

THE USE OF BIOTRANSFORMATION TO REDUCE THE TOXICITY OF POLYCHLORINATED DIBENZO-*p*-DIOXINS AND DIBENZO-*p*-FURANS

VYUŽITÍ BIOTRANSFORMACE PRO SNÍŽENÍ TOXICITY POLYCHLOROVANÝCH DIBENZO-*p*-DIOXINŮ A DIBENZO-*p*-FURANŮ

Gabriela Šedivcová, Robin Kyclet, Vít Matějů, Simona Vosáhlová

ENVISAN-GEM, a. s., Biotechnologická divize, Radiová 7, Praha 10, e-mail: g.sedivcova@gmail.com

Abstract:

The aim of the study is the use of biotransformation to reduce the toxicity of PCDDs/Fs (polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins/furans) in contaminated soil. The treated material (sandy loam soil and anthropogenic backfill) contaminated by PCDDs/Fs originates from the wood impregnation plant in northern Sweden. The modified process of controlled decontamination by the technology ENVI-BIOSTAB (the support of biological activity by the application of the bacterial preparation, the delivery of organic matter and mineral nutrients, the change in redox conditions, monitoring, technological interventions according to the results of monitoring) proceeds *ex-situ*. After 8 months the toxicity of the material decreased (expressed as toxic equivalent – TEQ) by 37 %. The highest decrease of the concentration was observed in the congener of heptachlorodibenzofurane 1234678-HpCDF from 470 ng g⁻¹ (w/w) to 230 ng g⁻¹ (w/w), which was represented in the contaminated soil in the highest amount. In full scale the technology ENVI-BIOSTAB was successfully applied for biotransformation and bioimmobilization of the PAHs in soil (decrease of the concentration by 96,8 %, respectively 98,6 %). The efficiency of the technology was verified in the pilot tests with soil contaminated with pesticides and nitrotoluenes (decrease in concentration by 98,8 % respectively 99,4 %).

Keywords:

dioxine, biotransformation, toxicity, ENVI-BIOSTAB

Abstrakt:

Podstatou příspěvku je využití biotransformace pro snížení toxicity PCDD/F v kontaminované zemině. Sanovaný materiál (písčitohlinité půdy a antropogenní navážky) znečištěný PCDD/F pochází ze zařízení na impregnaci dřeva v severním Švédsku. Modifikovaný proces řízené dekontaminace technologií ENVI-BIOSTAB (podpora biologické aktivity aplikací bakteriálního preparátu, dodání organické hmoty a minerálních živin, změna redoxních podmínek, monitoring, technologické zákroky dle výsledků monitoringu) probíhá *ex-situ*. Po 8 měsících došlo ke snížení toxicity materiálu (vyjádřené toxickým ekvivalentem – TEQ) o 37 %. Největší pokles koncentrace byl zaznamenán u kongeneru heptachlorodibenzofuranu 1234678-HpCDF z 470 ng g_{sus}⁻¹ na 230 ng g_{sus}⁻¹, který byl v kontaminované půdě nejvíce zastoupen. V provozním měřítku byla technologie ENVI-BIOSTAB úspěšně aplikována pro biotransformaci a bioimobilizaci PAU v zeminách (snížení koncentrace o 96,8 % resp. 98,6 %). Účinnost technologie byla ověřena při pilotních testech se zeminou znečištěnou pesticidy a nitrotolueny (snížení koncentrace o 98,8 % resp. 99,4 %).

Klíčová slova:

dioxin, biotransformace, toxicita, ENVI-BIOSTAB

Úvod

Přítomnost 2,8-dichlordibenzo-*p*-dioxinu v životním prostředí byla zjištěna již v roce 1941 [1]. Dosud nejtoxičtější synteticky vyrobený organický polutant 2,3,7,8-tetrachlordibenzo-*p*-dioxin (TCDD) je uveden ve studii zaměřené na pyrolýzu pentachlorfenolu v roce 1957 [2]. V archivovaných půdních vzorcích pocházejících z jihozápadní Anglie z let 1893 až 1986 byl v 90. letech 20. století potvrzen výskyt polychlorovaných dibenzo-*p*-dioxinů (PCDD) a dibenzo-*p*-furanů (PCDF). Studie jednoznačně ukazuje, že koncentrace těchto kontaminantů se významně zvyšovala [3] a lze je považovat za starou i novodobou ekologickou zátěž. PCDD/F patří mezi perzistentní organické polutanty (POP). Mezi nejproblematictější vlastnosti POP z hlediska nebezpečí pro životní prostředí patří toxicita,

perzistence, schopnost kumulace a bioakumulace a schopnost dálkového transportu [4]. V České republice nebyly tyto polutanty klasifikovány jako jedy až do konce roku 1992. Ve většině případů se PCDD a PCDF dostávají do životního prostředí z antropogenní činnosti. Mohou zůstat ve složkách, kam byly primárně emitovány či mohou přecházet přes mezifázové rozhraní do dalších složek životního prostředí; během tohoto transportu mohou být transformovány a vytvářet sekundární znečištění [5]. Habe et al. [6] v úvodu své publikace zaměřené na využití *Pseudomonas sp.* při bioremediaci půdy uvádí, že PCDD přítomné v půdních sedimentech vykazují extrémně vysokou odolnost vůči degradaci. Matějů [7] se zabývá inovačními integrovanými technologiemi, které neusilují o totální destrukci těžko rozložitelných polutantů, ale o biologickou či chemickou transformaci následovanou imobilizací či stabilizací v ošetřované matici. Forma polutantu, která vznikne biologickým působením, je silně vázána na určité složky horninového prostředí a stává se imobilní. K hodnocení snížení toxicity takto biologicky ošetřeného materiálu je vhodné využít testy ekotoxicity. Výsledky testů ekotoxicity mohou velice dobře posloužit k hodnocení vlivu pevných matric s kontaminací na rostliny a půdní organismy, pokud jsou aplikovány v kontaktním uspořádání. Sakaki et al. [8] provedli zajímavou studii o možnosti aplikace mikroorganismů využívající cytochrom P450 (enzym podílející se na 1. fázi metabolismu cizorodých látek) pro bioremediaci půd kontaminovaných dibenzo-*p*-dioxiny (DD). Zkoumali látkovou přeměnu PCDD v játrech savců (hlodavců), na které se podílí cytochrom P450 (CYP1A1 a CYP1A2). Zjistili, že během této látkové přeměny enzymy CYP1A1 a CYP1A2 způsobují hydroxylaci na nesubstituovaných pozicích, hydroxylaci a eliminaci substituovaného chloru a narušení dioxinového řetězce. V laboratorních podmínkách dokázali snížit za 7 dní mikrobiálním preparátem celkovou koncentraci PCDD/F v půdě ze 725 ng g⁻¹ na 665 ng g⁻¹ (TEQ z 11 ng g⁻¹ na 9,4 ng g⁻¹). I mnoho dalších autorů dříve potvrzuje, že za vhodných podmínek jsou mikroorganismy schopné biotransformace dioxinů [9], [10], [11], [12]. Halden and Dwyer [10] doporučují biologicky čistit půdy znečištěné dioxiny v nízkých koncentracích (řádově ppb do 10 ppm). Kromě koncentrace záleží také na počtu substituovaných chlórů – více chlorované kongenery dioxinů a furanů jsou náchylnější k biodegradaci v anaerobních podmínkách, naopak méně chlorované PCDD/F v aerobních podmínkách [13]. Yoshida et al. [14] a další autoři (např. [15], [16]) potvrzují, že účinnost procesu je podmíněna zahrnutím anaerobní fáze, kdy se na dechloraci podílí anaerobní mikroorganismy.

Materiál a metoda - Sanační technologie ENVI-BIOSTAB

ENVI-BIOSTAB je flexibilní biologická inovativní sanační technologie určená pro snížení znečištění způsobeného zejména organickými látkami, které jsou biologicky velmi obtížně odbouratelné (např. polyaromatické uhlovodíky (PAU), chlorované uhlovodíky, fenoláty, herbicidy, pesticidy, výbušniny, dioxiny). Základním procesem je mikrobiálně podporovaná sekvenční anaerobní - aerobní transformace polutantu na produkty, které jsou schopny pevných vazeb na matici, čímž dojde ke snížení biologické dostupnosti a zamezení transportu v horninovém prostředí. Tím jsou eliminována rizika znečištění, sníží se toxicita materiálu. V provozním měřítku byla úspěšně aplikována pro biotransformaci a bioimobilizaci PAU v zeminách (snížení koncentrace o 96,8 % resp. 98,6 %). Účinnost technologie byla ověřena při pilotních testech se zeminou znečištěnou pesticidy a nitrotolueny (NT) (snížení koncentrace o 98,8 % resp. 99,4 %).

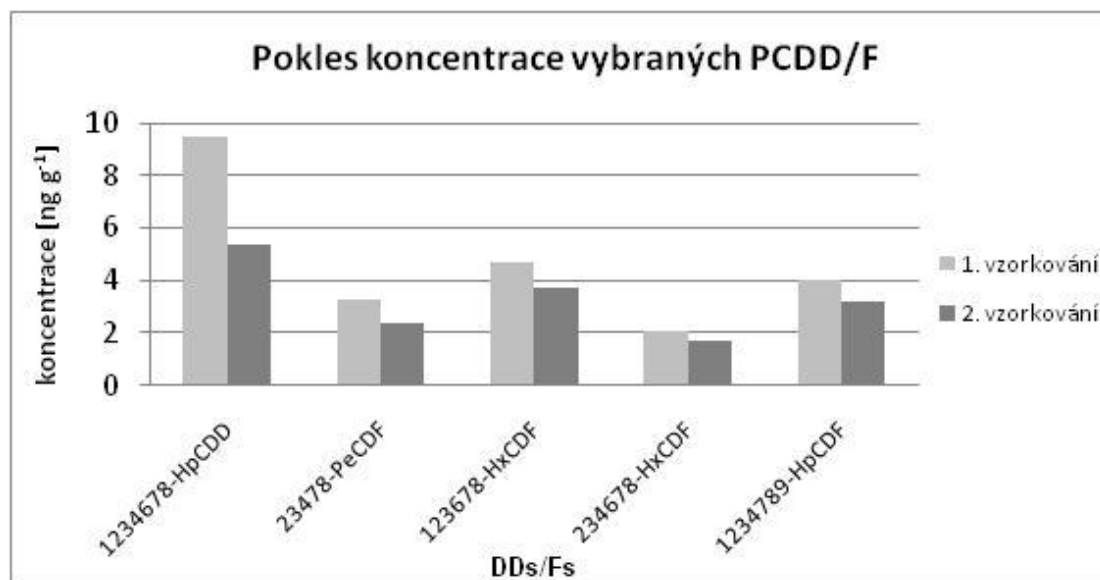
Cílem není úplná biologická mineralizace uvedených polutantů (mnohé jsou označovány jako persistentní látky), ale jejich částečná transformace a stabilizace. Mikrobiální rozklad či transformace organických polutantů probíhá za různých redoxních podmínek. Obvykle je v materiálu na počátku vytvořeno anaerobní prostředí. Tím je umožněna biologická transformace polutantů, která by nemohla v aerobních podmínkách probíhat. Po anaerobní fázi následuje biologické ošetřování v aerobních podmínkách. V aerobním prostředí může docházet k další transformaci či rozkladu vzniklých meziproduktů biologické transformace rychleji. Současně dochází k rychlé mineralizaci přidaného organického materiálu a vzniku huminových látek [17]. Tvorba pevných komplexů mezi molekulami huminových látek a transformovanými produkty polutantů vede k imobilizaci zbytkové kontaminace. Tento postup umožňuje účinné zneškodňování i obtížně degradovatelných polutantů.

Kontaminovaný materiál (písčitohlinité půdy a antropogenní navážky) pochází z bývalého zařízení na impregnaci dřevěných výrobků v severním Švédsku. K impregnaci byl využíván kreosot

a pentachlofenol (PCP). PCDD/F vznikaly jako vedlejší produkty výroby PCP. Proces dekontaminace probíhá v uspořádání ex-situ v hale. Zemina o hmotnosti 108 t tvoří jednu hromadu. První vzorkování proběhlo ihned po navezení materiálu v červnu 2009. Byly odebrány vzorky pro stanovení PAU, PCP, PCDD, PCDF a obsahu rizikových prvků: As, Cr, Cu. Dále byl proveden mikrobiologický a chemický rozbor: stanovení celkového počtu aerobních heterotrofních bakterií (AHB), amonného dusíku ($\text{NH}_4\text{-N}$), dusičnanového dusíku ($\text{NO}_3\text{-N}$), fosforečnanů ($\text{PO}_4\text{-P}$), pH, sušiny a ztráty žiháním. Po vzorkování byla kontaminovaná půda smíchána s lignocelulózovým materiálem, zdrojem organické hmoty a biologicky dostupného dusíku. Zemina byla obohacena minerálními živinami. Ke zvýšení mikrobiální aktivity na počátku byla směs inokulována. Připravená směs byla nakonec zvlhčena. Proces byl dále řízen na základě výsledků monitoringu. Na základě výsledků analýz byl materiál dále obohacován o minerální živiny, byl upravován obsah organické hmoty a vlhkost materiálu. V materiálu byly nejprve navozeny anaerobní podmínky. Cílem anaerobní fáze, která trvala přibližně 1 rok, byla biologická dehalogenace. Druhé vzorkování proběhlo 8 měsíců po začátku zásahu (stále ještě v anaerobní fázi). Po anaerobní fázi byly upraveny podmínky pro nástup aerobní fáze. V této fázi by mělo docházet k biotransformaci a degradaci částečně dehalogenovaných molekul PCDD/F. Stanovení PAU, PCP, PCDD, PCDF a As, Cr, Cu zajišťovala akreditovaná laboratoř ANECLAB, s. r. o., České Budějovice. Ostatní stanovení provedla laboratoř společnosti ENVISAN-GEM, a. s.

Výsledky a diskuze

Výsledky zjištěných koncentrací PCDD/F prvního (úvodního) a druhého (cca po 8 měsících) vzorkování jsou uvedeny v obr. 1. Z grafu je patrný trend snížení koncentrací, který vypovídá o biologické aktivitě. Dioxiny jsou v materiálu obsaženy ve velmi nízkých koncentracích – řádově v ng g^{-1} . Biologická eliminace polutantů v nízkých koncentracích je náročná na technologii a obvykle se prodlužuje i doba sanace. Je nutné si uvědomit, že hlavní biotransformační a degradační fáze teprve nastupuje a že druhé vzorkování proběhlo již po 8 měsících zahrnujících zimní období, kdy je mikrobiální aktivita částečně utlumena. Jedná se o zahajovací část dekontaminace technologií ENVI-BIOSTAB, výsledky jsou proto velmi příznivé. Další poklesy koncentrací jsou očekávány z výsledků analýz 3. vzorkování.



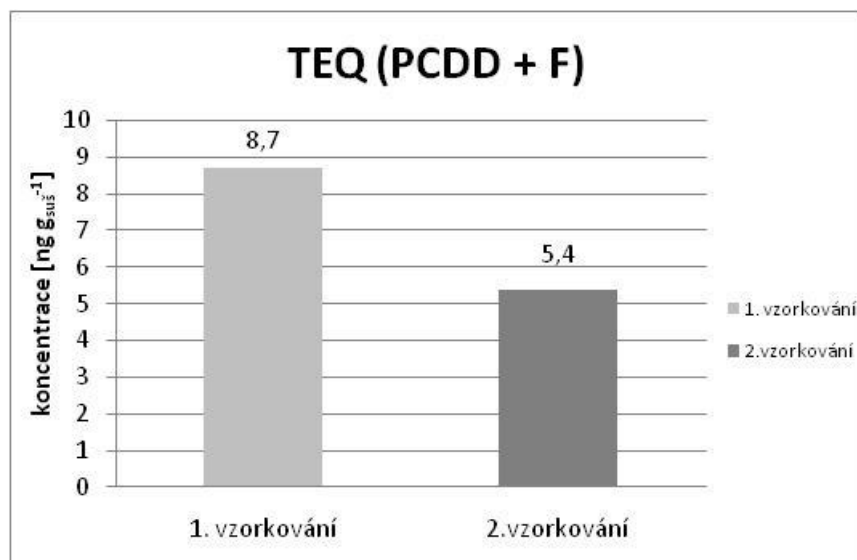
Obr. 1 Pokles koncentrace vybraných PCDD/F

Koncentrace všech stanovovaných PCDD/F prvního i druhého vzorkování jsou uvedeny v tab. 1. Největší pokles koncentrace byl zaznamenán u kongeneru 1234678-HpCDF z $470 \text{ ng g}_{\text{suš}}^{-1}$ na $230 \text{ ng g}_{\text{suš}}^{-1}$, který byl v kontaminované půdě nejvíce zastoupen.

Tab. 1: Koncentrace všech stanovovaných PCDD/F

Koncentrace všech stanovovaných PCDD a PCDF [ng g _{suš} ⁻¹]		
PCDD/F	1.vzorkování	2.vzorkování
2378-TCDD	< 0,012	< 0,012
12378-PeCDD	0,027	< 0,025
123478-HxCDD	0,06	0,023
123678-HxCDD	0,68	0,37
123789-HxCDD	0,073	0,052
1234678-HpCDD	9,5	5,4
OCDD	42	30
2378-TCDF	0,029	0,041
12378-PeCDF	0,11	0,097
23478-PeCDF	3,3	2,4
123478-HxCDF	13	11
123678-HxCDF	4,7	3,7
123789-HxCDF	0,088	0,072
234678-HxCDF	2,1	1,7
1234678-HpCDF	470	230
1234789-HpCDF	4	3,2
OCDF	85	80

Významným ukazatelem škodlivosti látek je toxický ekvivalent (TEQ = hodnota koncentrace jednotlivých sledovaných látek přepočtená na ekvivalentní množství 2,3,7,8-tetrachlordibenzo-p-dioxinu). Z obr. 2 je patrné, že důsledkem imobilizace těchto polutantů došlo ke snížení TEQ z 8,7 ng g_{suš}⁻¹ na 5,4 ng g_{suš}⁻¹ (37,9 %) a tím i snížení nebezpečnosti ošetřované zeminy.

**Obr. 2** Pokles toxického ekvivalentu

U PCP byl zaznamenán významný pokles koncentrace z 1580 mg kg_{suš}⁻¹ na 476 mg kg_{suš}⁻¹. Koncentrace PAU se zatím významně nezměnily. Z rizikových prvků došlo ke snížení koncentrace Cr. Koncentrace Cu se mírně zvýšila, což lze přisoudit změnám oxidačního stavu kovů. U ostatních prvků nebyly pozorovány výrazné změny. Výsledky mikrobiologických a chemických rozborů demonstruje tab. 2. Nízký celkový počet aerobních heterotrofních bakterií v materiálu a snižující se hodnota pH vypovídá o dodržení anaerobních podmínek. Po 1. vzorkování byly do kontaminovaného materiálu

přidány živiny, ale hodnoty chemických ukazatelů (NH₄-N, NO₃-N, PO₄-P) pocházející z druhého vzorkování jsou velice nízké. Došlo k vysoké spotřebě živin a pokračující sanační proces by s takto nízkými hodnotami neprobíhal optimálně, proto bylo nutné živiny co nejdříve opět dodat. Ztráta žiháním 10,1 % vypovídající o obsahu organických látek odpovídá momentální fázi procesu. Celkový přírůstek organického materiálu na počátku byl mnohem vyšší. V materiálu se podařilo vytvořit podmínky pro zvýšenou biologickou aktivitu. Dochází k eliminaci polutantů, současně se i snižuje obsah dodaného organického materiálu. Mineralizace dodané organické hmoty je významná z praktického hlediska dalšího nakládání s materiálem. Po ukončení procesu je plánováno jeho využití na skládce. Zde platí legislativní omezení pro celkový obsah organiky (ztráta žiháním nižší než 10 %).

Tab. 2 Mikrobiologický a chemický rozbor

Mikrobiologické a chemické ukazatele		
ukazatel	1.vzorkování	2.vzorkování
AHB [KTJ g _{suš} ⁻¹]	2,1.10 ⁷	2,0.10 ⁷
NH ₄ -N [mg kg ⁻¹]	4,3	5,0
NO ₃ -N [mg kg ⁻¹]	0,2	6,3
PO ₄ -P [mg kg ⁻¹]	0,44	2,5
pH	7,9	7,3
sušina [%]	80,9	78,4
ztráta žiháním [%]	7,7	10,1

Možnosti a některé dosažené výsledky biodegradace a biotransformace PCDD/F jsou diskutovány v úvodu článku. Dodání organické hmoty, minerálních živin a zajištění aerobních podmínek (ve 2. fázi) biotransformaci/biodegradaci zdatně urychlí [18]. Dalším důležitým faktorem je kvalita kontaminované půdy, což mimo jiné potvrzují např. Bulle et al. [19] ve studii zabývající se migrací PCDD/F (vyskytujících se též na místech, kde byla prováděna impregnace dřeva s využitím PCP a kreosotu) v různých půdních druzích. Technologie ENVI-BIOSTAB byla již úspěšně aplikována na dekontaminaci půdy znečištěné PAU i NT (TNT) a prozatím dosažené výsledky biotransformace PCDD/F inovační modifikovanou technologií ENVI-BIOSTAB jsou srovnatelné a velice uspokojivé.

Výsledky dalších projektů aplikací technologie ENVI-BIOSTAB

Biologická technologie ENVI-BIOSTAB je flexibilní a v různých modifikacích využitelná pro eliminaci znečištění těžko degradovatelnými organickými polutanty. Vedle znečištění dioxiny byla využita pro dekontaminaci zemin znečištěných PAU a nitrotolueny (NT).

Ukončená biologická dekontaminace PAU technologií ENVI-BIOSTAB

Na lokalitě ve Švédsku společnost ENVISAN-GEM, a. s. dekontaminovala 1550 t zeminy. Sanace proběhla v letech 2006 až 2007. Počáteční koncentrace karcinogenních PAU (např. benzo(a)antracen, chrysen, benzo(a)pyren, benzo(b)fluoranten) byla 74,9 mg kg_{suš}⁻¹, nekarcinogenních PAU (např. fluoranten, pyren) 172,25 mg kg_{suš}⁻¹. Cílem bylo snížit koncentraci PAU klasifikovaných jako karcinogenní na nejvýše 4,0 mg kg_{suš}⁻¹, ostatních analyzovaných PAU pod 40 mg kg_{suš}⁻¹. Po dosažení těchto limitů bylo možné materiál využít pro technologické účely místní skládky. Po 18 měsících sanace (biologické dekontaminace) bylo dosaženo vysokého snížení koncentrací, a to o 96,8 % karcinogenních PAU a 98,6 % nekarcinogenních PAU na hodnoty 2,39 mg kg_{suš}⁻¹ resp. 2,42 mg kg_{suš}⁻¹ [20].

Ukončená biologická dekontaminace NT technologií ENVI-BIOSTAB

V rámci projektu FT-TA/002 řešeného v letech 2004 – 2007 společnost ENVISAN-GEM, a. s. ve spolupráci s dalšími organizacemi dekontaminovala směs organických materiálů s kontaminovanou zeminou (70,8 % hm. zemina s TNT, 19,4 % hm. bramborový odpad, 9,8 % hm. piliny). Řízená biodegradace probíhala 4 měsíce. Počáteční koncentrace TNT byla 1,08 % sušiny a aplikací biodegradační technologie poklesla na 0,007 % sušiny. Již po 2,5 měsících celková koncentrace NT klesla o 98,8 %. Po dalších 3 týdnech se zvýšila účinnost biodegradace na 99,4 % [20].

Závěr

Dosud získané výsledky z provozní aplikace technologie ENVI-BIOSTAB pro eliminaci znečištění dioxiny jsou velmi příznivé. Cílem je ověřit využitelnost technologie pro dekontaminaci zemin v provozním měřítku. Aktuální koncentrace dioxinů v zemině umožňují uložení materiálu po biologické stabilizaci na řízené skládce odpovídající kategorie. Ošetřování materiálu však pokračuje, snahou je dále řádově snížit koncentrace dioxinů v materiálu. Hodnotí se nejen účinnost technologie, ale i náklady spojené s její aplikací. Z praktického, ale i ekonomického hlediska je biologická technologie výhodná. Biologické remediační technologie patří z hlediska polutantu společně s termálními a chemickými technologiemi mezi destruktivní metody (rozkládají polutant). Destruktivní metody jsou preferovány před technologiemi založenými na jiných principech (zkonzentrování polutantů do menšího objemu, prostá imobilizace polutantů bez jejich transformace či degradace). Uvažujeme-li dioxiny, je prakticky jedinou spolehlivou metodou jejich odstranění řízené spalování za vysokých teplot. To je však proveditelné jen za cenu velmi vysokých nákladů. Biologická metoda je pro dekontaminaci zemin ekonomicky mnohem výhodnější a šetrnější k životnímu prostředí. Technologie však musí být v provozním měřítku dostatečně spolehlivá a robustní. Z toho vychází i technologie ENVI-BIOSTAB.

Použitá literatura

- [1] UEO, S. (1941): 2,6-Dichlordiphenyle dioxide. Bull. Chem. Soc. Japan 13: 177
- [2] SANDERMAN, W., STOCKMAN, H., CASTON, R. (1957) Pyrolysis of pentachlorophenol. Chem. Ber. 90: 960
- [3] KJELLER, L. O., JONES, K. C., JOHNSTON, A. E., RAPPE, C. (1991): Increases in the polychlorinated dibenzo-*p*-dioxin and -furan content of soils and vegetation since the 1840s. Environmental Science & Technology, 25: 9, p. 1619 – 1627. 61 ref. ISSN: 0013-936X
- [4] FRANKLIN, J. (2006): Long – Range Transport of Chemicals in the Environment. Science dossier, Euro Chlor, Brussel, 71 p., dostupné z www.eurochlor.org
- [5] HOLOUBEK, I. (2000): Klinická onkologie, Zvláštní číslo 2000, s. 21 – 24
- [6] HABE, H., IDE, K., YOTSUMOTO, M., TSUJI, H., HIRANO, H., WIDADA, J., YOSHIDA, T., NOJIRI, H., OMORI, T. (2001): Preliminary examinations for applying a karbazole – degrader, *Pseudomonas sp.* Strain CA10, to dioxin – contaminated soil remediation. Appl. Microbiol. Biotechnol. 56: 788 – 795
- [7] MATĚJŮ, V. (2009): Zneškodnění biologicky těžko rozložitelných polutantů v pevných matricích. Sborník konference Inovativní sanační technologie ve výzkumu a praxi II, Vodní zdroje Ekomonitor, ISBN: 978-80-86832-45-6, 168 s
- [8] SAKAKI, T., SHINKYO, R., TAKITA, T., OHTA, M., INOUE, K. (2002): Biodegradation of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins by recombinant yeast expressing rat CYP1A subfamily. Archives of Biochemistry and Biophysics, Vol. 401, p. 91 – 98, ISSN: 0003-9861
- [9] ARMENGAUD, J., HAPPE, B., TIMMIS, K. (1998): J. Bacteriol., Vol. 179, p. 3954 – 3966
- [10] HALDEN, R. U., DWYER, D. F. (1997): Biodegradation of Dioxin – Related Compounds: A Review. Bioremediation Journal, Vol. 1, Issue 1, p. 11 – 25
- [11] KASAI, N., IKUSHIRO S., SHINYO, R., YASUDA, K., HIROSUE, S., ARISAWA, A., ICHINOSE, H., WARIISHI, H., SAKAKI, T. (2010): Metabolism of mono- and dichloro-dibenzo-*p*-dioxins by *Phanerochaete chrysosporium* cytochromes P450. Appl. Microbiol. Biotechnol., Vol. 86, p. 773 – 780
- [12] NOJIRI, H., NAM, J. W., KOSAKA, M., MORII, K., TAKEMURA, T., RURIHATA, K., YAMANE, H., OMORI, T. (1999): J. Bacteriol., Vol. 181, p. 3105 – 3113
- [13] ČERNOHLÁVKOVÁ, J. (2007): Effects of persistent organic pollutants (POPs) on soil microorganisms. Rigorózní práce, Masarykova univerzita, Brno, 40 s.
- [14] YOSHIDA, N., TAKAHASHI, N., HIRAISHI A. (2005): Phylogenetic Characterization of a Polychlorinated - Dioxin -Dechlorinating Microbial Community by Use Microcosm Studies. Applied and Environmental Microbiology, Vol. 71, No. 8, p. 4325 – 4334
- [15] FIELD, J. A., SIERRA-ALVAREZ, R. (2007): Biodegradability of chlorinated aromatic compounds. Science dossier, Euro Chlor, Brussel, 116 p., dostupné z www.eurochlor.org
- [16] FIESELER, C., NOLL, B. (1995): Bioremediation of dioxin – contaminated soil. Bioremediation: the Tokyo'94 Workshop, OECD Documents, p. 169 – 179, ISBN: 92-64-14634-2
- [17] SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A., CEGARRA, J., GARCÍA, D., ROIG, A. (2002): Chemical and structural evolution of humic acids during organic waste composting. Biodegradation, Issue 13, p. 361-371

- [18] NARIHIRO, Z., KAIYA, S., FUTAMATA, H., HIRAISHI, A. (2010): Removal of polychlorinated dioxins by semi – aerobic fed – batch composting with biostimulation of „*Dehalococcoides*“. Journal of Bioscience and Bioengineering, Vol. 109, No. 3, p. 249 – 256
- [19] BULLE, C., SAMSON R., DESCHENES, L. (2010): Enhanced migration of polychlorodibenzo-*p*-dioxins and furans in the presence of pentachlorophenol – treated oil in soil around utility poles: Screening model validation. Environmental Toxicology and Chemistry, Vol. 29, Issue 3, p. 582 – 590, ISSN: 07307268
- [20] VOSÁHLOVÁ, S., MATĚJŮ, V., KYCLT, R., KYSLÍKOVÁ, E., VÍTOVCOVÁ, L., VÁCHOVÁ, V., JANOCH, T., PETŘINOVÁ, L., JÍROVCOVÁ, I. (2006): Průběžná zpráva za projekt FT-TA/002 Výzkum inovačních biotechnologických a kombinovaných chemickobiologických metod pro odstraňování starých ekologických zátěží a snižování rizik pro životní prostředí, Praha, 80 s.