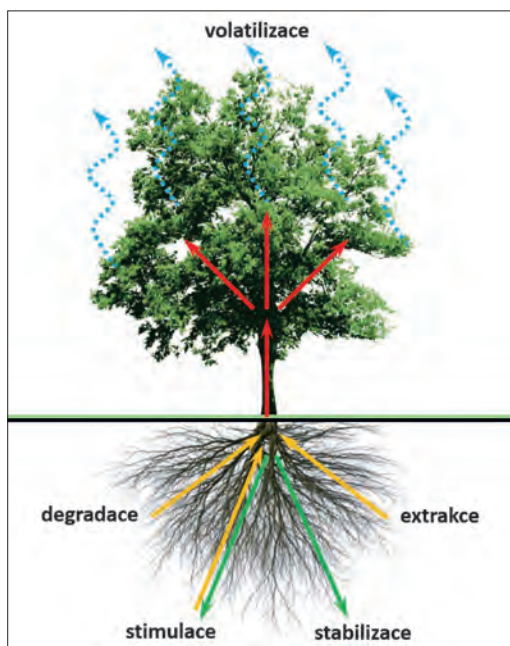
Poznání nebezpečí plynoucích z přítomnosti jak cizorodých organických sloučenin, tak i nepřírodných koncentrací anorganických látek (např. těžkých kovů) v životním prostředí (obr. 1) vedlo k vývoji technologických postupů, které by umožnily jeho ozdravení (dekontaminaci). Byla vyvinuta celá řada *in situ* a *ex situ* technologií, více či méně technicky i ekonomicky náročných, vedoucích k částečnému nebo úplnému odstranění problematického xenobiotika. Bohužel řada těchto technologií představuje hrubý zásah do krajiny, narušení ekosystémů a z toho plynoucí důsledky. Neustále se však vyvíjejí a testují nové technologie, které jsou na rozdíl od klasických remediačních metod, jako je např. spalování či skládkování, k přírodě šetrnější, nenarušují vzhled krajiny a někdy dokonce přispívají k jeho zlepšení. Patří mezi ně i fytoimediační technologie.

Detoxikační procesy v rostlinách

Rostliny jsou, stejně jako všechny ostatní živé organismy, otevřeným systémem, který komunikuje se svým okolím. Kromě látek nezbytných pro svůj vývoj jsou v průběhu života vystaveny vlivu cizorodých látek (xenobiotik) nejrůznější povahy a původu.

Prvořadou snahou každého živého organismu je eliminovat vliv těchto látek, neboť mohou uvnitř organismu působit toxicky. V průběhu fylogenetického vývoje se obecnými evolučními procesy vyvinuly mechanismy umožňující do jisté míry chránit organismy před působením těchto látek. Strategie obrany se liší v závislosti na struktuře dané látky, tedy na jejím chování vůči buňce, a zejména biologickým membránám. Látky, které samovolně neprojdou přes plazmatickou membránu (nejčastěji polární, hydrofilní povahy), jsou pro rostlinu méně nebezpečné, neboť buňka je schopna vzhledem k hydrofobní podstatě buněčných membrán regulovat jejich příjem. Na druhé straně nepolární, lipofilní látky mohou samovolně přejít přes membránu a ovlivňovat metabolismus buňky. V této situaci se buňka snaží vypořádat s existencí xenobiotika mechanismy souhrnně zvaný-

Obr. 1. Areál dolu Turkaňk, Kaňk u Kutné Hory
(foto P. Soudek)



Obr. 2. Procesy probíhající
při fytoremediaci
(zdroj P. Soudek)

mi detoxikační reakce. Těmto procesům je věnována velká pozornost zejména u živočichů a člověka, protože znalost metabolismu xenobiotik je důležitá nejen z hlediska působení toxických látek na organismus, ale také např. z pohledu kinetiky degradace léčiv. Od sedmdesátých let 20. století se v souvislosti s rozšířením herbicidů studuje metabolismus xenobiotik také v rostlinách. Stále však platí, že zatímco u živočichů i četných mikroorganismů jsou metabolické cesty odbourávání řady xenobiotik dobře prozkoumány, u rostlin jsou informace o přeměně cizorodých látek nedostačující.

Způsob, jak xenobiotika vstupují do rostlin a jsou v nich transportována, dosud nebyl zcela osvětlen. Přestože xenobiotika nejsou pro rostlinu prospěšná, vstupují do ní a jsou jí zpracovávána. Principem detoxikace je chemicky pozměnit danou látku tak, aby ji buňka mohla transportovat do kompartmentů, kde neškodí, a tím eliminovat její toxicitu v kritických oblastech. Rostliny jsou schopny, podobně jako játra savců, účelově metabolizovat širokou škálu sloučenin, od vysoce polárních až po nepolární.

Podle typu reakcí a zapojených enzymatických systémů lze detoxikační reakce rozdělit do tří fází:

- derivační,
- konjugační,
- exkretční (kompartmentační).

Fytoremediace

Jak už samotné slovo „fyto-remediace“ napovídá (phyton = řecky rostlina, remediare = latinsky napravit), jde o technologii využívající zelené rostliny nebo rostliny ve spojení s mikroorganismy k rozkladu, fixaci nebo akumulaci různých látek znečišťujících půdu, vodu a vzduch.

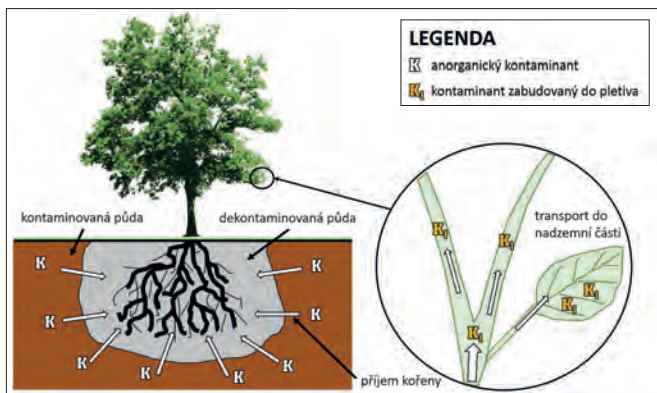
Remediace založená na působení rostlin není zcela novou myšlenkou. Vegetace se často využívá např. podél silnic k zachycení polutantů z provozu aut. Umělé mokřady, rákosová lože a různé další rostlinné systémy se používají na čištění odpadní vody již mnoho let. Moderní fyto-remediace je přesto stále na počátku vývoje, k němuž přispívá hlavně narůstající porozumění molekulárním a biochemickým mechanismům metabolických dějů v rostlinách.

Zelených rostlin využívali už Římané k odvodnění saturačních zón eukalyptem. O akumulaci kovů v listech se vědělo již koncem 19. století. V roce 1976 se objevily první práce zabývající se působením kalové odpadní vody s vyšším obsahem zinku a mědi na obilí a ptačí zob nebo zkoumající vliv SO_2 na sorpci Cd, Pb, Cu a Mn rostlinami. V průběhu osmdesátých a devadesátých let minulého století se začala akumulace kovů a její možné využití blíže zkoumat.

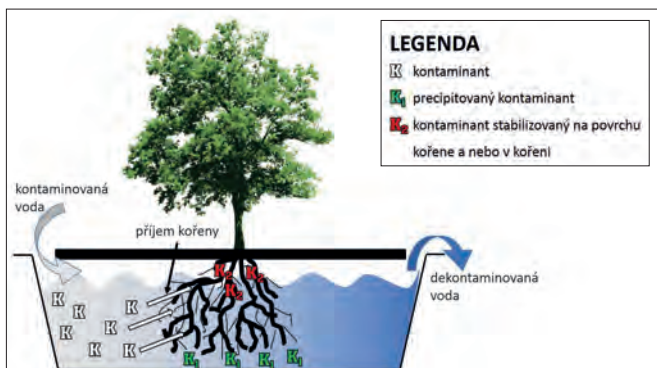
Typy fyto-remediace

Podle různých způsobů uplatnění se fyto-remediace obecně dělí do několika oblastí (obr. 2).

Fytoextrakce (v literatuře též jako fytoakumulace, fytoabsorpce) je metoda, při které rostliny akumulují kontaminant, pak jsou sklizeny a zpracovány (např. termicky, mikrobiálně nebo chemicky, obr. 3). Tímto způsobem se odstraňují hlavně kovy, ale lze



Obr. 3. Fytoextrakce
(zdroj P. Soudek, dle <http://www.itrcweb.org/>)



Obr. 4. Rhizofiltrace
(zdroj P. Soudek, dle <http://www.itrcweb.org/>)



Obr. 5. Rhizofiltrace drenážních vod u Mydlovár v jižních Čechách
(foto P. Soudek)

takto odstraňovat i metaloidy, radionuklidy nebo nekovy. Fytoextrakci se čistí převážně kontaminované půdy, ale je použitelná i na dekontaminaci kalů nebo sedimentů.

Ideální pro fytoextrakci jsou rostliny, které snášejí vysoké koncentrace kovů, akumulují velké množství kovů v nadzemních částech (kontaminované části lze jednoduše sklídit), mají rozsáhlý kořenový systém, rychle rostou a produkují velké množství biomasy. Tyto podmínky částečně splňuje specifická skupina rostlin, které jsou schopny snášet a akumulovat velká množství kovů, a proto byly nazvány hyperakumulátory. Mezi hyperakumulátory patří např. rostliny z čeledi Brassicaceae (brukvovité), kterým byla věnována pozornost v řadě studií. Hyperakumulátory bohužel nemohou být vždy považovány za zcela ideální pro fytoextrakci, a to z několika důvodů: nevýhodou řady těchto rostlin je pomalý růst, malé množství biomasy (a z toho vyplývající menší množství akumulovaného kovu), schopnost akumulovat pouze určitou látku nebo skupinu látek a také fakt, že většinou nejde o rostliny široce rozšířené, ale o rostliny vzácně se vyskytující a rostoucí ve specifických podmínkách, jejichž pěstování ve velkém měřítku je s použitím běžně dostupné zemědělské techniky velice obtížné (a někdy i nemožné). Cestou k získání rostlin s příznivějšími vlastnostmi pro fytoextrakci může být např. rozvíjení tradičních plodin s tendencemi hyperakumulovat kovy nebo křížení hyperakumulátorů s jejich příbuznými, jejichž růst a množství biomasy je vyšší.

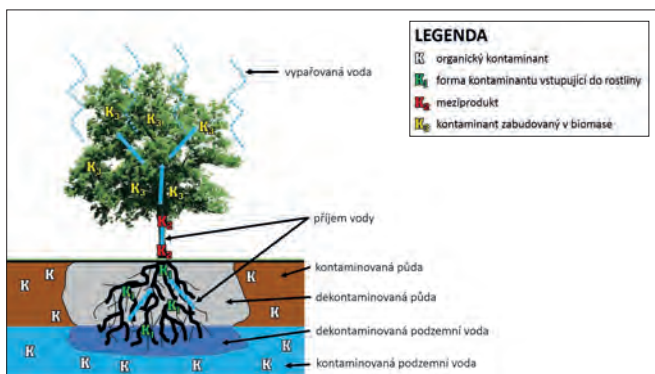
Fytoextrakce může být ekonomicky velice výhodnou technologií, pokud se kovy vyextrahované rostlinami z kontaminované půdy dají získat k opětovnému použití.

Rhizofiltrace je metoda, která využívá k absorpci, koncentraci a precipitaci xenobiotik z proudící vody kořeny živých rostlin. Čištěným médiem je povrchová, odpadní nebo extrahovaná podzemní voda obsahující nízké koncentrace kovů nebo radionuklidů. Rhizofiltrace funguje na podobném principu jako fytoextrakce, s tím rozdílem, že při rhizofiltraci se akumulace kontaminantu objevuje v kořenech nebo v částech rostliny nad vodou, zatímco při fytoextrakci dochází k akumulaci pouze v nadzemních částech rostliny (obr. 4).

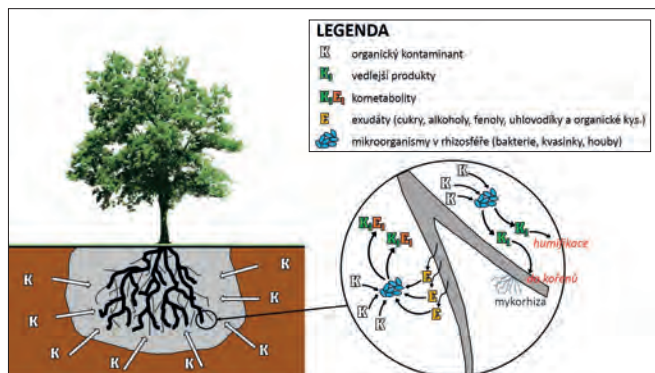
Pro rhizofiltraci je možné využít suchozemské i vodní rostliny. Suchozemské rostliny sice vyžadují větší péči (např. konstrukci plovoucích plošin, které poskytnou rostlinám oporu), ale odstraní více kontaminantu než vodní rostliny, protože jsou většinou větší a mají rozvinutější kořenový systém. Jednou z rostlin, které našly uplatnění při dekontaminaci vod znečištěných kovy a zejména radionuklidy, je *Helianthus annuus L.* (slunečnice roční), jejíž schopnost dekontaminovat vodu znečištěnou radionuklidy byla ověřena např. v pilotním pokusu nedaleko černobylské jaderné elektrárny na Ukrajině. Mezi další hojně využívané rostliny patří mokřadní rostliny jako orobinec, rákos, sítina či ostrice (obr. 5).

Stejně jako u fytoextrakce i v tomto případě je nutné rostliny po dokončení fytoremediace sklídit a kontaminovanou biomasu odpovídajícím způsobem zpracovat.

Fytodegradace je metoda, která využívá rostliny a s nimi asociovanou mikroflóru k degradaci kontaminantů na netoxické látky. Fytodegradaci lze využít při dekontaminaci půdy, sedimentů, kalů, podzemní vody i povrchové vody znečištěné organickými látkami, jako jsou výbušniny, chlorovaná rozpouštědla, herbicidy či insekticidy (obr. 6).



Obr. 6. Fytodegradace
(zdroj P. Soudek, dle <http://www.itrcweb.org/>)



Obr. 7. Rhizodegradace
(zdroj P. Soudek, dle <http://www.itrcweb.org/>)

Pro fytodegradaci je důležitá dosažitelnost organických molekul pro příjem, transport a zpracování metabolismem rostliny či mikrobiálními populacemi spjatými s rostlinou. Dostupnost kontaminantu závisí na jeho relativní lipofilitě, půdním typu (obsahu organické hmoty, pH, obsahu jílu, vlhkosti, typu půdní vody, výměnné iontové kapacitě, obsahu nutrientů) a stáří kontaminantu. Svoji roli hraje i rozpustnost kontaminantu ve vodě, polarita a molekulová hmotnost. Nejlépe jsou rostlinami vstřebávány mírně hydrofobní látky ($\log K_{ow}$ od 0,5 do 3,0). Koefficient oktanol-voda vyjadřuje míru hydrofilie nebo hydrofobity látky. Látky ve vodě velmi dobře rozpustné (hydrofilní) ($\log K_{ow} < 0,5$) se dostatečně nesorbují na kořeny rostliny, ani nedochází k jejich aktivnímu transportu v rostlinných tkáních. Hydrofobní látky ($\log K_{ow} > 3,0$) jsou pevněji vázané na lipidy přítomné na povrchu kořene a jejich vstup do rostliny je tak velice ztížen.

Po vstupu do rostliny mohou být organické sloučeniny přemístěny do jiného rostlinného pletiva, než je pletivo kořene, a postupně odpařeny či částečně nebo úplně degradovány, nebo mohou být transformovány na méně toxické (zejména méně fytotoxické) sloučeniny. Většina organických látek je v rostlinných buňkách do určité míry degradována dříve, než je uložena ve vakuolách nebo vázána v nerozpustných buněčných strukturách, jako je lignin. Rizikem fytodegradace je možný vznik toxických meziproduktů nebo produktů degradace, jejichž přesné složení není známo, neznáme tedy ani jejich možný dopad na životní prostředí. Podmínkou

pro úspěšné využití fytodegradace je, aby produktem metabolických aktivit byly látky netoxické nejen pro rostliny, ale i pro ostatní organismy.

Rostliny jsou schopny metabolizovat organické látky pomocí enzymatického aparátu zapojeného do detoxikační reakce. Měřením enzymových aktivit během transformace kontaminantů smíšených s půdními vzorky bylo identifikováno pět enzymových systémů, které se pravděpodobně významně podílejí na přeměně organických látek v životním prostředí. Jsou to dehalogenázy, nitroreduktázy, peroxidázy, lakáza (fenoloxidáza) a nitrilázy. Nejvýznamnější pro fytodegradaci výbušnin, mezi které patří i nitroestery, jsou nitroreduktázy.

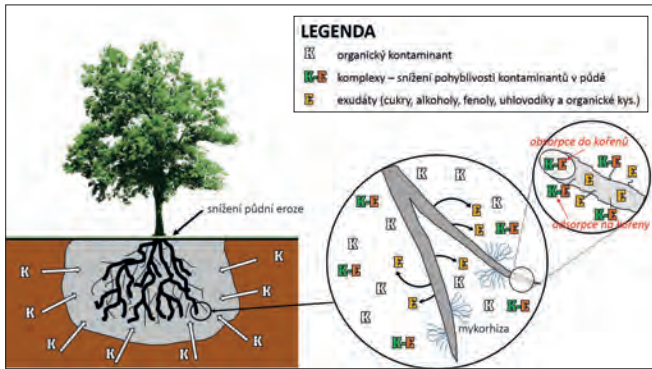
Rhizodegradace (rostlinami podporovaná bioremediace) je metoda, kdy jsou organické látky v půdě často rozloženy na jednodušší látky nebo kompletně mineralizovány na CO_2 a H_2O pomocí bakterií, které se v půdě běžně vyskytují a jejichž množství a různorodost mohou být ovlivněny přítomností kořenů rostlin a jejich působením. Rhizodegradace využívá stimulaci mikrobiální degradace uvolňováním exudátů nebo enzymů v kořenové zóně (obr. 7). Exudáty jsou látky produkované rostlinou (rostlina takto vyloučí až 20 % látek vzniklých při fotosyntéze), které mohou být různého složení (např. fenoly, organické kyseliny, alkoholy, bílkoviny, steroly, růstové faktory, nukleotidy, enzymy a další sloučeniny) a které podporují růst a metabolické aktivity mikrobiálních populací v kořenové zóně (rhizosféře). Díky této podpoře je velikost mikrobiální populace a její aktivita několikanásobně vyšší v rhizosféře než v půdě, která není v kontaktu s kořeny. Množství a typ exudátů závisí na druhu rostliny, stadiu jejího vývoje a na řadě charakteristik daného místa – např. na typu půdy, množství nutrientů, pH, dostupnosti vody, teplotě, stavu kyslíku, intenzitě světla a koncentraci atmosférického CO_2 .

Médiem čištěným pomocí rhizodegradace je hlavně půda, přestože se stimulace mikrobiální aktivity může projevit i v kořenové zóně vodních rostlin. Tímto typem fytoremediace lze odstraňovat z kontaminovaného média širokou škálu kontaminantů – např. ropné uhlovodíky, polyaromatické uhlovodíky, pesticidy, chlorovaná rozpouštědla, polychlorované bifenyly a surfaktanty.

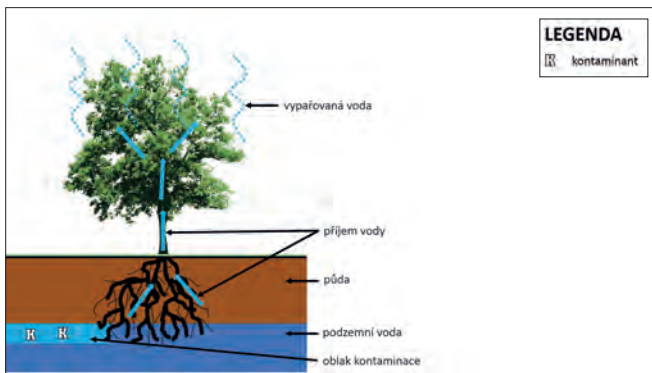
Výhodou rhizodegradace je, že není nutné rostliny sklízet a zpracovávat je, protože v nich nedochází k akumulaci kontaminantu. Množství půdy ovlivněné kořeny je jen malé ve srovnání s celkovým množstvím půdy, neboť sféra vlivu kořene (rhizosféra) se nalézá jen asi 1–3 mm od kořene, a tak je rhizodegradace limitována rychlostí růstu kořene a hloubkou kořenové zóny, která závisí nejen na druhu rostliny, ale také na půdní vlhkosti, struktuře a na koncentraci kontaminantu.

Fytostabilizace využívá vegetaci ke snížení mobility kontaminantů (hlavně se jedná o kovy) – zabraňuje jejich migraci do podzemní vody (prosakování), jejich transportu větrem a jejich vstupu do potravního řetězce. Transport kontaminantu v půdě, sedimentu nebo v kalu může být snížen např. absorpcí a akumulací kontaminantu kořeny, adsorpcí kontaminantu na kořenech, oxidací či redukcí, převedením na nerozpustnou formu (např. srážením) nebo zabudováním do ligninu (týká se organických látek) či do humusové složky půdy při procesu humifikace (obr. 8).

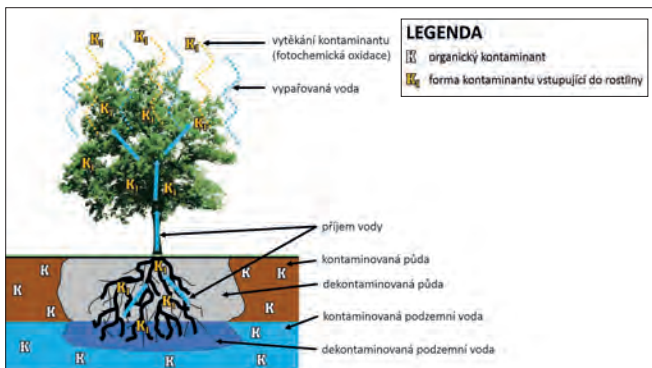
Důležité je zdůraznit vliv celé řady půdních podmínek na rozpustnost a mobilitu kontaminantu – např. mikroby rozkládající kořenové exudáty produkují CO_2 , čímž se



Obr. 8. Fytostabilizace (zdroj P. Soudek, dle <http://www.itrcweb.org/>)



Obr. 9. Hydraulická kontrola (zdroj P. Soudek, dle E. Pilow-Smits, DOI: 10.1146/annurev-arplant.56.032604.144214)



Obr. 10. Fytovolatilizace (zdroj P. Soudek, dle <http://www.itrcweb.org/>)

mění pH půdy a následně i rozpustnost a mobilita kovů a je tím ovlivněna i disociace organických molekul. V rostlinami ovlivněném půdním prostředí mohou kovy měnit oxidační stav a přecházet tak z rozpustné do nerozpustné formy. Stejně jako v ostatních oblastech fytoremediace je tedy i zde velmi důležitá znalost chemie kořenové zóny, kořenových exudátů, kontaminantů, hnojiv nebo půdních přísad, neboť všechny tyto faktory mají vliv na děje, které se ve znečištěném médiu mohou odehrávat.

Fytostabilizace přináší mnoho výhod – kontaminovaná půda se nemusí těžit a odvázet, vegetaci lze použít *in situ*, což představuje ekonomickou úsporu a také menší stupeň narušení krajiny. Rostliny není nutné sklízet a dále zpracovávat, stejně jako u rhizodegradace. Znovuosídlení kontaminované lokality vegetací přispívá k obnovení ekosystému, může snižovat vodní a větrnou erozi půdy a také snižovat nebo zamezovat prosakování. Nevýhodou fytostabilizace je dlouhá doba remediace, protože kontaminant není odstraňován, ale zůstává na místě, proto je nutné zajistit, aby v budoucnu nedošlo k opětovnému uvolnění kontaminantu do prostředí. Vegetaci užitou pro fytostabilizaci je v řadě případů nutné podpořit hnojením nebo modifikací půdních vlastností pomocí různých látek aplikovaných do půdy.

Pro fytostabilizaci jsou nevhodné rostliny, ve kterých dochází k transportu kontaminantu do nadzemních částí a v důsledku toho mohou vstupovat do potravního řetězce. Pro fytostabilizaci jsou využitelné rostliny schopné snášet danou koncentraci kontaminantu, mající kořeny zasahující do kontaminované oblasti a schopné změnit biologické, chemické nebo fyzikální podmínky v půdě (samy o sobě nebo ve spojení s půdními přísadkami, jako jsou např. komposty, kaly či nutrienty).

Hydraulická kontrola využívá rostliny, které přijímají a spotřebovávají velké množství vody, k usměrňování a kontrole pohybu podzemní a půdní vody. Hydraulická kontrola zabraňuje infiltraci a prosakování a snižuje tak pohyb kontaminantů z povrchových vod do vod podzemních (obr. 9).

Rychlost, jakou rostlina vstřebává vodu, a rychlost transpirace jsou velmi důležitými charakteristikami pro hydraulickou kontrolu i remediaci podzemní vody. Tyto faktory závisí na druhu rostliny, jejím stáří, biomase, velikosti a ploše povrchu listu. Svůj vliv hrají i klimatické faktory, jako je teplota, množství srážek, vlhkost a rychlost větru. Všechny tyto faktory je nutno brát v úvahu, rozhodujeme-li o aplikaci fytoremediace (netýká se jen hydraulické kontroly, ale obecně všech typů fytoremediace) na dané lokalitě.

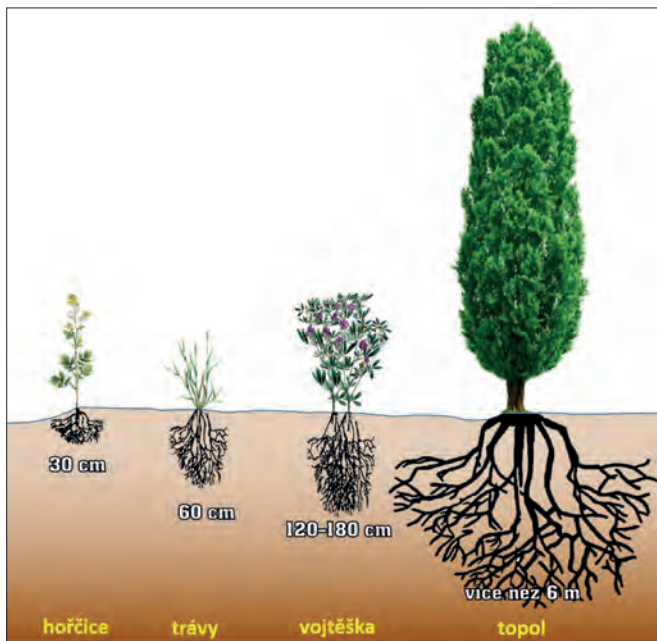
Pro hydraulickou kontrolu se nejlépe osvědčily rostliny nebo stromy s dlouhým kořenem schopné přijímat velká množství vody, jako jsou např. bavlík, vrba či topol, které byly již několikrát s úspěchem využity při dekontaminaci podzemní vody kontaminované těžkými kovy, nutrienty nebo pesticidy.

Fytovolatilizace je poněkud kontroverzní metoda, při které je kontaminant přijat rostlinou a poté je uvolněn do ovzduší těkavý produkt degradace kontaminantu nebo těkavá forma původně netěkavého kontaminantu. Aby byla fytovolatilizace účinná, musí být produkt degradace nebo těkavá forma kontaminantu méně toxické než původní látka (obr. 10).

Nejvíce se fytovolatilizace osvědčila při odstraňování těkavých organických látek (např. TCE) a rozpustných anorganických kontaminantů (např. Hg, Se) z podzemní vody, půdy, sedimentu nebo kalu.

Ostatní možné aplikace fytoremediace

Kromě těchto základních typů fytoremediace existují ještě další možnosti aplikace fytoremediace. Jednou z nich jsou umělé mokřady, které se používají pro čištění



Obr. 11. Porovnání délky kořene různých rostlinných druhů (zdroj P. Soudek dle EPA 542-R-01-006 /2001/, <http://www.epa.gov/tio/download/remed/phyto-remprimer.pdf>)



Obr. 12. Pole lnu setého u Mydlovar v Jižních Čechách (foto P. Soudek)

povrchové vody, odpadní vody, splašků, odpadní vody z čistíren, kyselé důlní vody nebo průsaků ze skládek kontaminovaných organickými i anorganickými látkami. V řadě experimentů byly umělé mokřady využity k čištění vody kontaminované výbušninami.

Výběr rostliny vhodné pro fytoremediaci

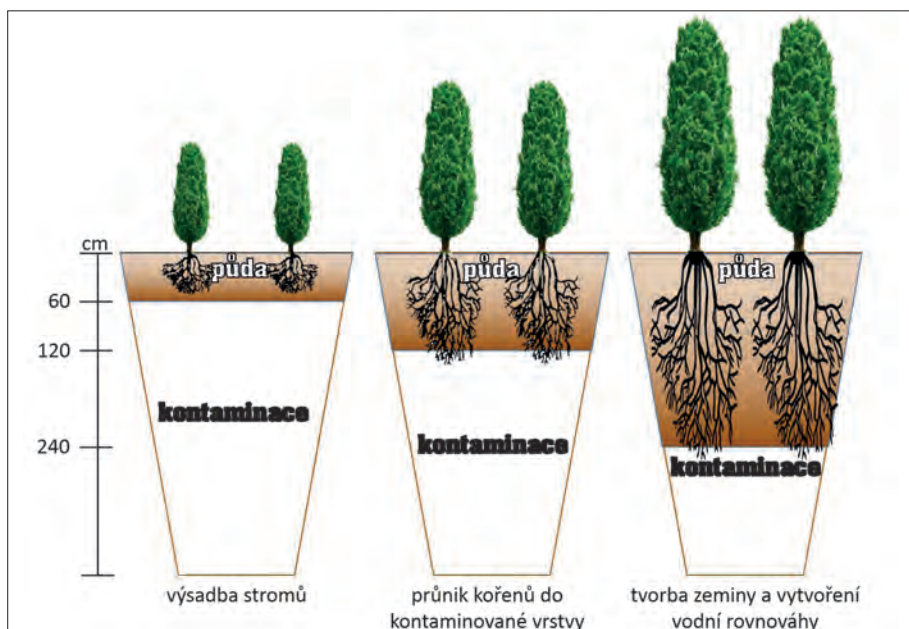
Nejdůležitější charakteristikou rostliny pro fytoremediaci je morfologie kořene a jeho délka. Mezi rostlinami pro tento účel používanými najdeme jak rostliny s vláknitým kořenovým systémem (trávy), který umožňuje díky velkému povrchu kořenů maximální kontakt s půdou, tak i rostliny, v jejichž kořenovém systému dominuje centrální kořen (řada hyperakumulátorů). Délka kořene se u jednotlivých druhů rostlin pohybuje v širokém rozmezí (viz obr. 11), ale i u jednoho druhu najdeme významné odlišnosti v délce kořene podle podmínek na dané lokalitě, jako je hloubka vody, obsah půdní vody, struktura půdy, úrodnost půdy, koncentrace kontaminantu a další.

Dalším kritériem pro výběr rostliny vhodné pro fytoremediaci je objem biomasy. Přednost mají rostliny s větším objemem biomasy. Mohou pojmout více kovů při fytoextrakci, více asimilují a metabolizují kontaminant a produkují více exudátů a enzymů.

Hlavní pozornost je v oblasti fytoremediace věnována rostlinám široce rozšířeným, snadno dostupným a dobře rostoucím (obr. 12). Častěji jsou používány suchozemské rostliny, protože mají vyvinutější kořenový systém než vodní rostliny. Je důležité zvolit rostlinu vhodnou pro dané klima a půdní podmínky a také dostatečně schopnou fytoremediace. U každé rostliny se také zvažuje její odolnost vůči chorobám, horku, chladu, hmyzu, suchu, chemikáliím a stresu.

Výhody fytoremediace

- Velká ekonomická úspora ve srovnání s tradičními technologiemi.
- Lze ji aplikovat na širokou škálu kontaminantů.
- Lze ji použít *in situ*, aniž by bylo nutné kontaminovanou půdu pomocí těžké techniky těžít a přemísťovat. Stejně tak je možné čistit kontaminovanou vodu bez použití čerpadel.
- Je ohleduplná vůči životnímu prostředí, nenarušuje krajinu ani s ní spojené ekosystémy, a proto je veřejností dobře přijímána.
- Čerpá energii ze slunečního záření, a proto ji lze považovat za technologii napomáhající snižovat emise skleníkových plynů; funguje bez čerpadel či motorů, které by svými emisemi znečišťovaly životní prostředí. Rostliny navíc při fotosyntéze spotřebovávají jeden ze skleníkových plynů – oxid uhličitý.
- Využívá dobře zvládnutých agrotechnologií, které se běžně používají v zemědělství.
- Nemá negativní dopad na úrodnost a strukturu půdy, přítomnost rostliny může naopak zlepšit její vlastnosti.
- Vegetace přispívá k obnově ploch, které byly zničeny v důsledku lidské činnosti. Organické kontaminanty mohou být zcela mineralizovány (rozloženy na CO_2 a H_2O), množství solí v půdě může být sníženo pomocí halofytů (rostliny tolerující velké množství solí) a na lokalitu se mohou vrátit původní rostlinné druhy.
- Rostliny jsou pro danou lokalitu přínosem po celou dobu svého vývoje a růstu. Sazenice mohou chránit půdu před prosakováním vody a zabraňují tak šíření



Obr. 13. Vliv různých stadií vegetace na fytoremediaci (zdroj P. Soudek, dle EPA 542-R-01-006 /2001/, <http://www.epa.gov/tio/download/remed/phytorempriemer.pdf>)

kontaminace. Jak rostlina dospívá, rozvíjí se její kořenový systém a v okamžiku, kdy kořeny zasáhnou do kontaminované oblasti, dochází k remediaci kontaminantu (pomocí fytodegradace, rhizodegradace nebo fytovolatilizace). Plně vyvinuté rostliny mohou fungovat i jako hydraulická kontrola nebo hydrostatická bariéra zabráňující šíření kontaminace (viz obr. 13).

- Může být velice užitečnou součástí dekontaminačních technologií, které kombinují tradiční a nové remediační postupy s cílem snížit množství kontaminovaného materiálu, který je třeba dále zpracovat (např. uložit na skládku nebo spálit).
- Ve srovnání s jinými remediačními technologiemi vzniká menší množství sekundárních odpadů, které by vyžadovaly další zpracování nebo odstranění.
- Vegetace také může omezit erozi a odnášení prachu větrem, nebo jim dokonce zabránit.
- Rostliny mohou být použity jako indikátory rozsahu kontaminace i úspěšnosti remediace. Polní rostliny mohou sloužit jako biotest přinášející přímé a na první pohled viditelné informace o stavu dané lokality (množství arzenu, chromu nebo mědi v půdě, možné dopady na životní prostředí např. při aplikaci kalů do půdy, informace o znečištění ovzduší – analýza rostlinných tkání nebo částic zachycených na listech). Přítomnost některých rostlinných druhů (např. některých hyperakumulátorů) může upozornit na ložisko rudy, některé rostlinné druhy zas mohou být klíčem k nalezení podzemní vody a zjištění její hloubky.
- Remediační technologie vhodná pro velké plochy s relativně tenkou vrstvou

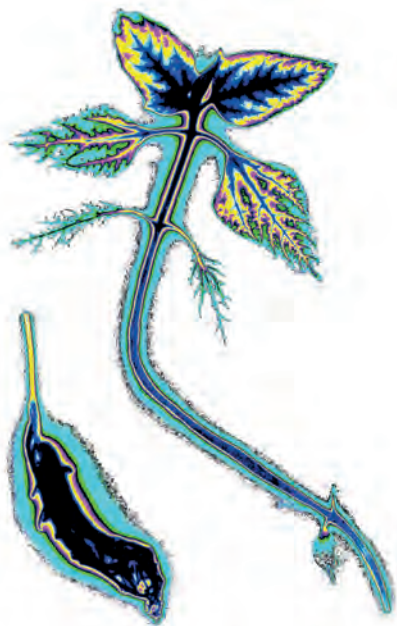
kontaminované půdy nebo velká množství vod s nízkou koncentrací znečištění v dosahu kořenů rostlin. Kontaminovaná půda či voda ve větších hloubkách, vysoké koncentrace kontaminantu nebo malá množství půdy nebo vody se dají efektivněji vyčistit klasickými technologiemi.

Nevýhody fytoremedieace

- Lze ji použít jedině tehdy, je-li kontaminant v zóně vlivu kořenů rostliny. Nedosahuje-li rostlina svými kořeny do kontaminované zóny, je třeba přemístit kontaminované médium do kontaktu s rostlinou (např. hlubokou orbou, která půdu z větších hloubek přenesne blíže k povrchu, kde bude dosažitelná i pro rostliny s mělkými kořeny; podzemní vodu mimo dosah kořenů je nutno čerpat pomocí extrakčních studní nebo je možné tuto vodu použít na zavlažování rostlin).
- Většinou pomalý průběh (i několik vegetačních období), protože je závislá na rychlosti růstu rostlin, rychlosti vývoje jejich kořenového systému, je limitována klimatickými a geologickými podmínkami (teplotou, množstvím srážek, větrem, intenzitou slunečního záření, délkou vegetační sezóny, nadmořskou výškou, typem půdy i dostupností dané lokality pro zemědělské vybavení). Rostliny používané pro fytoremediační účely mohou být poškozeny nejen vlivem nepříznivého počasí, ale i v důsledku chorob nebo působením škůdců. Zatímco vytěžení, odvoz nebo spálení kontaminovaného média trvá týdny až měsíce, vyčištění kontaminovaného média fytoremediací může trvat i několik let (např. doba potřebná k odstranění kovů může dosáhnout i 10–20 let). Proto se u lokalit představujících akutní riziko pro člověka nebo ekosystém volí často jiná remediační technologie než fytoremedieace.
- Riziko přestupu kontaminantu do jiného média nebo do potravního řetězce. Tomu je nutno předcházet zvláště tehdy, když probíhá transformace kontaminantu na toxičtější, mobilní nebo dobře biodostupnou formu. Klíčem k rozhodnutí, zda lze fytoremediaci aplikovat, by měla být analýza metabolických cest polutantu v rostlině.
- V případě, kdy nedochází k degradaci kontaminantu, ale k jeho ukládání v rostlinných pletivech, mohou nadzemní části rostliny obsahovat toxické koncentrace kontaminantů a je nutné zamezit zvěři v přístupu k rostlinám a sklizený rostlinný materiál dále zpracovat, případně provést analýzu rizik, což znamená další náklady navíc. Je-li kontaminant ukládán v listech, může se znovu dostat do životního prostředí při jejich opadávání. Stejně riziko je také spojeno s ukládáním kontaminantů v palivovém dřevu.
- Díky fytoremediaci může dojít k rozšíření nevhodných nebo invazivních rostlinných druhů, které mohou nepříznivě ovlivnit místní ekosystém. Dalším možným problémem způsobeným nevhodnými druhy rostlin může být produkce pylů způsobujících alergie, rostlinný odpad, jako je spadané listí nebo uvolňovaná semena, a také pach z rozkladu vegetace nebo pach rostlin v některém vývojovém stadiu.
- Vysoké koncentrace kontaminantu mohou být fytotoxické nebo mohou brzdit růst rostliny. Jaká koncentrace je fytotoxická, závisí na dané rostlině, vlastnostech půdy, klimatu a na biodostupnosti kontaminantu. Je nutné provést



Obr. 14. Parcelkové pokusy s akumulací kovů v lokalitě Kaňk (foto T. Vaněk)



Obr. 15. Sledování akumulace radionuklidu kadmia pomocí autoradiografie (foto P. Soudek)

předběžné studie fytoxicity a přesvědčit se, že vybraná rostlina je schopna v dané koncentraci kontaminantu přežít a růst.

- Různé rostlinné druhy, ale i odrůdy jednoho druhu se významně liší ve využitelnosti pro účely fytoremediace. Nikdy nelze předem říci, jak bude která rostlina reagovat na kontaminant a jeho koncentraci, jak bude kontaminant přijímat a metabolizovat, ani jak bude růst za specifických půdních a klimatických podmínek. Nelze navrhnout nějaký univerzální model fytoremediace, jde o technologii specifickou pro dané místo a typ kontaminace. O tom, zda je, či není fytoremediace vhodnou technologií pro danou lokalitu, je možné rozhodnout na základě předběžných studií.
- Pěstování rostlin často vyžaduje velkou péči, zvláště jsou-li rostliny ve stresu kvůli klimatickým vlivům, škůdcům nebo samotné přítomnosti kontaminantu. Někdy je nutné pro zvýšení efektivity fytoremediace použít hnojiva, zelené hnojení nebo povrchově aktivní látky či zpracovat kontaminovanou půdu, např. orbou. Látky přidávané do půdy (hnojiva, kompost atd.) i obdělávací práce mohou mít nežádoucí vliv na mobilitu kontaminantu. Například hnojiva obsahující amoniak snižují pH, což zvyšuje mobilitu kovů a jejich proskávání do podzemní vody. Je třeba zvážit možné důsledky přidávání látek do půdy ještě před jejich aplikací.
- Fytoremediace vyžaduje větší prostor než jiné remediační metody, což někdy může být problematické.
- Je nutné si uvědomit, že fytoremediace je technologií velmi mladou, proto je nutný rozsáhlý základní výzkum, který by umožnil vybrat „na míru“ druhy rostlin potřebné k odstranění znečištění určité lokality v závislosti na druhu znečištění a typu lokality.

Praktické využití

Fytoremediace je progresivně se rozvíjející dekontaminační technologií, která byla s úspěchem aplikována na různých typech lokalit, jako jsou např. skládky průmyslového i komunálního odpadu, vojenské základny, sklady paliv, benzinové pumpy, muniční závody či čističky odpadních vod, a ukázala se být velice výhodnou technologií tam, kde je znečištění území rozptýlené a použití tradičních metod, jako je vykopání a dekontaminace na skládkách, by bylo pro tyto lokality neekonomické. Výsledky těchto aplikací a celé řady dalších laboratorních i polních pokusů potvrzují význam fytoremediace a možnost jejího využití při velkoplošném odstraňování škodlivin. Je však nutný rozsáhlý výzkum, který by umožnil vybrat „na míru“ druhy rostlin vhodné pro odstranění znečištění určité lokality v závislosti na druhu znečištění a typu lokality. Nejnovější výsledky získané pomocí kultur rostlinných buněk kultivovaných *in vitro* a pomocí genových manipulací jsou, co se týče budoucího využití fytoremediace v širším měřítku, více než slibné.

V současné době jsou testovány možnosti snížení množství polutantů v odpadních vodách za použití kořenových čistíren odpadních vod (KČOV), které fungují na principu rhizofiltrace. Odstraňovanými látkami byly výbušniny a uran a jeho rozpadové produkty. Další možností uplatnění kořenových čistíren by mohlo být odstraňování farmak z odpadních vod. Zde jsou v současnosti prováděny nejrůz-



Obr. 16. Opuštěná výrobní trinitrotoluenu
(foto T. Vaněk)



Obr. 17. Studium fytoremediace TNT
v modulárním kontejnerovém systému
(foto T. Vaněk)



Obr. 18. Maloplošná kořenová čistírna odpadních
vod po výrobě výbušnin
(foto T. Vaněk)

nější experimenty na širokém souboru rostlinných kultur (včetně tzv. *hairy-root* kultur pěstovaných *in vitro*).

Studium fytoremediace na Ústavu experimentální botaniky

V naší Laboratoři rostlinných biotechnologií se studiem metabolismu odbourávání organických xenobiotik a akumulace kovů a radionuklidů v rostlinách zabýváme již od roku 1993. Některé studované oblasti jsou detailně popsány v dalším textu.

Těžké kovy

V oblasti anorganických sloučenin se naše laboratoř zaměřuje na akumulaci těžkých kovů i radionuklidů. V oblasti těžkých kovů jde především o akumulaci kadmia, olova, zinku, mědi a niklu (obr. 14). V poslední době jsme se zaměřili také na prvky vzácných zemin, které mají široké využití v moderní elektronice a součástkách přístrojů pro využití alternativních zdrojů energie. Pomocí námi vyvinuté metodiky autoradiografie sledujeme distribuci těžkých kovů v rostlině, protože naším cílem je akumulace především v nadzemní části (obr. 15). Dále sledujeme vliv těžkých kovů na fyziologické a morfologické parametry rostlin, což jsou důležité indikátory rostlinného stresu. Oxidativní stres významně ovlivňuje příjem kontaminantů rostlinami a je tak přímo zodpovědný za účinnost celého systému. Ve svých experimentech sledujeme také cestu úpravy a zlepšení kultivačních podmínek. Jednou z testovaných možností je např. přidavek dřevěného uhlí, které má za následek vyšší odolnost rostlin proti patogenům a proti vyšším koncentracím kontaminantů.

Radionuklidy

Specifickou částí studia anorganických sloučenin jsou radionuklidy. Z chemického hlediska se neliší od příslušných neradioaktivních prvků, proto je rostliny nedokáží rozeznat. Důležitou vlastností radionuklidů je jejich vyzařování radioaktivního záření. Proto jsou pro životní prostředí nebezpečné v mnohem nižších koncentracích. Jejich odstranění z půdy je problematické, proto se naše laboratoř zaměřuje především na jejich stabilizaci v půdě. Sledujeme jejich transport rostlinami a možnosti opětovné kontaminace povrchových vrstev půdy. V laboratoři se náš hlavní zájem soustřeďuje především na akumulaci uranu a thoria, prvků v současnosti hojně využívaných v jaderné energetice. Testujeme schopnost rostlin přijímat tyto prvky, ukládat je ve svém těle a reagovat na změnu podmínek kultivace. V dalším kroku se zaměřujeme na vliv uranu a thoria na tvorbu oxidativního stresu, který je zkoumán až na úrovni genů regulujících tyto procesy.

Výbušniny

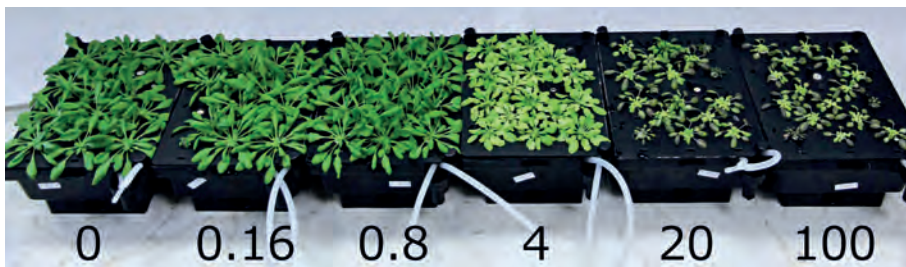
Výbušniny jsou chemické sloučeniny nebo jejich směsi, které jsou schopny velmi prudce zreagovat ve zlomku vteřiny za vývoje velkého množství plynů a tepla. Chemicky se jedná převážně o organické molekuly bohaté dusíkem vázaným v různých formách. Běžné jsou organické nitráty různých alkoholů, jako je např. nitroglycerin (glyceroltrinitrát, GTN) nebo pentaerythritoltetranitrát (PETN). Další skupinou jsou aromatické sloučeniny obsahující v molekule několik nitroskupin, např. vý-



OBR. 19. *Campanula rotundifolia*.
Vlevo kvetoucí rostlina vpravo *in vitro* kultura
(foto R. Podlipná)



Obr. 20. *Plantago lanceolata*.
Vlevo celá rostlina, vpravo *in vitro* kultura
(foto R. Podlipná)



Obr. 21. Studium toxicity nanočástic ZnO na rostliny
Arabidopsis thaliana
(foto P. Landa)

bušniny trinitrotoluen (TNT) nebo kyselina pikrová (2,4,6-trinitrofenol, TNF). Mezi běžné výbušniny patří dále skupina cyklických nitraminů, které mají nitroskupinu vázanou na dusík heterocyklu. Příkladem takového výbušniny je RDX neboli hexogen (hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazin). Všechny tyto látky mají sice výborné výbušné vlastnosti, avšak na živé organismy působí toxicky. Nebezpečí hrozí zejména v souvislosti s jejich rozšířením jako vojenské nebo průmyslové výbušniny. Nejčastěji jsou kontaminovány prostory kolem současných či bývalých továren na výbušniny, kolem vojenských skladů, dále vojenské výcvikové prostory a prostory dobývané s použitím výbušnin (obr. 16).

Řada těchto lokalit se nachází i v České republice, protože látky tohoto typu zde byly a jsou vyráběny již od dob rakousko-uherské monarchie. Z těchto důvodů byl v naší laboratoři studován jak jejich metabolismus v těle rostlin, tak i možnosti rostlin při jejich odstraňování z půdy a kontaminovaných vod.

V průběhu experimentů byl sledován metabolismus trinitrotoluenu v rostlinách a popsány jeho degradační produkty, stejně tak jako v případě glyceroltrinitrátu a pentaerythritoltetranitrátu. Praktické ověření prokázalo, že studované výbušniny lze pomocí rostlin odstranit z odpadních vod po jejich výrobě (obr. 17 a 18).

„Nové“ kontaminanty

Pojmem „nový“ environmentální polutant se označují antropogenní kontaminanty, které jsou uvolňovány do životního prostředí řádově desítky let, nicméně o jejich osud a působení na přírodu se lidé začali zajímat relativně nedávno. Jedná se především o tzv. perzistentní organické polutanty (POP). Do této skupiny patří již řadu let nechvalně známé DDT, dále např. polychlorované bifenyls (PCB), polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH) a také celá řada organických pesticidů. V posledních letech se k novým polutantům přidaly polybromované retardátory hoření (BFR), přípravky pro osobní hygienu, detergenty, léčiva a v diskusích jsou i nanočástice.

V naší laboratoři se dlouhodobě zabýváme studiem metabolismu v rostlinách, a to ze dvou hledisek. Jedním je možnost odstraňování těchto látek z kontaminovaného životního prostředí pomocí rostlin, druhým pak potenciální riziko vstupu těchto látek do potravního řetězce.

Léčiva se svým vstupem do životního prostředí poněkud liší od tradičních polutantů. Primárním zdrojem odpadních léčiv a jejich metabolitů jsou pacienti. Aktivní látky jsou po užití léku z těla vylučovány buď v nezměněné podobě, nebo ve formě metabolitů. V čistírnách odpadních vod (ČOV) však nejsou některé z nich dostatečně zachycovány a přecházejí tak dále do recipientu, kde následně mohou působit na říční biocenózu a také se transportovat do dalších částí ekosystému. Není tak vyloučena ani kontaminace podzemních vod a pitných zdrojů, čímž se vlastně pomyslný koloběh těchto látek uzavírá.

Pro studium metabolismu **humánních léčiv** v rostlinách byla vybrána nejpožívanější protizánětlivá léčiva (antiflogistika), která jsou běžně aplikována v humánní i veterinární medicíně. Jednalo se o ibuprofen, ketoprofen, naproxen a diklofenak. Jako modelové rostliny byly vybrány rostliny huseníček rolní (*Arabidopsis thaliana*) a rákos (*Phragmites australis*). Studium probíhalo napřed v laboratorních podmínkách, kde byla sledována rychlost metabolismu a vzniklé produkty. Například v případě ibuprofenu bylo identifikováno celkem 300 metabolitů.



Obr. 22. Lokalita bývalé
koksovny Poldi Kladno
(foto T. Vaněk)



Obr. 23. Topoly
v kontrolním substrátu
(vlevo) a v půdě z lokality
(vpravo)
(foto Š. Petrová)



Obr. 24. Testovací plocha
v areálu Poldi Kladno
(foto Š. Petrová)

Současně probíhá identifikace genové odezvy rostlin *Arabidopsis* na přítomnost tohoto léčiva. V dalším kroku pak byla sledována schopnost odstranění těchto látek v reálných podmínkách kořenové čistírny.

Antihelmintika představují rozsáhlou skupinu **veterinárních léčiv**, a tím i vysoké zatížení životního prostředí. Do životního prostředí vstupují převážně s exkrementy právě léčených zvířat. Mohou způsobovat mnoho nežádoucích účinků v ekosystému, ovlivňovat necílové živočišné organismy, popřípadě se akumulovat v rostlinách. Po opětovné konzumaci těchto rostlin hospodářskými zvířaty na pastvě může u parazitických červů dojít k rozvoji rezistence. Naše práce byla zaměřena mimo jiné na studium biotransformace často používaných antihelmintik flubendazolu, albendazolu, fenbendazolu, ivermektinu a monepantelu v typických lučních květinách zvonku okrouhlostém (*Campanula rotundifolia*, obr. 19) a jitroceli kopinatém (*Plantago lanceolata*, obr. 20), které mohou na pastvách často přijít do kontaktu s antihelmintiky v exkrementech hospodářských zvířat. Jako *in vitro* modely byly použity buněčné suspenze zvonku okrouhlostého a jitrocele kopinatého, dále pak *in vitro* regeneranty jitrocele kopinatého. Nebyl nalezen žádný toxický efekt antihelmintik na rostliny. Rostliny byly schopny metabolizovat antihelmintika do široké škály různých metabolitů, z nichž část může být opět rozložena na aktivní látky, které mohou negativně ovlivnit ekosystém. V současnosti je studována stresová odpověď rostlin na přítomnost antihelmintik, aktivita antioxidantních proteinů, obsah prolinu, obsah fotosynteticky aktivních pigmentů a změny na úrovni proteomu a genomu.

Nanočástice jsou čím dál běžnější součástí spotřebního zboží, nanotechnologie je rychle se rozvíjející obor. S tím je ovšem spojen možný nežádoucí vliv nanočástic na životní prostředí a lidské zdraví – proto také probíhá intenzivní výzkum těchto vlivů. Pochopitelně se zaměřuje i na rostliny jako nedílnou součást ekosystému. Řada studií prokázala negativní (v některých případech ale i pozitivní) vliv nanočástic na rostliny. Samozřejmě záleží na testovaných koncentracích, které jsou často vyšší než předpokládané koncentrace nanočástic v prostředí. Přesto je ale takový výzkum důležitý pro posouzení možných rizik. Během našeho výzkumu jsme zjistili, že přítomnost některých nanočástic (např. TiO_2 , Al_2O_3 , MnO_2) rostlinám nijak nebrání v klíčení a růstu, a naopak jiné nanočástice jsou výrazně toxické (ZnO , CuO). Nanočástice stříbra klíčení rostlin dokonce urychlovaly. Další otázkou je, jakým způsobem nanočástice působí. Jedním z vysvětlení je, že za účinky nanočástic je jejich nepatrná velikost a s ní spojené unikátní fyzikální vlastnosti. Naproti tomu zaznívají názory, že toxicita nanočástic je ovlivněna především chemickými vlastnostmi nanočástic. Výsledky získané v našich laboratořích naznačují, že velikost a tvar částic není rozhodující. Při sledování vlivu nanočástic na transkripci rostlin jsme také zjistili, že nanočástice TiO_2 genovou expresi téměř neovlivňují, zatímco nanočástice ZnO velmi výrazně. Z porovnání transkriptomické odezvy rostlin na přítomnost nanočástic ZnO , nečásticové formy ZnO a Zn iontů jsme usoudili, že uvolňování Zn iontů z částic ZnO je zodpovědné za toxický efekt nanočástic ZnO (obr. 21).

V současnosti pracujeme na vlivu nanočástic na hladinu rostlinných růstových regulátorů, na tvorbu chlorofylu a karotenoidů, na možné akumulaci nanočástic rostlinami a možnosti využití fytoremediací u půd a vod kontaminovaných nanočásticemi.



Obr. 25. Velkoplošný experiment s akumulací radionuklidů rostlinami lnu (foto T. Vaněk)



Obr. 26. *In vitro* kultivované rostlinky rákosu (foto T. Vaněk)

Z laboratoře do praxe

Při našem výzkumu pokládáme za důležité, abychom nejenom objasnili osud sledovaných látek v rostlinách a životním prostředí na laboratorní úrovni, ale aby vybrané výsledky mohly být využity i v praxi pro ochranu životního prostředí. Pokud jde o kontaminaci půdy, je postup velice jednoduchý – z podmínek *in vitro* přejdeme do skleníku, kde rostliny rostou již v kontaminované zemině, poté probí-

hají parcelkové pokusy přímo na kontaminované lokalitě a následně aplikace na celé vybrané ploše.

Příkladem může být návrh řešení staré ekologické zátěže v areálu Poldi (obr. 22), jehož historie sahá až do poloviny 19. století. Pro výběr vhodných rostlin byly provedeny testy toxicity v laboratoři a následné skleníkové experimenty (obr. 23). Byl sledován účinek látek na produkci biomasy a kořenového systému. Pro polní experimenty byly vybrány různé druhy topolů, pro laboratorní pak semena řepky, čiroku a řízky topolů (obr. 24). Na semenech byl testován možný toxický účinek půdy na klíčení a růst kořenů v prvních stadiích vývoje. Ve skleníku pak byl zjištěn vliv půdy na produkci biomasy, tvorbu pigmentu v listech a kořenovou morfologii, jakož i akumulace polyaromatických uhlovodíků v rostlinách.

Podobně bylo postupováno v oblasti Mydlovar, kde byla studována schopnost rostlin akumulovat radionuklidy z půdy a jejich translokace v rostlinách lnu na ploše cca 1 ha (obr. 25).

V případě kontaminovaných vod následuje po laboratorním ověření v podmínkách *in vitro* a v hydroponickém systému aplikace na zkoumané lokalitě, napřed v kontejnerovém systému, poté v maloplošné čistírně kořenových vod.

Posledním stupněm je pak vlastní využití získaných poznatků v reálné čistírně odpadních vod ze zemědělského provozu a recyklace pro provozní účely v Severních Čechách.

Příkladem tohoto komplexního přístupu může být studium antihelmintika praziquantelu, jehož metabolismus byl sledován na úrovni tkáňových kultur a *in vitro* kultivovaných rostlin rákosu (obr. 26), potvrzen v hydroponickém uspořádání a poté využit v poloprovodním (obr. 27) a provozním měřítku (obr. 28).

Tato čistírna slouží jak pro čištění odpadních vod v reálném provozu, tak i pro účely dalšího ověřování výsledků našeho výzkumu v reálných podmínkách.

Závěrem

V průběhu let se fytoremediace ukázala jako platná metoda pro snižování kontaminace životního prostředí přírodě blízkými postupy a k úspoře spotřeby stále více nedostatkové vody. Je zároveň ilustrativním příkladem toho, jak základní výzkum prováděný v laboratoři může v relativně krátkém čase přispět k řešení celospolečenských problémů.

Vybrané publikace

Landa, P., Přerostová, S., Petrová, Š., Knirsch, V., Vaňková, R., Vaněk, T. The Transcriptomic Response of *Arabidopsis thaliana* to Zinc Oxide: A Comparison of the Impact of Nanoparticle, Bulk, and Ionic Zinc. *Environmental science and technology*. 2015, 49: 14537–14545; Maršík, P., Podlipná, R., Vaněk, T. Study of praziquantel phytoremediation and transformation and its removal in constructed wetland. *Journal of hazardous materials*. 2017, 323: 394–399; Maršík, P., Rezek, J., Žídková, M., Kramulová, B., Tauchen, J., Vaněk, T. *Non-steroidal anti-inflammatory drugs in the watercourses of Elbe basin in Czech Republic*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.055>; Maršík, P., Šiša, M., Lacina, O.,

Motková, K., Langhansová, L., Rezek, J., Vaněk, T. Metabolism of ibuprofen in higher plants (2017) A model *Arabidopsis thaliana* cell suspension culture system. *Environmental pollution*. 220, 383–392; Podlipná, R., Pospíšilová, B., Vaněk, T. Biodegradation of 2,4-dinitrotoluene by different plant species. *Ecotoxicology and environmental safety*. 2015, 112: 54–59; Podlipná, R., Skálová, L., Seidlová, H., Szotáková, B., Kubíček, V., Stuchlíková, L., Jirásko, R., Vaněk, T., Vokřál, I. Biotransformation of benzimidazole antihelmintics in reed (*Phragmites australis*) as a potential tool for their detoxification in environment. *Biore-source technology*. 2013, 144: 216–224; Soudek, P., Petrová, Š., Vaňková, R., Song, J., Vaněk, T. Accumulation of heavy metals using *Sorghum sp.* *Chemosphere*. 2014, 104: 15–24; Soudek, P., Ursu, M., Petrová, Š., Vaněk, T. Improving crop tolerance to heavy metal stress by polyamine application. *Food Chemistry*. 2016, 213, 223–229.



Obr. 27. Instalace kontejnerového systému pro sledování degradace léčiv (foto T. Vaněk)



Obr. 28. Studium fytořemediace léčiv v reálných podmínkách (foto T. Vaněk)

Základní výzkum je někdy přímo spojen s výzkumem aplikovaným: důležitým týmem v ÚEB je skupina, která se zabývá šlechtěním jabloní odolných vůči chorobám, především proti strupovitosti. Produktem jejich výzkumu je několik desítek nových odrůd jabloní, které jsou registrované a právně chráněné v mnoha zemích světa. Ústav experimentální botaniky prodává pěstitelům po celém světě licence na množení těchto odrůd. Ročně se tak na základě těchto licencí vypěstuje a prodá více než 1,2 milionu jabloní.

Špičkový výzkum v oblasti biologie rostlin je velice náročný na přístrojové vybavení. V ÚEB tak najdete velice nákladné a unikátní přístroje na třídění chromozomů, speciální elektronové, konfokální a fluorescenční mikroskopy a řadu analytických zařízení schopných stanovit chemické látky v nesmírně nízké koncentraci. Přístrojové vybavení je alfou a omegou našeho výzkumu – bez špičkových přístrojů nelze dělat prvotřídní vědu.

Pracovníci ÚEB se významným způsobem podílejí na výuce především na přírodovědeckých fakultách Univerzity Karlovy v Praze a Univerzity Palackého v Olomouci, ale i na několika dalších vysokých školách. S Univerzitou Palackého v Olomouci má ÚEB i společnou laboratoř. Pracovníci ÚEB každý semestr odpřednášejí více než 1000 hodin na vysokých školách. V laboratořích ÚEB najdete průběžně několik desítek studentů, kteří zde vypracovávají své bakalářské, magisterské či doktorandské práce. V posledních letech se do vědecké práce v ÚEB čím dál častěji zapojují i nadaní středoškolští studenti.

ÚEB pořádá pravidelně významné mezinárodní vědecké kongresy a konference, z nichž jmenujeme kongres Auxins and Cytokinins in Plant Development, zorganizovaný již devětkrát a pravidelně navštěvovaný nejvýznamnějšími světovými kapacitami v oboru, či konferenci Methods in Plant Sciences se šesti úspěšnými ročníky, zaměřenou především na mladé vědecké pracovníky.

V neposlední řadě je důležitou součástí práce ÚEB i ediční a publikační činnost. ÚEB již více než 50 let vydává dva mezinárodní vědecké časopisy (o jejich velmi slušném mezinárodním renomé svědčí tzv. impaktní faktor, který je jakýmsi univerzálním měřítkem kvality vědeckého časopisu). Časopis *Biologia Plantarum* je zaměřen na různé aspekty biologie rostlin, časopis *Photosynthetica* je pak úžeji specializován na proces využití slunečního záření ve fotosyntetickém procesu.

Bližší podrobnosti o výzkumu prováděném v ÚEB najdete na webových stránkách www.ueb.cas.cz. Ovšem nejlepším způsobem, jak nahlédnout do každodenní vědecké práce v ÚEB a zhlédnout přístrojové vybavení v akci, je pracoviště osobně navštívit. Ideální příležitostí pro to je týden vědy a techniky, v jehož rámci ÚEB pořádá obvykle tři dny otevřených dveří (tradičně druhý týden v listopadu). Vědci v této době přerušují svou běžnou práci a věnují se návštěvníkům. Každý rok ÚEB navštíví kolem tisíce návštěvníků (především studentů) a drtivá většina z nich odchází velmi spokojena.

Rozvoj lidské společnosti s sebou přináší znečištění životního prostředí celou škálou látek. Poznání nebezpečí plynoucích z jejich přítomnosti vedlo k vývoji technologických postupů, které by umožnily dekontaminaci. Bohužel některé z nich představují hrubý zásah do krajiny, narušení ekosystémů a z toho plynoucí důsledky. Neustále se však vyvíjejí a testují nové technologie, které jsou k přírodě šetrnější, nenarušují vzhled krajiny a někdy dokonce přispívají k jeho zlepšení. Patří mezi ně i fytořadiační technologie, tedy technologie využívající zelené rostliny nebo rostliny ve spojení s mikroorganismy k rozkladu, fixaci nebo akumulaci různých látek znečišťujících půdu, vodu a vzduch.

Vegetace se tradičně využívá např. podél silnic k zachycení polutantů z provozu aut, při čištění odpadních vod atd. Moderní fytořadiace je přesto stále na počátku vývoje a další výzkum může přinést řadu nových postupů a řešení.

V EDICI VĚDA KOLEM NÁS PŘIPRAVUJEME:

Milan Řípa: **Soukromý kapitál v termojaderné fúzi**

Jan Vít: **Jan Patočka**

Zdeněk R. Nešpor: **Česká sociologická encyklopedistika**

V EDICI MIMO JINÉ VYŠLO:

Jaroslav Pánek: **Institute of History, CAS**

Vítězslav Jarý, Jan Pejchal: **Scintilátory kolem nás**

Michaela Tučková: **Pamětní místa na komunistický režim**

Edice Věda kolem nás | Pro všední den

Fytořadiace a možnosti její aplikace | T. Vaněk, P. Soudek, R. Podlipná, Š. Petrová, P. Landa

Vydalo Středisko společných činností AV ČR, v. v. i. Grafická úprava dle osnovy Jakuba Krče a sazba WOW, spol. s r. o. Odpovědná redaktorka Petra Královcová. Vydání 1., 2017. Ediční číslo 12215. Tisk WOW, spol. s r. o., Washingtonova 1567/25, 110 00 Praha 1.

ISSN 2464-6245

Evidováno MK ČR pod e. č. E 22344

Další svazky získáte na:

www.vedakolemnas.cz | www.academia knihy.cz | www.eknihy.academia.cz