

# Obsah

<b>1.</b>	<b>Úvod (Matějů)</b> .....	<b>9</b>
<b>2.</b>	<b>Technologie pro ošetřování nesaturované zóny a pevných materiálů</b> .....	<b>10</b>
2.1	Technologie in situ (Matějů) .....	10
2.1.1	Biologické postupy .....	11
2.1.1.1	Úvod (Matějů) .....	11
2.1.1.2	Bioventing a kometabolický bioventing (Matějů).....	12
2.1.1.3	Podporovaná bioremediace (Matějů) .....	18
2.1.1.4	Fytoremediace a rhizoremediace (Macek a kol.) .....	20
2.1.1.5	Použitá literatura .....	23
2.1.2	Fyzikální a chemické postupy .....	25
2.1.2.1	Úvod (Matějů) .....	25
2.1.2.2	Chemická oxidace (Kubal).....	25
2.1.2.3	Elektrokinetická dekontaminace (Kubal).....	28
2.1.2.4	Narušování struktury, štěpení (Kvapil) .....	30
2.1.2.5	Vymývání půdy (Kyclt).....	32
2.1.2.6	Venting (Hocke, Pastuszek) .....	34
2.1.2.7	Solidifikace a stabilizace (Růžička).....	40
2.1.2.8	Metody tepelného ošetření a tepelné podpory (Matějů).....	42
2.1.2.9	Zakrytí, uzavření a enkapsulace (Řičica) .....	47
2.1.2.10	Vitifikace (Matějů).....	49
2.1.2.11	Použitá literatura.....	50
2.2	Technologie ex situ (Matějů) .....	53
2.2.1	Biologické postupy .....	53
2.2.1.1	Úvod (Matějů) .....	53
2.2.1.2	Ošetřování půdy a ostatních pevných materiálů po vytěžení na dekontaminační ploše (Kyclt) .....	55
2.2.1.3	Kompostování (Matějů) .....	57
2.2.1.4	Biostabilizace a bioimobilizace (Matějů).....	60
2.2.1.5	Landfarming (Matějů) .....	62
2.2.1.6	Biologické suspenzní systémy (slurry phase system) (Kyclt).....	64
2.2.1.7	Použitá literatura.....	66
2.2.2	Chemické a fyzikální metody .....	67
2.2.2.1	Úvod (Burkhard) .....	67
2.2.2.2	Chemická extrakce (Burkhard).....	68
2.2.2.3	Chemická oxidace/redukce (Burkhard).....	70
2.2.2.4	Dehalogenace (Burkhard).....	71
2.2.2.5	Fyzikálně-mechanická separace (Burkhard) .....	73
2.2.2.6	Praní půdy a pevných materiálů (Kyclt).....	75
2.2.2.7	Solidifikace a stabilizace ex situ (Růžička) .....	77
2.2.2.8	Spalování (včetně otevřeného spalování a detonace) (Hanuš) .....	79
2.2.2.9	Termická desorpce (Straka).....	81
2.2.2.10	Použitá literatura .....	84
<b>3.</b>	<b>Technologie čištění podzemní vody a průsakových vod</b> .....	<b>86</b>
3.1	Technologie in situ (Matějů) .....	86
3.1.1	Biologické postupy .....	87
3.1.1.1	Úvod (Matějů) .....	87

3.1.1.2	Podporovaná bioremediace (Matějů) .....	88
3.1.1.3	Biosparging (Matějů) .....	91
3.1.1.4	Bioslurping (Matějů) .....	94
3.1.1.5	Biotransformace, bioredukce (Matějů).....	95
3.1.1.6	Biologické reaktivní bariéry (Veselá) .....	97
3.1.1.7	Použitá literatura .....	100
3.1.2	Přirozená atenuace .....	102
3.1.2.1	Úvod (Matějů) .....	102
3.1.2.2	Monitorovaná přirozená atenuace (Matějů) .....	103
3.1.2.3	Podporovaná atenuace (Matějů) .....	107
3.1.2.4	Použitá literatura .....	109
3.1.3.	Chemické a fyzikální metody .....	110
3.1.3.1	Úvod (Matějů) .....	110
3.1.3.2	Air sparging (Herčík) .....	111
3.1.3.3	Chemická oxidace in situ (Kubal) .....	117
3.1.3.4	Metody tepelného ošetření (Matějů) .....	119
3.1.3.5	Bariéry vertikální (Černá, Řičica) .....	120
3.1.3.6	Hluboká injektáž (Řičica).....	127
3.1.3.7	Hydraulické štěpení (Kvapil) .....	128
3.1.3.8	Pneumatické štěpení (Kvapil) .....	130
3.1.3.9	Torpedace (Kvapil).....	132
3.1.3.10	Radiolytický rozklad (Pastuszek) .....	134
3.1.3.11	Použitá literatura .....	136
3.2	Technologie ex situ (Matějů) .....	138
3.2.1	Biologické metody .....	139
3.2.1.1	Úvod (Matějů) .....	139
3.2.1.2	Bioreaktory (Matějů).....	140
3.2.1.3	Umělé mokřady (kořenové čistírny) (Matějů).....	143
3.2.1.4	Použitá literatura (Matějů).....	145
3.2.2	Chemické a fyzikální metody .....	146
3.2.2.1	Úvod (Matějů) .....	146
3.2.2.2	Air stripping (Charvát) .....	147
3.2.2.3	Adsorpce a absorpce (Přikrylová) .....	148
3.2.2.4	Chemická oxidace (Matějů) .....	152
3.2.2.5	Sanační čerpání a čištění po vyčerpání (Polenka) .....	154
3.2.2.6	Srážení, koagulace, flokulace, flotace (Dubánek) .....	158
3.2.2.7	Výměna iontů (Dubánek) .....	164
3.2.2.8	Použitá literatura .....	168
<b>4.</b>	<b>Technologie čištění půdního vzduchu a vzdušnin .....</b>	<b>170</b>
4.1	Biologické metody .....	170
4.1.1	Úvod (Matějů) .....	170
4.1.2	Biofiltrace .....	171
4.1.2.1	Biofiltr s pevným ložem (Kyc.lt).....	171
4.1.2.2	Skrápěný biofiltr (Kyc.lt) .....	173
4.1.2.3	Bioskrubr (Kyc.lt) .....	174
4.1.3	Použitá literatura (Kyc.lt) .....	175
4.2	Chemické a fyzikální postupy .....	176
4.2.1	Úvod (Koutský, Malecha) .....	176
4.2.2	Vypírání (Koutský, Malecha).....	177
4.2.3	Membránové separace (Koutský, Malecha) .....	181
4.2.4	Oxidace (Koutský, Malecha).....	183

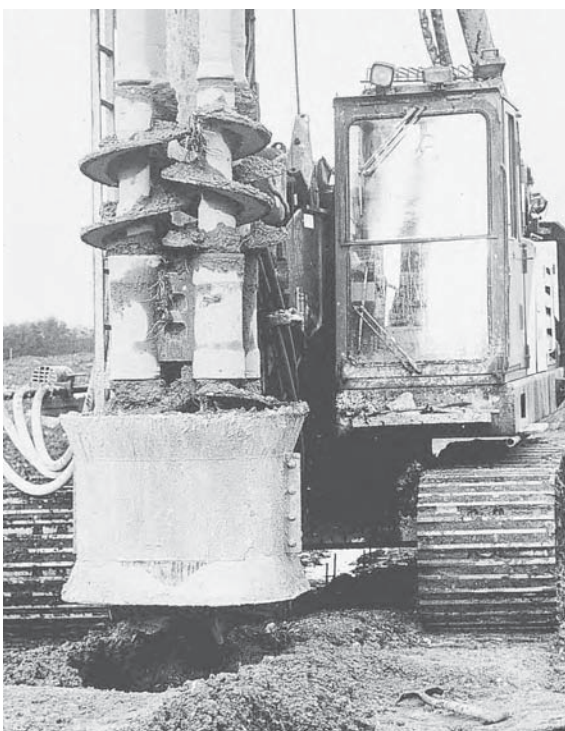
4.2.5	Vysokoenergetická destrukce (Koutský, Malecha).....	186
4.2.6	Adsorpce (Koutský, Malecha).....	188
4.2.7	Spalování (Raschman).....	191
4.2.8	Použitá literatura .....	195
<b>5.</b>	<b>Nanotechnologie pro sanaci ekologických zátěží .....</b>	<b>197</b>
5.1	Úvod (4) (Černík).....	197
5.2	Principy nanotechnologií v oblasti životního prostředí (Černík).....	198
5.3	Popis technologie sanace kontaminované podzemní vody in situ (Černík).....	198
5.3.1	Příprava bimetalických nanočástic na bázi Fe (Černík).....	198
5.3.2	Použití Fe nanočástic (Černík).....	199
5.4	Další příklady použití nanotechnologií v životním prostředí .....	201
5.4.1	Použití zeolitů ke katalytickým účelům (Černík).....	201
5.4.2	Použití nanočástic na bázi dalších prvků a ostatní systémy (Černík, Matějů).....	202
5.5	Pilotní aplikace .....	203
5.5.1	Sanace TCE v Trentonu (Černík).....	203
5.5.2	Aplikace nanoželeza v Kuřívodech (Černík).....	204
5.6	Použitelnost a omezení použití nanotechnologií při sanacích (Černík).....	205
5.8	Použitá literatura .....	205
<b>6.</b>	<b>Inovační technologie .....</b>	<b>206</b>
6.1	Úvod (Matějů).....	206
6.2	Mechanickochemická dehalogenace (Matějů).....	206
6.3	Sulfidické srážení těžkých kovů in situ aplikované na Cr a Ni (Slouka).....	208
6.4	Stripping ve vrtu (Slouka).....	209
6.5	Destrukce katalyzovaná zásadou (Straka).....	211
6.6	Nepřímá redukce těžkých kovů síran-redukujícími bakteriemi (Žáčková).....	212
6.7	Dynamický podzemní stripping (Matějů).....	214
6.8	Biologická degradace chloristanu (Matějů).....	215
6.9	Chemická redukce v plynné fázi (Matějů).....	217
6.10	Integrované sanační technologie .....	218
6.10.1	Úvod (Matějů).....	218
6.10.2	Anaerobní a aerobní bioremediace (Matějů).....	219
6.10.3	Kombinace chemických a biologických metod (Matějů).....	221
6.10.4	Ostatní integrované sanační technologie (Matějů).....	222
6.11	Extrakce do makroporézních polymerů (Matějů).....	224
6.12	Použitá literatura .....	226
<b>7.</b>	<b>Ekonomika sanačních technologií .....</b>	<b>229</b>
7.1	Úvod (Matějů).....	229
7.2	Nedostatky v určování ekonomických parametrů sanačních technologií (Matějů).....	229
7.3	Zvýšení srovnatelnosti cenových informací o sanačních technologiích (Matějů).....	230
7.4	Standardní jednotky pro vyjadřování nákladů (Matějů).....	232
7.5	Výběr cenových prvků (Matějů).....	234
7.6	Ekonomické hodnocení sanačních technologií (Matějů).....	235
7.7	Použitá literatura .....	239
<b>8.</b>	<b>Rejstřík zkratk .....</b>	<b>240</b>
<b>9</b>	<b>Věcný rejstřík .....</b>	<b>242</b>



Obr. č. 2.1.2-7 Použití specifického zařízení pro stabilizaci a solidifikaci materiálů v kalových lagunách (materiál společnosti Soletanche Česká republika, s. r. o., 2005)

#### Postup pro kontaminované zeminy

V případě únosnějšího podloží postupuje zařízení pro solidifikaci a stabilizaci přímo po sanované zemině a postupně ji promíchává s pojivem. Zařízení může mít různé tvary mísících nástrojů podle parametrů sanované zeminy (hloubka dosahu, velikost mísícího záběru, charakter aplikovaných pojiv).



Obr. č. 2.1.2-8 Příklad soupravy se čtyřmi překryvajícím se spirálovými vrtáky (materiál společnosti Soletanche Česká republika, s. r. o., 2005)

Na obr. č. 2.1.2-8 je příklad sestavy pro promíchávání půdy, které nejprve při postupu dolů rozpojí zeminu a současně ji rovnoměrně promíchává s pojivem aplikovaným na špičce vrtných spirál. Po dosažení požadované hloubky je změněn směr otáčení vrtáků, takže tyto při postupu nahoru hutní pod sebou zeminu. Kromě vlivu pojiva tak dochází k sekundární mechanické solidifikaci zeminy.

Pro zvýšení účinnosti solidifikace a stabilizace *in situ* je možné je úspěšně kombinovat s různými vertikálními bariérami (viz 3.1.3.6), zejména pak s reaktivními bariérami pro zachycení zbytkového znečištění (Kachrillo, 2005). Dvojitá sanační ochrana pak spočívá v mikroenkapsulaci (tj. solidifikace a stabilizace *in situ*) a makroenkapsulaci (tj. obvodová těsnicí bariéra) (Magnié a kol., 2003).

Kontrola kvality solidifikace a stabilizace *in situ* se provádí na odebraných vzorcích zkouškami chemickými (například chemické složení výluhu) a fyzikálními (mechanická pevnost, propustnost).

Průměrné náklady na realizaci stabilizace a solidifikace *in situ* jsou řádově od 1500 do 6000 Kč.m<sup>-3</sup> podle druhu kontaminantu a použitých pojiv.

#### Doba čištění:

Sanace solidifikací a stabilizací *in situ* je relativně rychlou metodou. Průměrná doba je závislá na době chemických reakcí a době tuhnutí pojiv a pohybuje se od několika dnů po několik týdnů.

### 2.1.2.8 Metody tepelného ošetření a tepelné podpory

#### Odporové zahřívání

#### Princip:

Elektrický proud procházející méně propustnými půdami mezi elektrodami ohřívá prostředí, takže voda a polutanty přecházejí do plynné fáze a mohou být odstraněny vakuovou extrakcí (kapitola 2.1.2.6).

Teplo vzniká při průchodu elektrického proudu půdou, která působí jako elektrický odpor (Gauglitz a kol., 1994).



nebo mikroaerofilní až anaerobní s nitrátem. Při eliminaci chlorovaných ethylenů je možné sekvencně použít podpory reduktivních pochodů (vodík, sulfát, popřípadě heterotrofní substrát, který je opět v konečné fázi zdrojem vodíku) a postupně volit terminální akceptory s menší reduktivní silou. Volba sekvencí závisí na konkrétních podmínkách v lokalitě a obecně ji charakterizovat je velmi obtížné.

Biologický rozklad chlorovaných ethylenů může být podpořen vtláčením methanu, který stimuluje činnost enzymu monooxidasy, kterou obsahují methanotrofní bakterie. Monooxidasy jsou enzymy s velmi nízkou substrátovou specificitou a jsou schopné oxidovat také chlorované ethyleny. Tento oxidační proces je pro bakterie bez známého významu, protože z něj nezískávají žádnou energii (kometabolismus). Prakticky byl tento způsob stimulace kombinován s přidávkou makrobiotických prvků (fosfor a dusík). Methan ve směsi se vzduchem byl zatláčen periodicky a podle autorů tento postup stimuloval tvorbu monooxidasy (*Zittwitz a kol., 2003*). Hromadění *cis*-1,2-DCE a vinylchloridu nebylo pozorováno.

Podporovaná atenuace je velmi často používána v kombinaci s klasickým sanačním čerpáním v závěrečných fázích sanace pro polutanty dobře biologicky odbouratelné za aerobních podmínek s kyslíkem. Podpora ve většině případů spočívá v zapravení kyslíku nebo nitrátu do prostředí. Formy jsou různé:

- chemická oxidace za mírných podmínek, kdy dochází k částečné oxidaci cílových polutantů a část kyslíku je využívána biologicky pro aerobní degradaci (*Jacobs, 2003*);
- podpora zapravováním vzdušného nebo čistého kyslíku pro vytvoření aerobních podmínek nutných pro odstraňování MTBE a benzenu (*Mulica a kol., 2004*), terciárního butylalkoholu a MTBE (*Miller, 2005*);
- podpora biodegradace ropných uhlovodíků přidávkou nitrátů (*Meier-Lohr a kol., 2001*) zaměřená hlavně na eliminaci BTEX po ukončení sanačního čerpání jako fáze dočištění;
- aplikace aerobního dočištění transformačních produktů PCE a TCE ve zvodni nuceným provzdušňováním podzemní vody a biologickou aktivitou autochtonních kmenů po ukončení aktivní sanace.

Podporovanou atenuaci lze využít i k intenzifikaci stabilizačních procesů kontaminace kovy a radionuklidy rozpuštěnými v podzemní vodě. I když podle dostupných informací nebyl v České republice tento postup zatím nikde použit, neznamená to, že v blízké budoucnosti se tak nestane.

Biologické stabilizační procesy probíhají v kontaminovaných zvodních přirozeně, pokud dochází v důsledku rozkladu organických látek ke snížení redoxpotenciálu a odstraňování rozpuštěného kyslíku z podzemní vody. Tento proces lze podpořit injektáží heterotrofních substrátů do podzemní vody, a tak podporovat přirozenou spotřebu rozpuštěného kyslíku a vznik reduktivních podmínek (*Liles a kol., 2005*), při nichž dochází k biologické redukci sulfátů na sulfidy a vzniku kovových sulfidů, které jsou ve vodě nerozpustné.

Tuto podporu atenuace lze použít i ve zvodních se smíšenou kontaminací organickými i anorganickými polutanty. Jako donory elektronů lze použít nejrůznější organické sloučeniny a vedlejší produkty potravinářského průmyslu.

Biologické reduktivní atenuační pochody jsou často v přirozených podmínkách limitovány oxidačními podmínkami, nedostatkem organického uhlíku, nedostatkem akceptorů elektronů, nedostatkem makrobiotických prvků, či málo aktivní autochtonní bakteriální populací.

Přídavek heterotrofního substrátu může většinu těchto limitujících faktorů odstranit. Při praktickém využití je však třeba rozumně volit substráty. Například aplikace řepné melasy či jedlých olejů v našich podmínkách je riskantní a přináší negativní vlivy pro životní prostředí.

Jak bylo zmíněno v kapitole 3.1.2.1, je použití monitorované přirozené atenuace v České republice téměř nemožné. Proto lze především uvažovat s využitím podporované atenuace, která zaručuje větší rychlost atenuačních procesů. Podporovanou atenuaci je možno integrovat do sanačních systémů stejně dobře jako přirozenou atenuaci.

Integrace podporované atenuace v komplexních sanačních systémech je možná:

$$V = \frac{C_I V_i}{z_u (c_o - c_m)} \quad [3.2.2-8]$$

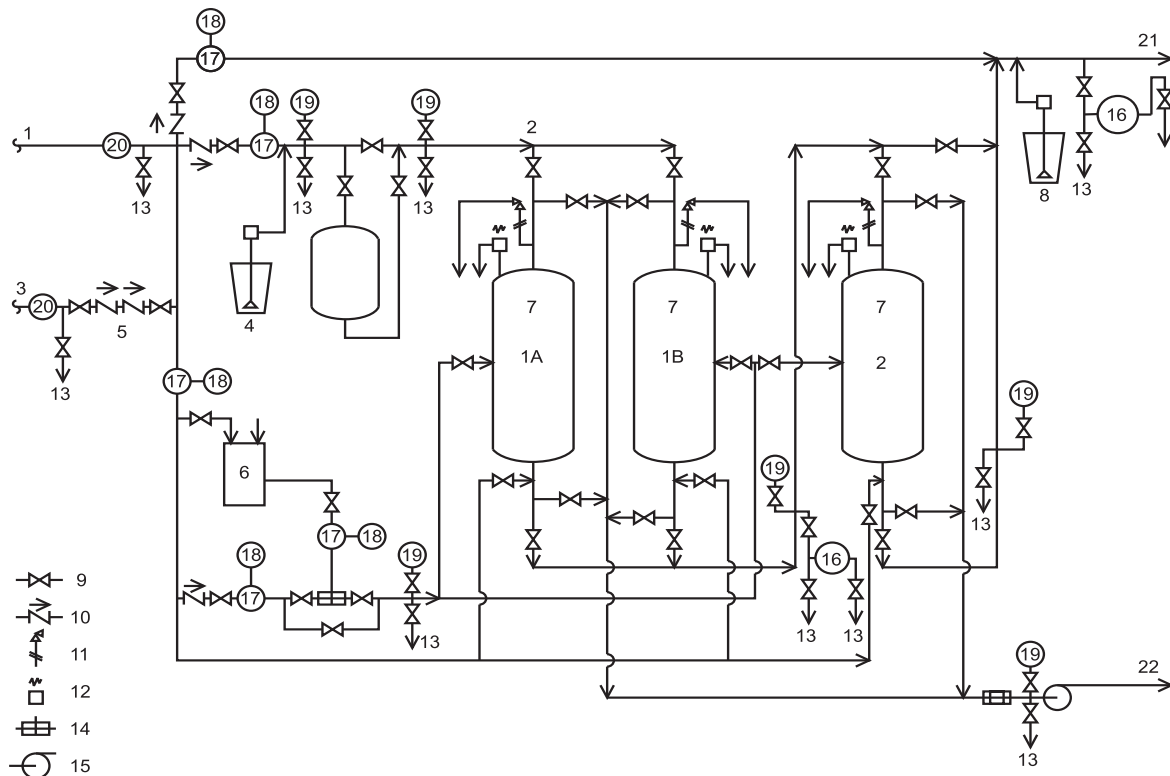
Experimentální data umožní jednak prognózu technologických parametrů, stanovení objemového nebo specifického zatížení kolony  $B_V$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ], ale také předpověď výsledného složení roztoku po úpravě včetně parametrů rozhodujících o ekonomice sanace (frekvence regenerace, produkce a složení odpadních vod). Sanační zařízení pro úpravu kontaminovaných vod na bázi syntetických iontoměníčů pracují dynamickým způsobem.

V současnosti se využívá automatických ionexových stanic ve formě náplňových kolon, přičemž se rozlišuje způsob provozu s regenerací přerušovaným nebo kontinuálním provozem stanice. Důležitý je směr protékání regeneračního média. Provozně efektivnější, pracující s nižším přebytkem regeneračního činidla (asi o 20 %), ale nákladnější, jsou zařízení s protiproudou regenerací, běžné sestavy jsou regenerovány souprou-

dem regeneračního činidla. Po vyčerpání užitečné kapacity iontoměníče je nutno ionex proprat a zregenerovat.

Na obr. č. 3.2.2-10 uvádíme technologické schéma ionexové stanice zaměřené na snižování obsahu  $\text{As}^{3+}$  iontoměníči (rozpracovali Wang a kol., 2000). Nejprve je  $\text{As}^{3+}$  oxidován na  $\text{As}^{5+}$  a ve formě  $\text{AsO}_3^-$  zachycen na anionaktivním iontoměníči. Z technologického schématu je zřejmé, že optimální funkce zařízení je podmíněna separací nerozpuštěných látek na vstupu, monitorováním pH a oxidačně-redukčního potenciálu. Kontrola složení odpadních vod z regenerace se zajišťuje obvykle konduktometricky.

Z přírodních materiálů vykazují pro sanační účely nejvýhodnější iontovýmenné vlastnosti tektosilikáty, zeolity a jílové minerály. Klinoptiolit a chabazit se používají k odstraňování těžkých kovů a radionuklidů a jsou základem reaktivních bariér bránících šíření těžkých kovů. Z důvodu zvýšení reakčního povrchu se dávku-



Obr. č. 3.2.2-10 Přehledné technologické schéma ionexové stanice zaměřené na odstraňování  $\text{As}^{5+}$  po oxidaci  $\text{As}^{3+}$  (Wang a kol., 2000)

1 – ze zdroje, 2 – surová voda, 3 – zdroj vody pro regeneraci a zpětný proplach, 4 – zásobník preoxidačního činidla, 5 – pojistný ventil, 6 – solanková nádrž, 7 – reaktor s iontovýmennou náplní, 8 – zásobník činidla pro nastavení pH, 9 – řídicí ventil, 10 – regulační ventil, 11 – redukční ventil, 12 – podtlakový ventil, 13 – vzorek, 14 – injektor, 15 – oběhové čerpadlo instalované v potrubí, 16 – čidlo a měření pH, 17 – čidlo průtoku, 18 – součtový průtokoměr, 19 – čidlo tlaku, 20 – teplotní čidlo, 21 – smíchaná voda, 22 – k zásobníku odpadních vod