



Príprava nástrojov pre implementáciu smernice Európskeho parlamentu  
a Rady 2006/21/ES o nakladaní s odpadom z ťažobného priemyslu

Projekt Prechodného fondu UIBF č. 2006/018-175.06.01  
realizovaný v zmysle zmluvy č. 200601817506-0101-0003

# **METODICKÝ POKYN NA SANÁCIU A REKULTIVÁCIU UZAVRETÝCH A OPUSTENÝCH ÚLOŽÍSK ODPADOV Z ŤAŽOBNÉHO PRIEMYSLU**

(Aktivita 2)

Jún 2009

Vypracoval: RNDr. Radovan Masiar, ENVIGEO, a.s., Banská Bystrica

Správa bola schválená Riadiacim výborom dňa:

## OBSAH

<b>I. ČASŤ .....</b>	<b>3</b>
<b>ÚČEL A POUŽITIE METODICKÉHO POKYNU.....</b>	<b>3</b>
<b>II. ČASŤ .....</b>	<b>4</b>
<b>VYMEDZENIE ZÁKLADNÝCH POJMOV .....</b>	<b>4</b>
<b>III. ČASŤ.....</b>	<b>5</b>
<b>POSTUP PRI NAVRHOVANÍ A REALIZÁCII SANÁCIE A REKULTIVÁCIE UZAVRETÝCH A OPUSTENÝCH ÚLOŽÍSK.....</b>	<b>5</b>
<b>III.1 Rekultivácia a sanácia – čo tieto pojmy zahŕňajú a ich vzájomný vzťah.....</b>	<b>5</b>
<b>III.2 Ciele rekultivácie a sanácie .....</b>	<b>5</b>
III.2.1 Geotechnická a filtračná stabilita.....	6
III.2.2 Chemická stabilita.....	6
III.2.3. Biologická stabilita.....	6
<b>III.3 Postup pri navrhovaní a realizácii sanácie a rekultivácie uzavretých a opustených úložísk .....</b>	<b>7</b>
III.3.1 Najčastejšie problémy, ktorým je potrebné rekultiváciou predchádzať, alebo ak už vznikli, sanáciou odstrániť .....	8
III.3.2 Inžinierskogeologický prieskum a geologický prieskum životného prostredia.....	8
III.3.3 Základné aspekty uzavretia úložiska.....	9
III.3.3.1 Modelovanie konečného tvaru telesa úložiska a jeho stabilita.....	9
III.3.3.2 Stanovenie a realizácia konečných svahových uhlov odvalov.....	9
III.3.3.3 Úpravy povrchu telesa úložiska.....	10
<b>III.4 Prehľad používaných sanačných a rekultivačných opatrení.....</b>	<b>11</b>
III.4.1 Uzávierka úložísk obsahujúcich nereaktívne hlušiny z ťažby a úpravy .....	11
III.4.1.1 Odkaliská s vodným pokryvom .....	12
III.4.1.2 Odvodnené odkaliská a odvaly .....	13
III.4.1.3 Typické spôsoby prekrytia .....	13
III.4.2 Uzávierka úložísk obsahujúcich ťažobný odpad s potenciálom tvorby kyslých priesakových kvapalín.....	14
III.4.2.1 Zaplavenie úložiska - vodný „mokrý“ pokryv .....	15
III.4.2.2 Prekrytie úložiska - „suchý“ pokryv.....	15
III.4.2.3 Informatívne porovnanie - príklady uzavretia skládok podľa podmienok STN 83 8104 .....	17
III.4.2.4 Pokryv spotrebovávajúci kyslík .....	18
III.4.2.5 Vytvorenie mokrade .....	18
III.4.2.6 Zvýšená hladina podzemných vôd.....	19
III.4.3 Odvaly hlušiny z úpravy uhlia .....	19
<b>III.5 Nakladanie s vodami a priesakovými kvapalinami.....</b>	<b>19</b>
III.5.1 Vodná bilancia .....	19

III.5.2 Podmienky riadenia vzniku a migrácie kyslých priesakových kvapalín .....	20
III.5.3 Nakladanie s odsedimentovanou vodou.....	21
III.5.4 Nakladanie s priesakmi .....	21
III.5.5 Regulácie priesakov .....	23
III.5.6 Techniky na zníženie emisií do vody.....	24
III.5.6.1 Úprava rozpustených kovov.....	24
III.5.6.2 Suspendované častice a rozpustené látky .....	24
III.5.6.3 Úprava kyslých vôd.....	24
III.5.6.4 Úprava alkalických vôd .....	26
III.5.6.5 Úprava vôd s obsahom arzénu.....	26
III.5.6.6 Odstraňovanie kyanidov .....	26
III.5.7 Monitorovanie podzemnej vody .....	27
<b>III.6 Remediačné a rekultivačné metódy na elimináciu negatívnych vplyvov spôsobených odpadmi z ťažobného priemyslu.....</b>	<b>28</b>
III.6.1 Technológie sanácie zemín in situ .....	28
III.6.1.1 Biologické postupy.....	28
III.6.1.2 Fyzikálne a chemické postupy.....	28
III.6.2 Technológie sanácie zemín ex situ.....	32
III.6.2.1 Biologické postupy.....	32
III.6.2.2 Chemické a fyzikálne metódy.....	33
III.6.3 Technológie sanácie podzemných vôd a priesakových kvapalín in situ.....	35
III.6.3.1 Biologické postupy.....	35
III.6.3.2 Chemické a fyzikálne metódy.....	36
III.6.4 Technológie čistenia vody ex situ.....	40
III.6.4.1 Biologické metódy.....	40
III.6.4.2 Chemické a fyzikálne metódy.....	40
<b>POUŽITÁ LITERATÚRA: .....</b>	<b>43</b>

## **METODICKÝ POKYN**

.....

### **NA SANÁCIU A REKULTIVÁCIU UZAVRETÝCH A OPUSTENÝCH ÚLOŽÍSK ODPADOV Z ŤAŽOBNÉHO PRIEMYSLU (návrh)**

#### **I. časť**

#### **Účel a použitie metodického pokynu**

Metodický pokyn na sanáciu a rekultiváciu uzavretých a opustených úložísk odpadov z ťažobného priemyslu (ďalej „ťažobný odpad“) je jedným z dokumentov vypracovaných za účelom implementácie smernice Európskeho parlamentu a rady 2006/21/ES („O nakladaní s odpadom z ťažobného priemyslu“), ktorá bola do právnej praxe Slovenskej republiky uvedená zákonom č. 514/2008 Z. z. o nakladaní s odpadom z ťažobného priemyslu a o zmene a doplnení niektorých zákonov. Článok 12 citovanej smernice ukladá členským štátom Európskej únie prijať opatrenia na dodržanie povinností prevádzkovateľa, ktorý je zodpovedný za zabezpečenie, monitorovanie, kontrolu a nápravné opatrenia v etape po definitívnom uzavretí zariadenia na nakladanie s odpadmi.

Cieľom metodického pokynu na sanáciu a rekultiváciu uzavretých a opustených úložísk je poskytnúť súhrnné informácie o environmentálne bezpečných, všeobecne akceptovaných a technicky realizovateľných rekultivačných postupoch a sanačných technológiách. Pokyn je zameraný na potreby praxe a nezahŕňa technologické riešenia, ktoré zatiaľ nenašli širšie praktické uplatnenie, alebo neboli odskúšané v plnej miere.

## II. časť

### Vymedzenie základných pojmov

**Úložisko** je miesto alebo zariadenie určené na zhromažďovanie alebo ukladanie ťažobného odpadu v tuhom stave, roztoku alebo suspenzii. Za úložisko sa považuje odval a odkalisko<sup>1</sup>.

**Odval** je umelo vybudované zariadenie na ukladanie tuhého ťažobného odpadu na zemskom povrchu<sup>2</sup>.

**Odkalisko** je prírodné alebo umelo vybudované zariadenie na zneškodnenie jemnozrnného ťažobného odpadu, spravidla hlušiny zmiešanej s rôznym množstvom vody pochádzajúcej z úpravy nerastov a z čistenia alebo recyklácie vody z prevádzky<sup>3</sup>.

**Opustené úložisko ťažobného odpadu** je úložisko, ktoré je ponechané pôvodným vlastníkom alebo prevádzkovateľom v neudržovanom stave.

**Uzavreté úložisko ťažobného odpadu** je úložisko, ktoré je udržiavané pôvodným vlastníkom alebo prevádzkovateľom v neškodnom stave.

**Rekultivácia** je taká úprava územia ovplyvneného úložiskom, ktorá umožní návrat do uspokojivého stavu s osobitným dôrazom na kvalitu pôdy, voľne žijúce živočíchy a voľne rastúce rastliny, prirodzené biotopy, sladkovodné ekosystémy, krajinu a vhodné využitie územia<sup>4, 5</sup>.

**Sanácia** je súbor technických nápravných opatrení, ktorých účelom je zníženie alebo odstránenie znečistenia pôdy, horninového prostredia, podzemnej a povrchovej vody, vzniknutého v dôsledku nevhodného ukladania ťažobného odpadu, prípadne zabránenie ďalšieho šírenia sa znečistenia alebo ohrozovania zdravia ľudí.

**Monitoring** je sledovanie dlhodobých účinkov úložiska ťažobného odpadu na vybrané zložky životného prostredia, alebo sledovanie účinnosti rekultivácie a sanácie úložísk odpadov z ťažobného priemyslu na vybrané zložky životného prostredia.

**Priesaková kvapalina** je akákoľvek kvapalina presakujúca cez uložený ťažobný odpad a unikajúca z úložiska alebo v ňom uložená vrátane znečistenej drenážnej vody, ktorá môže nepriaznivo vplývať na životné prostredie, ak sa vhodne neupraví.

<sup>1</sup> § 4 ods. 1 a 2 zákona č. 514/2008 Z. z.

<sup>2</sup> § 4 ods. 3 zákona č. 514/2008 Z. z.

<sup>3</sup> § 4 ods. 4 zákona č. 514/2008 Z. z.

<sup>4</sup> § 4 ods. 8 zákona č. 514/2008 Z. z.

<sup>5</sup> § 31ods. 4,5,6 zákona č. 44/1988 Zb.

### III. časť

## Postup pri navrhovaní a realizácii sanácie a rekultivácie uzavretých a opustených úložísk

### III.1 Rekultivácia a sanácia – čo tieto pojmy zahŕňajú a ich vzájomný vzťah

Pojmy „rekultivácia“ a „sanácia“ sú obsahom blízke a v praxi sa často zamieňajú.

V zásade by sme mali používať termín „sanácia“ vždy tam, kde súčasťou vykonávaných prác je odstraňovanie alebo znižovanie kontaminácie prírodného prostredia, vrátane jej bezpečného a dlhodobého izolovania vo vymedzenom priestore.

Termín „rekultivácia“ používame skôr tam, kde je cieľom prác prinavrátenie územia poškodeného ťažbou do krajiny. Pritom podľa spôsobu využívania rekultivovaného územia rozoznávame nasledovné druhy rekultivácie:

1. „pôdohospodárska“ (tiež „poľnohospodárska“) rekultivácia vracia územie vo forme pasienkov alebo ornej pôdy na pôdohospodárske využitie,
2. „lesnícka“ (alebo „lesná“) rekultivácia vytvorí na rekultivovanom území les,
3. „vodohospodárska“ (alebo „vodná“) rekultivácia vytvorí v území – ťažobnej jame alebo odkalisku – vodné dielo.

Niekedy sa súbor rekultivačných opatrení, ktorého výsledkom je využiteľná plocha bez bližšej špecifikácie označuje aj ako „technická rekultivácia“. V podstate ide o prvú etapu rekultivácie, ktorá zanechá územie pripravené na ďalšiu výstavbu, najčastejšie (ale nie výlučne) na urbanizáciu. Potom „biologická rekultivácia“, ktorá niekedy nadväzuje na „technickú“, je vlastne zazelenenie, teda súbor opatrení, ktorým sa určí ďalší spôsob využívania územia charakterom výsadby (trávnik, špecifické bylinné spoločenstvá, kry a stromy). V tomto prípade termín „biologická rekultivácia“ môže byť ekvivalentom pôdohospodárskej alebo lesníckej rekultivácie, ale môže označovať aj ostatné využitie (najmä parkové úpravy v aglomeráciách, ihriská a podobne).

Pretože rekultivačné a sanačné práce používajú rovnaké alebo podobné techniky a najmä pri opustených úložiskách sa často prelínajú, predkladaný metodický pokyn o nich pojednáva spoločne.

### III.2 Ciele rekultivácie a sanácie

Technológiu rekultivácie je potrebné vždy navrhovať s ohľadom na budúce využívanie územia (priemyselné, poľnohospodárske, lesnícke, rekreačné a iné). Základom rekultivácie je vytvorenie nového povrchu, preto už vo fáze návrhu je potrebné vedieť, spôsob budúceho využitia okolia rekultivovaného územia. Táto skutočnosť má okrem vlastných technických a technologických podmienok vplyv aj na voľbu technického spôsobu rekultivácie, či sanácie.

**Rekultiváciou** sa musia zabezpečiť dlhodobo vyhovujúce charakteristiky telies odvalov a odkalísk v týchto kategóriách:

- 1) geotechnická (fyzikálna) stabilita úložiska prevyšujúceho pôvodnú úroveň terénu,
- 2) chemická a filtračná stabilita,
- 3) biologická stabilita,

- 4) zamedzenie alebo minimalizácia akýchkoľvek dlhodobých negatívnych účinkov, ktoré by mohli vyplývať najmä z migrácie znečisťujúcich látok z úložiska ovzduším, podzemnými vodami, alebo povrchovými vodami.

**Sanáciou** sa zabezpečuje:

- 1) odstránenie alebo fixovanie nebezpečných látok ktoré unikajú, alebo majú potenciál unikať do prostredia mimo telesa úložiska, alebo zníženie ich koncentrácie na prípustnú mieru.

### **III.2.1 Geotechnická a filtračná stabilita**

Geotechnická a filtračná stabilita zahŕňa:

- stabilitu hrádzí odkalísk a ich podložia,
- stabilitu svahov odkalísk a odvalov,
- filtračnú stabilitu materiálov konštrukcie hrádze a odkaliska - odolnosť voči sufózii,
- odolnosť voči potenciálnym geodynamickým javom a zvetrávaniu (zemetrasenie, erózia - vodná, veterná, chemická, mrazová a iná, zvetrávanie a geodynamické javy, povodne, svahové pohyby a pod.),
- účinky stavebných zásahov, otrasov (napr. dopravných), poddolovania, účinky vegetácie, živočíchov a nepovolanych osôb,
- režim podzemných a priesakových vôd, úrovne hladín, rýchlosti prúdenia (gradienty), vývery v hrádzi, na vzdušnej päte a v predpolí hrádze a svahoch.

### **III.2.2 Chemická stabilita**

Chemická stabilita zahŕňa:

- chemickú stabilitu materiálov konštrukcie hrádze a odkaliska, agresívne účinky ukladanej hlušiny a jej výluhov,
- chemizmus podzemných vôd a priesakových kvapalín a jeho časové zmeny, ovplyvnenie podzemných a povrchových vôd v širšom okolí odkaliska alebo odvalu,
- odolnosť voči uvoľňovaniu tuhých, tekutých a plyných emisií do okolia,
- odolnosť voči tleniu a horeniu,
- zabránenie prenikaniu polutantov do prostredia pod odkaliskom a jeho nasledujúcu degradáciu, vrátane povrchových a podzemných vôd.

### **III.2.3. Biologická stabilita**

Biologická stabilita zahŕňa:

- prírodný, vyvážený ekosystém, typický pre danú oblasť a/alebo introdukcia biologicky rozmanitého prirodzeného prostredia, alebo taký stav, aby sa podporila prirodzená obnova.

### III.3 Postup pri navrhovaní a realizácii sanácie a rekultivácie uzavretých a opustených úložísk

O konečnom využití povrchu úložiska ťažobného odpadu je potrebné rozhodnúť v dostatočnom časovom predstihu pred uzavretím úložiska, aby bolo možné vypracovať projekt zodpovedajúcej rekultivácie a aby sa plánovanému využitiu prispôbilo aj prekrytie úložiska<sup>6</sup>. Rekultivácia úložiska môže byť **postupná**, počas prevádzky alebo **definitívna** po skončení prevádzky. Výsledkom definitívnej rekultivácie má byť opätovné včlenenie územia úložiska do krajiny s minimálnym vplyvom na jednotlivé zložky životného prostredia. Rozsah a požiadavky na rekultiváciu závisia od budúceho využitia územia úložiska, ktorý môže byť (pozri tiež kapitolu III.1):

- na parkové, športové a rekreačné účely,
- na poľnohospodárske účely,
- na lesnícke účely,
- na iné účely.

Okrem plánovaného spôsobu využitia územia projekt rekultivácie tiež zohľadňuje potenciálne vplyvy uzavretého a rekultivovaného úložiska na zložky prírodného prostredia chránené osobitnými predpismi<sup>7</sup>.

Návrh uzavretia a rekultivácie úložiska sa vypracúva na základe vyhodnotenia dokumentácie odkaliska, ktorú zvyčajne tvoria projekty, etapové správy a súhrnné etapové správy o výkone dohľadu nad vodnou stavbou (týka sa odkalísk), písomné záznamy z prehliadok úložísk, pasporty alebo iné doklady o opravách a rekonštrukciách, prevádzkové denníky, fotografická dokumentácia a rozhodnutia orgánov štátnej správy. V rámci návrhu uzavretia a rekultivácie úložiska sa hodnotí bezpečnosť v jednotlivých etapách jeho výstavby a prevádzky, dokumentuje sa jeho vplyv na blízke i vzdialenejšie okolie, určí sa spôsob jeho uzavretia a rekultivácie, prípadne možnosti druhotného využitia deponovaných odpadov.

V rámci prípravy rekultivácie odkaliska alebo odvalu je potrebné za základe vyhodnotenia uvedených podkladov navrhnúť opatrenia zamerané na:

- minimalizáciu dlhodobých účinkov na životné prostredie v okolí odkaliska (chemická stabilita),
- zaručenie dlhodobej bezpečnosti a stability hrádzí a telesa odkaliska (geotechnická stabilita),
- včlenenie do prírodného prostredia (biologická stabilita).

Riešenie sa navrhuje v projekte rekultivácie alebo sanácie (u nových úložísk už v pláne nakladania)<sup>8</sup>, ktorý obsahuje aj harmonogram sledovania bezpečnosti, v ktorom sú určené rozhodujúce javy a skutočnosti zaručujúce bezpečnosť úložiska a spôsob ich sledovania.

Sledovanie technickej bezpečnosti sa v období rekultivácie vykonáva priebežne podľa harmonogramu, pričom bežné merania a pozorovania sú doplnené predovšetkým o dokumentáciu postupu rekultivácie a dokumentácie ustálenia režimu priesakových kvapalín a podzemných vôd.

<sup>6</sup> Všeobecné požiadavky v súlade s STN 83 8104

<sup>7</sup> Zákon č. 364/2004 Z. z. v znení neskorších predpisov, zákon č. 538/2005 Z. z. v znení neskorších predpisov, zákon č. 543/2002 Z. z. v znení neskorších predpisov

<sup>8</sup> § 5 zákona č. 514/2008 Z. z.



### III.3.1 Najčastejšie problémy, ktorým je potrebné rekultiváciou predchádzať, alebo ak už vznikli, sanáciou odstrániť

- *geomechanické* - deformácie povrchu telesa ťažobného ťažobného, geodynamické javy, narušená statická a dynamická stabilita odkaliska alebo odvalu ako celku, tak i jednotlivých svahov a objektov, deformácia hrádze a telesa odkaliska a jeho hlavných objektov, poklesy, trhliny v hrádzi a svahoch okolia odkaliska, deformácia podložja hrádze odkaliska, sufózia, degradácia fyzikálno-mechanických vlastností stavebných materiálov hrádze odkaliska a ich zmeny v čase;
- *hydrogeologické* - zmeny hladín a režimu prúdenia podzemných vôd, deformácie povrchu v dôsledku odvodnenia alebo podmáčania, funkčnosť a stav ochranných drenážnych a tesniacich prvkov odkaliska alebo odvalu a jeho podložja, neželateľné priesaky;
- *geochemické a hydrogeochemické* - vynášanie nebezpečných látok na povrch, tvorba kyslých vôd a nebezpečných priesakových kvapalín, únik priesakových kvapalín, emisie plynov, znečistenie podzemných a povrchových vôd a následná kontaminácia horninového prostredia (zemín);
- *fyzikálno-mechanické* - emisie prachu a aerosólov, veterná erózia, tlenie a horenie;
- *iné* - škody na flóre a faune, vizuálne hľadiská.

### III.3.2 Inžinierskogeologický prieskum a geologický prieskum životného prostredia

Keď nie je k dispozícii dostatok údajov o ťažobnom ťažobnom potrebných pre vypracovanie projektu rekultivácie alebo sanácie, je pred samotnou rekultiváciou alebo sanáciou potrebné vykonať inžinierskogeologický prieskum a/alebo geologický prieskum životného prostredia<sup>9</sup> a naň nadväzujúci monitoring. Rozsah a druh geologických prác sa navrhuje individuálne podľa špecifických podmienok ťažobného ťažobného<sup>10</sup>. Na základe informácií z prieskumu sa posúdi charakter materiálu, z ktorého je ťažobné ťažobné vytvorené, vykoná sa petrografické overenie zloženia hornín, stanovenie obsahu nebezpečných látok, stanovenie potenciálu tvorby kyselín<sup>11</sup> alebo zásad, termických procesov, uvoľňovanie plynov, spresnenie litológie a geomechanických vlastností materiálu ťažobného ťažobného a podložných hornín.

Z ekonomických dôvodov nie je nutné všetky vrty zahĺbiť až do podložja. Je nutné vybrať niekoľko reprezentatívnych vrto, ktoré sa zahĺbia min. 2 m – 3 m do podložja. Tieto vrty je vhodné zapažiť a využiť ako trvalé monitorovacie objekty. Na základe výsledkov geologického prieskumu a monitoringu sa navrhne samotný technický spôsob sanácie.

Pokiaľ sa vrtmi nepodarí naraziť na hladinu podzemnej vody, pokladáme podložie ťažobného ťažobného za nezvodnené vtedy, ak nezvodnený vrt alebo vrty mal hĺbku aspoň 30 m.

<sup>9</sup> Zákon č. 569/2007 Z. z. v znení neskorších predpisov

<sup>10</sup> Napr. STN EN ISO 14688-1,2 a 14689, STN EN 1997-1 a 2, EN ISO 22475-1 a 22476-2,3, EN ISO 22 282

<sup>11</sup> V príprave EN 15875 Charakterizácia odpadov. Statická skúška na stanovenie potenciálu tvorby kyselín u odpadov obsahujúcich sírniky.

### III.3.3 Základné aspekty uzavretia úložiska

Pred uzavretím úložiska sa vykonáva inventúra a súpis aktuálneho stavu všetkých zariadení používaných počas prevádzky úložiska. Všetky odstavené a nepotrebné zariadenia je potrebné vo fáze uzatvárania odstrániť a to hlavne vtedy, keď sú možné ich negatívne vplyvy na bezpečnosť a stabilitu.

#### III.3.3.1 Modelovanie konečného tvaru telesa úložiska a jeho stabilita

Nedostatočná stabilita svahov úložiska býva častý problém. Stupeň bezpečnosti (stability) generálnych svahov úložiska sa stanovuje výpočtovými alebo grafickými metódami na základe parametrov a laboratórnych rozborov vzoriek materiálu získaných počas prevádzky úložiska, alebo v rámci inžinierskogeologického prieskumu realizovaného po jeho uzavretí. Na začiatku riešenia stability je posúdenie odkaliska alebo odvalu a následné vypracovanie stabilitného posudku. Na riešenie stability je možné použiť zaužívané metódy medznej rovnováhy alebo deformačné metódy. Generálne svahy telies úložísk s nízkym stupňom bezpečnosti (stability) môžu byť z dlhodobého hľadiska ohrozené gravitačnými deformáciami, čím sa otvárajú cesty k väčším nežiaducim prienikom vzdušného kyslíka a zrážkových vôd do telesa úložiska. Pokiaľ sú telesá dlhodobo nestabilné, je potrebné pristúpiť k technickej sanácii. Na základe posudku sa vypracuje projekt technickej sanácie stability telesa úložiska, ktorý zahŕňa preformátovanie svahov a jednotlivých etáží s ohľadom na výsledky stabilitných výpočtov.<sup>12</sup> V zmysle referenčného dokumentu BAT<sup>13</sup> sa vyžaduje hodnota stupňa faktora bezpečnosti po uzavretí úložiska minimálne 1,3, pričom pri úložiskách s trvalým vodným pokryvom je vhodnejšie technickými opatreniami dosiahnuť hodnotu 1,5. Čím vyšší faktor bezpečnosti sa dosiahne po uzavretí úložiska, tým viac je následne možné redukovať náklady na dlhodobý monitoring úložiska po jeho uzavretí.

#### III.3.3.2 Stanovenie a realizácia konečných svahových uhlov odvalov

Konečné tvarovanie svahov odvalov je závislé od viacerých faktorov, navrhnutej technológie izolovania svahov, použitého materiálu na izoláciu, plošných možností tvarovanie svahov (prisýpanie, odťazovanie), výsledkov monitoringu a ekonomických kritérií. Dva základné spôsoby tvarovania etáží a podetáží sú (Cehlár et al., 2005):

- šikmý konečný tvar svahového uhla,
- terasovitý konečný tvar svahového uhla.

Výška etáží závisí od geomechanických vlastností uloženého materiálu so zohľadnením potenciálnych exogénnych vplyvov (erózie). Šírka vytváranej etážnej plošiny závisí od svahového uhla a od použitej mechanizácie. Výška jednotlivých terás (podetáží) pri určenom svahovom uhle je daná geomechanickými vlastnosťami materiálu úložiska. Etážna rovina sa proti prelievaniu zrážkových vôd zabezpečuje zošikmením v smere kanálov na odvod povrchových vôd.

<sup>12</sup> Vyhláška Slovenského banského úradu č. 29/1989 Zb.

<sup>13</sup> Reference document on best available techniques for management of tailings and waste-rock in mining activities, EC DG JRC, 2004

### III.3.3.3 Úpravy povrchu telesa úložiska

- **Technická etapa**

Konečné utlmenie nežiaducich procesov v telese úložiska sa dosiahne jeho zaizolovaním, odvedením povrchových a zrážkových vôd a vykonaním biologickej rekultivácie (presun zemín, ukladanie, rozprestieranie, hutnenie s prednostným využitím odstránenej ornice). Zatesnenie a zaizolovanie telesa odkaliska bráni kontaktu odpadov s nebezpečnými vlastnosťami, resp. s potenciálom tvorby kyselín (zásad) s vonkajším prostredím a tým i podmienok smerujúcim k oxidácii alebo samovznieteniu organických zložiek odvalu.

Všeobecne platí, že nízky odval rozprestretý na veľkej ploche je odolnejší voči oxidácii ako vysoké kužeľovité odvaly s rovnakým objemom hmoty. V prípade ich ukladania v horných vrstvách, alebo na povrchu odvalu alebo odkaliska bude technológia rekultivácie náročnejšia. Prednostne je treba projektovať selektívne ukladanie, nebezpečný odpad sa má ukladať v najnižších vrstvách odvalu, pokiaľ je to technologicky možné. Takto uložený odpad nepríde do kontaktu s úrodnými vrstvami a nebude vplývať na rastlinné a živočíšne spoločenstvá. Odpad, ktorý nie je inertný, nemá prísť do kontaktu s priesakovými kvapalinami a podzemnou vodou. Toxický materiál sa pokrýva neutrálnym materiálom a v prípade potreby sa odval prekrýva vodonepriepustnými materiálmi.

Konečné uzavretie povrchu telesa úložiska v rámci rekultivácie je veľmi náročná činnosť. Navezený materiál dlhodobo pracuje – môže sa stláčať alebo inak deformovať. S týmito procesmi sa musí počítať. Tesniaci systém musí byť tesný proti priesakom vody (povrchovej vody, ako aj priesakových kvapalín), dlhodobo odolný proti možným fyzikálnym a chemickým vplyvom, exogénnym vplyvom a schopný prekonať predpokladané deformácie telesa úložiska. Tesniaca vrstva sa podľa potreby doplní ďalšími technologickými vrstvami, a to drenážnou, oddeľovacou, ochrannou alebo výstužnou.

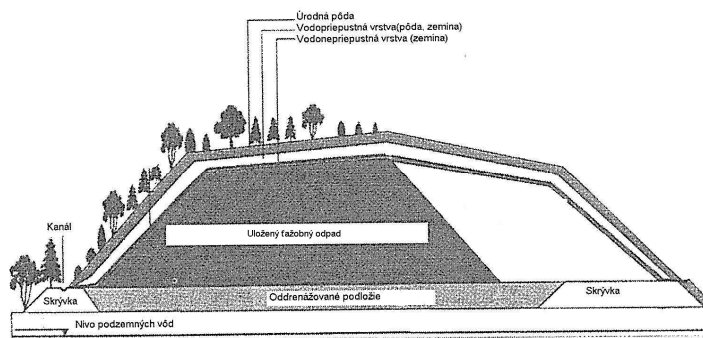
- **Biotechnická etapa**

Po uzavretí a v prípade potreby utesnení telesa úložiska nastupuje biotechnická etapa, ktorá má za úlohu oživiť a stabilizovať rekultivované územie zeleňou. Technické možnosti rekultivácie odvalu pevnej horniny sú podmienené tvarom, umiestnením, veľkosťou a výškou úložiska. Najjednoduchšie riešenie je úložisko prekryť úrodnou pôdou (odstránená a uložená pôda pred budovaním odvalu). Úrodnej pôdy je väčšinou nedostatok, preto sa vykonávajú zložitejšie riešenia, ako napríklad úprava fyzikálnych a chemických vlastností pôd (kyslosť, štruktúra), hnojenie a dodávanie živín do pôd, agrotechnické opatrenia. V prípade nízkeho pH (menej ako 4,5) je potrebné zvýšiť pH na hodnoty približne 6,0. Svahy odvalu (etáží) je potrebné chrániť protieróznymi opatreniami.

Biologická rekultivácia závisí od mineralogického zloženia uloženého materiálu. Pre poľnohospodárske kultúry sú vhodné nízke odvaly so zodpovedajúcou kvalitou uloženého materiálu (podiel súdržných zemín a humusu). Stredne vysoké a nízke odvaly s kyslými pôdami sa najčastejšie zalesňujú. Vysadia sa stromy, na ostatných plochách sa môže začať špeciálny oševný cyklus, ktorý má zúrodniť pôdu.

Obvyklý spôsob vykonávania poľnohospodárskej rekultivácie spočíva v navezení a rozprestretí organickej hmoty, nasleduje orba, vláčenie, smykovanie, sejba prípravných plodín, ich zaoranie, hnojenie a nasleduje už pestovanie cieľových plodín alebo zatrávenie.

V dôsledku zhoršených hydropedologických podmienok je v zrážkovo deficitných obdobiach potrebné zavlažovanie založených rastlinných kultúr. Veľmi často je používaná chemická príprava pôdy pred vlastným zatravnovaním či zalesňovaním, pokiaľ sú plochy intenzívne zarastené rudernou vegetáciou. K jej odstráneniu sa používajú chemické postreky.



Obrázok 1: Schematický príklad rekultivácie ťažiska (upravené podľa Cehlára et al., 2005)

### III.4 Prehľad používaných sanačných a rekultivačných opatrení

Ťažobné odpady sú vo všeobecnosti tvorené rôznorodými materiálmi v závislosti od druhu ťažených surovín a geologických pomerov na ložisku. Časť odpadov nepredstavuje bezprostredné alebo potenciálne riziko pre okolie. Za nebezpečné odpady (kategória A) sa považujú odpady z ťažby kovov (mobilné kovy, rozpustené a suspendované formy), osobitne z ťažby sulfidických rúd (tvorba kyslých bankých vôd a mobilizácia prvkov) a zlata (kyanidové technológie úpravy, mobilizácia kovov) (Vrana et al., 2008).

Ako efektívny nástroj na aplikáciu najlepších dostupných techník (*Best Available Techniques – BAT*) pre elimináciu alebo obmedzenie poškodzovania prostredia a zdravia bol vypracovaný Referenčný dokument na aplikáciu najlepších dostupných techník (BAT) pre nakladanie s hlušinou a odpadmi pri banskej činnosti (*European Commission, Directorate General JRC, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, 2004*). Uvedený dokument predstavuje komplexný prehľad najmodernejších techník používaných pri nakladaní z ťažobnými odpadmi na rozmanitých ložiskách rudných a nerudných surovín v rámci Európskej únie, z ktorého je možné vychádzať pri návrhu sanácie a rekultivácie uzavretých a opustených ložísk v Slovenskej republike. V nasledujúcich kapitolách uvádzame odskúšané spôsoby uzavretia rôznych typov ťažísk odpadov z ťažobného priemyslu.

#### III.4.1 Uzávierka ťažísk obsahujúcich nereaktívne hlušiny z ťažby a úpravy

Pri uzávierke odkalísk a odvalov obsahujúcich inertný ťažobný odpad musia byť vyriešené tieto problémy:

- dlhodobá fyzikálna stabilita,
- úprava terénu a ozelenenie,
- prevencia erózie a prašnosti.

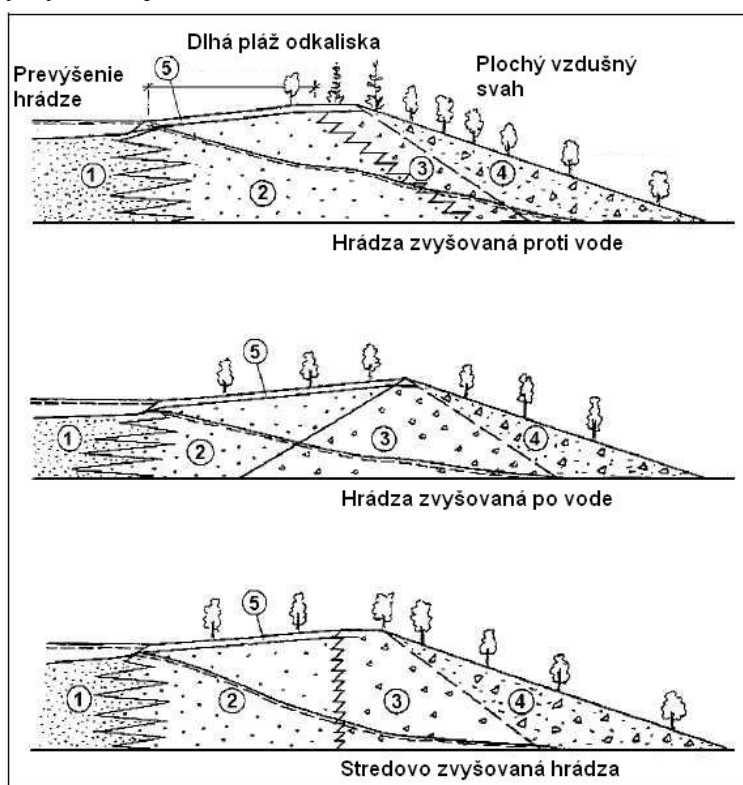
Hladina podzemnej vody sa technickými opatreniami udržiava pod povrchom uloženého odpadu prostredníctvom priepadu tak, aby sa zabránilo porušeniu päty hrádze. Teleso ťažiska

odpadu sa prekryje zeminami s vyhovujúcimi parametrami, je zatravnené a sú vysadené kríky a stromy.

### III.4.1.1 Odkaliská s vodným pokryvom

Hrádza odkaliska musí dosahovať predpísaný stupeň bezpečnosti nielen počas prevádzkového obdobia, ale aj po uzavretí. Podľa skúseností vzdušné svahy hrádzí navrhnuté na trvalé zadržiavanie vody so sklonom menším ako 1 : 3 sú v európskych podmienkach mierneho pásma dlhodobu stabilné z hľadiska vodnej a veternej erózie, premrzania, zvetrávania. Taktiež podporujú rast vegetácie, čo znižuje vplyvy pomalých degradačných procesov. Dĺžka pláže (vzdialenosť od okraja trvalej vodnej plochy ku korune hrádzu) má byť čo najväčšia. Dôvodom je zlepšenie stability svahu a zníženie rizika sufózie v dôsledku zníženia gradientu hladiny a plochejšieho priebehu prúdnic. Táto plocha sa pri uzávierke prekryje nepriepustnou vrstvou materiálu na zabránenie infiltrácie zrážkových vôd, prevzdušňovania a zvetrávania.

**Vypúšťacia kapacita** by mala byť 2,5 krát väčšia ako najvyšší kedykoľvek v minulosti zaznamenaný prietok (napr. storočná voda). Ak je realizované trvalé riešenie s vodným pokryvom, výpusť musí mať dlhodobú stabilitu a mal by byť vybudovaný ako priepad v prirodzenej hornine, nie v hrádzi. V telese hrádzu a pod päťou hrádzu je potrebné navrhnuť drenážne prvky na zamedzenie sufózných javov. Bezpečnostný faktor pre dlhodobú stabilitu má byť 1,5. Pri vodnom pokryve má byť uhol hydraulického gradientu v telese hrádzu nižší o 50 % ako uhol vnútorného trenia materiálu, z ktorého je hrádza vybudovaná. Dimenzovanie šírky voľného brehu (pláže) a protierózna ochrana brehov a svahov musí zohľadňovať prevládajúce vetry vyvolávajúce vlnenie.



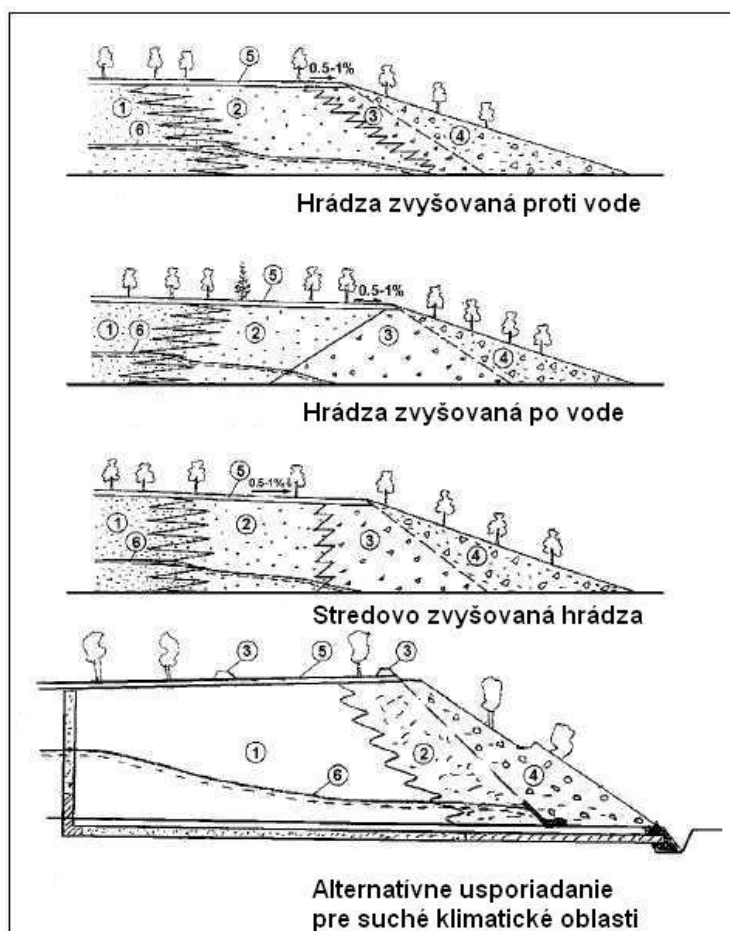
Obrázok .2: Hrádza pre permanentný vodný pokryv

1. Jemnozrnná hlušina z úpravy (sedimentovaný kal), 2. Hruboizrnná hlušina z úpravy, 3. Nadvyšovacia hrádza, 4. Stabilizačný násyp, 5. Nepriepustný pokryv a protierózna ochrana

[ICOLD, 1996 in BAT, 2004]

### III.4.1.2 Odvodnené odkaliská a odvaly

Zníženie hladiny podzemnej vody po uzavretí odkaliska zvýši stabilitu svahov a zníži riziko sufózných javov. Vzdušné svahy hrádzí sa upravujú tak, aby bol zaistený dostatočný stupeň bezpečnosti pre dlhodobú stabilitu a seizmické zaťaženie. Odvedenie priesakov musí byť zabezpečené adekvátnou drenážou. Musia byť vykonané opatrenia na zachytenie a bezpečné odvedenie vôd z povrchového odtoku, aby sa zabránilo eróznym javom. Hrádza musí byť dlhodobo stabilná proti procesom pomalej degradácie. V prípade, že materiál úložiska má kyselinotvorný potenciál, je potrebný vhodný pokryv na zabránenie alebo spomalenie infiltrácie vôd a difúzie vzdušného kyslíka.



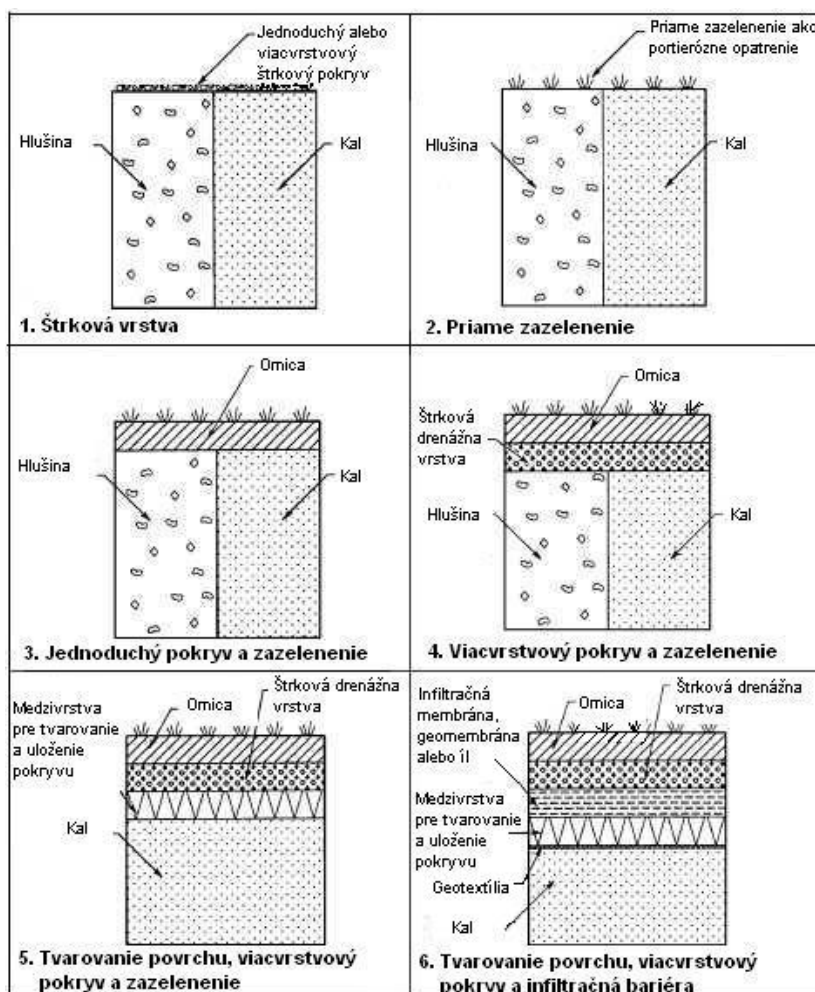
Obrázok.3: Hrádza pre odvodnené odkaliská

1. Jemnozrnná hlušina, 2. Hrubozrnná hlušina, 3. Nadvyšovacia hrádza, 4. Stabilizačná časť na zabezpečenie dlhobej stability, 5. Nepriepustný pokryv a protierózna ochrana,
6. Piezometrická výška hladiny podzemnej vody

[ICOLD, 1996 in BAT, 2004]

### III.4.1.3 Typické spôsoby prekrytia

Typické príklady riešenia pokrytia úložísk sú uvedené na nasledujúcom obrázku. Pre nereaktívne úpravnicke hlušiny sa používa spôsob 1 a 2.



Obrázok 4: Typické krycie vrstvy pre odkaliská  
[EPA, 1995 in BAT, 2004]

### III.4.2 Uzávierka úložísk obsahujúcich ťažobný odpad s potenciálom tvorby kyslých priesakových kvapalín

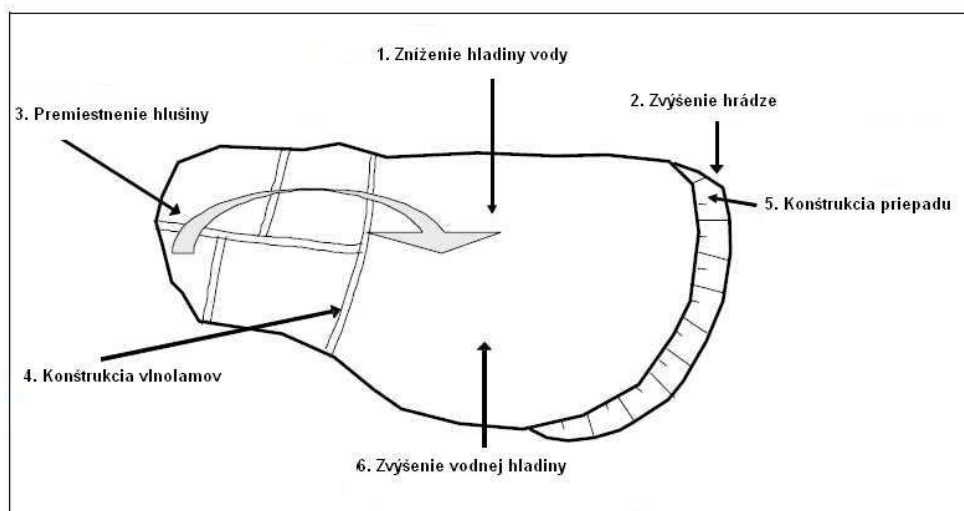
Uzávierka úložiska s potenciálom tvorby kyslých priesakových kvapalín musí vždy vychádzať z analýzy rizík založenej na dôkladnom poznaní fyzikálnych a chemických vlastností uložených materiálov.

Väčšina rekultivačných (sanačných) metód je zameraná na minimalizáciu rýchlosti oxidácie sulfidov a následnej mobilizácie produktov zvetrávania. Takáto minimalizácia sa zabezpečuje obmedzením alebo zabránením transportu kyslíka k sulfidom použitím bariéry („suchý“ alebo „mokry“ pokryv, prípadne „kyslík spotrebavajúci“ pokryv).

Ďalšími, menej používanými metódami sú napríklad odstránenie sulfidických minerálov, prídavok minerálov s pufracnou schopnosťou, minimalizácia bakteriálnej aktivity, alebo zmenšenie povrchu zŕn, ktoré môžu zvetrávať.

### III.4.2.1 Zaplavenie úložiska - vodný „mokrý“ pokryv

Využíva hladinu voľnej vody ako difúziu bariéru proti prestupu kyslíka z atmosféry do telesa odkaliska. Koeficient difúzie kyslíka pre vodu je  $10^{-4}$  menší ako pre vzduch, a preto je vrstvou vody eliminovaná oxidácia sulfidov. Takýto spôsob je podmienený pozitívnou vodnou bilanciou, dlhodobou fyzikálne stabilnou hrádzou zabezpečenou dostatočnou kapacitou odtoku, dostatočnou hĺbkou vodného telesa, aby sa predišlo tvorbe suspenzií v dôsledku vln na hladine.



Obrázok 5: Príklad riešenia na odkalisku Stekenjokk TMF  
[Eriksson, 2002 in BAT, 2004]

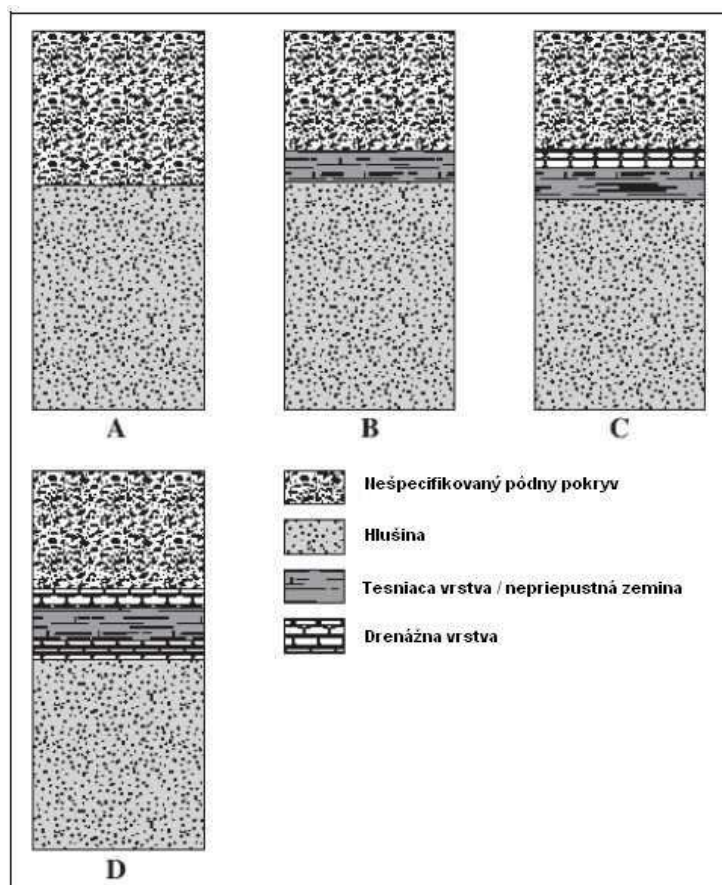
### III.4.2.2 Prekrytie úložiska - „suchý“ pokryv

Pri takomto riešení je voda z povrchu odkaliska odstránená, povrch sa nechá vyschnúť, avšak materiál v telese úložiska je naďalej saturovaný vodou (jemnozrné častice ostávajú nasýtené vodou, materiál je mäkký). Následne sa povrch úložiska prekryje vrstvou, alebo vrstvami vhodného materiálu s nízkou priepustnosťou a schopnosťou dobre odvádzať vody z povrchového odtoku. Súčasťou prekrytia môže byť aj oddeľovacia a drenážna vrstva. Pokryv obmedzuje difúziu kyslíka z povrchu odkaliska do medzizrnových priestorov, znižuje reakčnú rýchlosť a tým i vznik kyslých priesakových kvapalín. Prekrytie znižuje infiltráciu povrchovej vody, čo obmedzí transport reakčných produktov. Podmienkou takéhoto riešenia je, že v blízkom okolí sa nachádza vhodný materiál v dostatočnom množstve a kvalite. Suchý pokryv obvykle pozostáva z niekoľkých vrstiev, ktoré sú tvorené rôznymi typmi súdržných a nesúdržných zemín. Celková hrúbka pokryvných vrstiev sa bežne pohybuje v rozmedzí 0,3 – 3,0 m a priepustnosť tesniacej vrstvy by sa mala pohybovať v rozmedzí  $1 \cdot 10^{-7}$  -  $1 \cdot 10^{-9}$  m.s<sup>-1</sup>. Pred prekrytím musí byť odkalisko odvodnené dostatočne dlhý čas, aby piesčité materiály konsolidovali.

Z dôvodu dlhého času konsolidácie pred zakrytím môže byť nutné vykonať opatrenia proti emisiám prachu počas procesu konsolidácie. Na zabránenie zhromažďovania zrážkovej vody a vody z povrchového odtoku sa upravuje sklon povrchových častí odkaliska na 0,5 – 1° smerom k zberným priekopám na odvádzanie vôd. Najvrchnejšia vrstva musí chrániť pokryvný plášť pred vysychaním a eróziou a býva zazelenená.



Najjednoduchším prípadom (A na obrázku 6) je prekrytie súdržnou zeminou dostupnou v okolí úložiska. Zemina má mať podľa možnosti čo najnižšiu priepustnosť. Zníženie priepustnosti sa u niektorých zemín dá dosiahnuť napríklad rozprestieraním po tenších vrstvách a priebežným zhutňovaním pri vhodnej vlhkosti.



Obrázok 6 : Návrhy štyroch typov minerálneho povrchového tesnenia

Dokonalejším riešením je prekrytie úložiska pokryvom zahrňujúcim zhutnenú ílovú vrstvu (B na obrázku 6) s nízkou priepustnosťou. Potrebná hrúbka ochrannej vrstvy závisí od miestnych klimatických pomerov (hlavne zrážky, mráz, potenciálna evapotranspirácia), možných vplyvov miestnej fauny a flóry (prerastanie koreňmi, rytie zveri) a vlastnostiach dostupného ochranného materiálu pokryvu.

Ďalšie zníženie infiltrácie je možné dosiahnuť vybudovaním drenážnej vrstvy nad povrchovou vrstvou. (rez C na obrázku 6). Takýmto riešením dôjde k zníženiu infiltrácie, avšak vo vodou nenasýtenej zóne sa môže prejaviť tendencia zvyšovania difúzie kyslíka, čo môže byť kontraproduktívne.

Hrubozrnná vrstva medzi tesniacou vrstvou a hlušinou (príklad D na obrázku 6) môže účinkovať ako kapilárna bariéra, ktorá zabraňuje odvodňovaniu kapilárnym transportom a difúznemu transportu rozpustených zložiek. Medzi jemnozrnný a hrubozrnný materiál sa obvykle ukladá oddeľovacia vrstva geotextílie na zabránenie zmiešavania týchto materiálov s rozdielnou zrnitosťou.

Trvanlivosť geotextílie môže byť z dlhodobého hľadiska problematická, pri porušení geotextílie vplyvom starnutia, alebo sadania dochádza k premiešaniu vrstiev, čím sa drenážne účinky odvodňovacej vrstvy výrazne znižujú až úplne eliminujú.

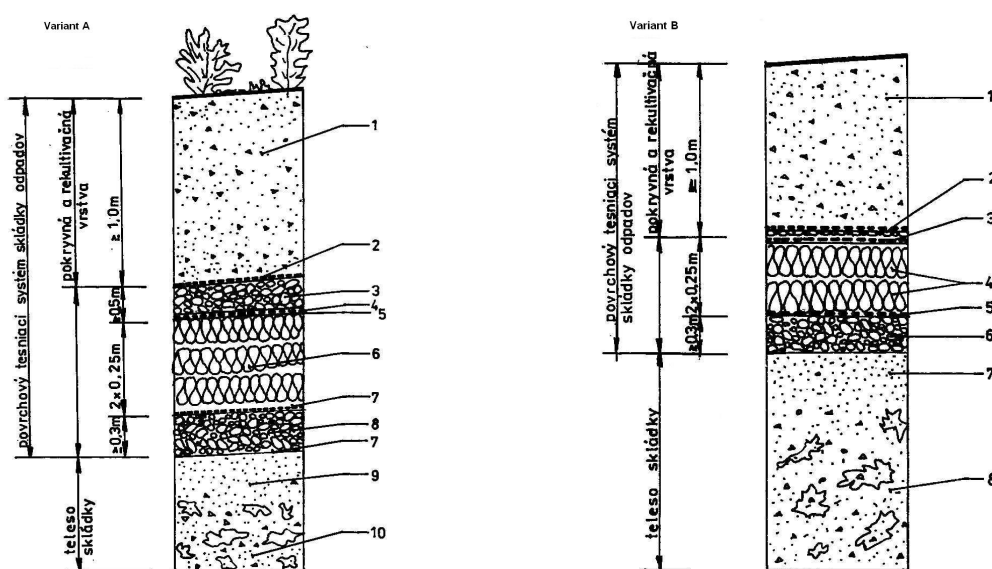
Na zabránenie erózie vrchného krytu nad tesniacou vrstvou sa vykonáva jeho ozelenenie. Otázkou je, či korene miestnych druhov rastlín, ktoré pravdepodobne osídli rekultivované plochy v budúcnosti nenarušia priepustnú vrstvu. Hrúbka pokryvnej vrstvy musí byť taká, aby sa takémuto vplyvu zabránilo. Do úvahy musia byť brané tiež účinky mrazu (hĺbka premrzania) a rozpúšťania snehu a ľadu, pretože v ich dôsledku sa môžu tvoriť zóny (medzizrnové priestory) so zvýšenou priepustnosťou. Na povrchu krytu sa obvykle osieva tráva, ktorá zabraňuje jeho erózii.

### III.4.2.3 Informatívne porovnanie - príklady uzavretia skládok podľa podmienok STN 83 8104

*Parková rekultivácia* je najjednoduchšou rekultiváciou. Skladá sa z navezenia, rozprestretia minimálne 30 cm hrubej vrstvy potenciálne úrodnej zeminy alebo úrodnej vrstvy pôdy, jej biologickej rekultivácie a osiatia. Vhodné rastliny uvádza príloha B normy.

*Rekultivačná pokryvná vrstva* na poľnohospodárske využitie vyžaduje pri prekrytí skládky odpadu (úložiska) vrstvu potenciálne úrodnej zeminy min. hrúbky 70 cm a 30 cm úrodnej vrstvy pôdy.

Pri *rekultivácii na lesnícke a sadové úpravy* musí byť hrúbka rekultivačnej vrstvy taká, aby zaručovala stabilitu vyrastajúcich stromov. Takou vrstvou môže byť 1,5 m hrubá vrstva zeminy, z ktorej 1,2 m môže byť hrubozrnná zemina a min. 0,3 m úrodná vrstva pôdy. Pri návrhu výsadby drevín je nutné vyberať také druhy, pre ktoré stačí navrhnutá hrúbka rekultivačnej vrstvy. Nesmú sa navrhovať také dreviny, ktoré by mohli koreňovým systémom narušiť prekrytie skládky (úložiska).



Obrázok 7: Príklady uzavretia skládok podľa STN 83 8104

*Príklad uzavretia skládok – Variant A (vrstvy v poradí):*

1. pokryvná a rekultivačná vrstva,
2. filtračná oddeľovacia vrstva (geotextília),
3. drenáž hrúbky kamenivo frakcie 16-32 mm – vo svahu môže byť nahradené geosyntetickou drenážou s  $k_{\min} \geq 1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,
4. ochranná geotextília,
5. tesniaca fólia HDPE,
6. minerálne tesnenie,
7. oddeľovacia vrstva,
8. (plynová drenáž),
9. odpad.

*Variant B (vrstvy v poradí):*

1. pokryvná a rekultivačná vrstva,
2. geosyntetická drenáž s ochrannou geotextíliou ( $k_{\min} \geq 1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),
3. tesniaca fólia HDPE,
4. minerálne tesnenie (ak sa v okolí skládky nenachádza vhodná zemina, možno aplikovať ílové rohože, alebo geosyntetické ílové membrány adekvátnych tesniacich vlastností zodpovedajúcim 0,5 m hrúbky minerálneho tesnenia),
5. oddeľovacia vrstva,
6. (plynová drenáž),
7. odpad.

#### **III.4.2.4 Pokryv spotrebovávajúci kyslík**

Za pokryv spotrebovávajúci kyslík sa považuje vrstva s nízkou priepustnosťou a vysokým obsahom vody, ktorá má funkciu difúznej kyslíkovej bariéry. Takáto ochranná vrstva má vysoký obsah organických látok, ktoré pri rozklade spotrebovávajú kyslík. Tým dochádza k zníženiu možnosti transportu vzdušného kyslíka do vrstiev s obsahom sulfidov. Dostatočné fungovanie takéhoto riešenia je podmienené prítomnosťou vysokého prebytku vhodných organických látok. Vhodnými materiálmi pre konštrukciu takýchto vrstiev sú napríklad papierenské kaly a drevný odpad, ktoré môžu byť zmiešané napríklad s popolčekom za účelom zvyšovania hodnoty pH. Pokryv spotrebovávajúci kyslík sa kladie na uložený materiál odkaliska a plní jednak funkciu fyzikálnej bariéry proti difúzii kyslíka a tiež reaktívnej bariéry spotrebovávajúcej kyslík. Účinná vrstva sa prekrýva relatívne priepustnejšou ochrannou vrstvou chrániacou proti erózii a zároveň umožňujúcej migráciu vlhkosti potrebnej pre rozkladné procesy spotrebovávajúce kyslík.

#### **III.4.2.5 Vytvorenie mokrade**

Vytvorenie mokrade je rekultivačnou metódou využívajúcou rovnaký princíp ako vodný pokryv, avšak s menšou hĺbkou vody. Na dne mokrade sa vytvára a stabilizuje rastlinný pokryv, ktorý zabraňuje opätovnému uvoľňovaniu jemnozrnej hlušiny a vzniku suspenzií vplyvom pohybu na hladine vody.

Menšie množstvo vody, ktoré je potrebné akumulovať v odkalisku znižuje potenciálne riziká narušenia hrádze. Vytvorenie mokrade si hlavne v úvodnej etape vyžaduje prídanie vhodného organického substrátu, aby bolo podporené vytvorenie vhodných fytoocenóz.

#### **III.4.2.6 Zvýšená hladina podzemných vôd**

Ide o medzistupňové riešenie, ktorým sa zvyšuje stupeň nasýtenia uloženej hlušiny vodou bez nutnosti vytvárania otvorených rezervoárov na vodu. Metódu je možné použiť na odkaliskách, kde sa hladina podzemnej vody nachádza blízko pod povrchom uloženej hlušiny. Táto metóda je nákladnejšia ako mokrý pokryv, ale lacnejšia ako suchý pokryv. Výhodou metódy je, že okrem malej hrúbky pokryvu nie je potrebné ani jeho zhutnenie a požiadavky na kvalitu materiálu uzatváracej vrstvy sú nižšie ako pri metóde suchého pokryvu. V materiáli nasýtenom podzemnou vodou sú redukované oxidačné procesy podobne ako pri mokrom pokryve, ale bez rizík spojených s hrádzou. Podkladom pre takéto riešenie musia byť dokonalé údaje o hydrogeologických pomeroch podložia odkaliska a jeho okolia a matematické modelovanie prúdenia podzemných vôd, v ktorom je zahrnutý aj vplyv povrchových vôd na režim podzemných vôd.

#### **III.4.3 Odvaly hlušiny z úpravy uhlia**

Voda presakujúca cez odvaly uhoľných hlušín môže obsahovať rozpustené látky, vymývané sú chloridy, a pri oxidácii pyritu sa môže zvyšovať obsah síranov a mikroprvkov. Je tiež možná tvorba kyslých výluhov. V prípade, že vznikajú kyslé výluhy, vyčerpáva sa pufrčná kapacita hlušiny alebo zvodne a môže dochádzať k mobilizácii stopových prvkov. Hlavným environmentálnym cieľom pri uzavretí odvalu je ochrana podzemných vôd. Vhodné riešenie je možné vybrať v závislosti na špecifických podmienkach lokality. Najčastejšie používaným riešením je prekrytie úložiska (kap. III.4.2.2), odvedenie vôd z povrchového odtoku a zazelenenie.

### **III.5 Nakladanie s vodami a priesakovými kvapalinami**

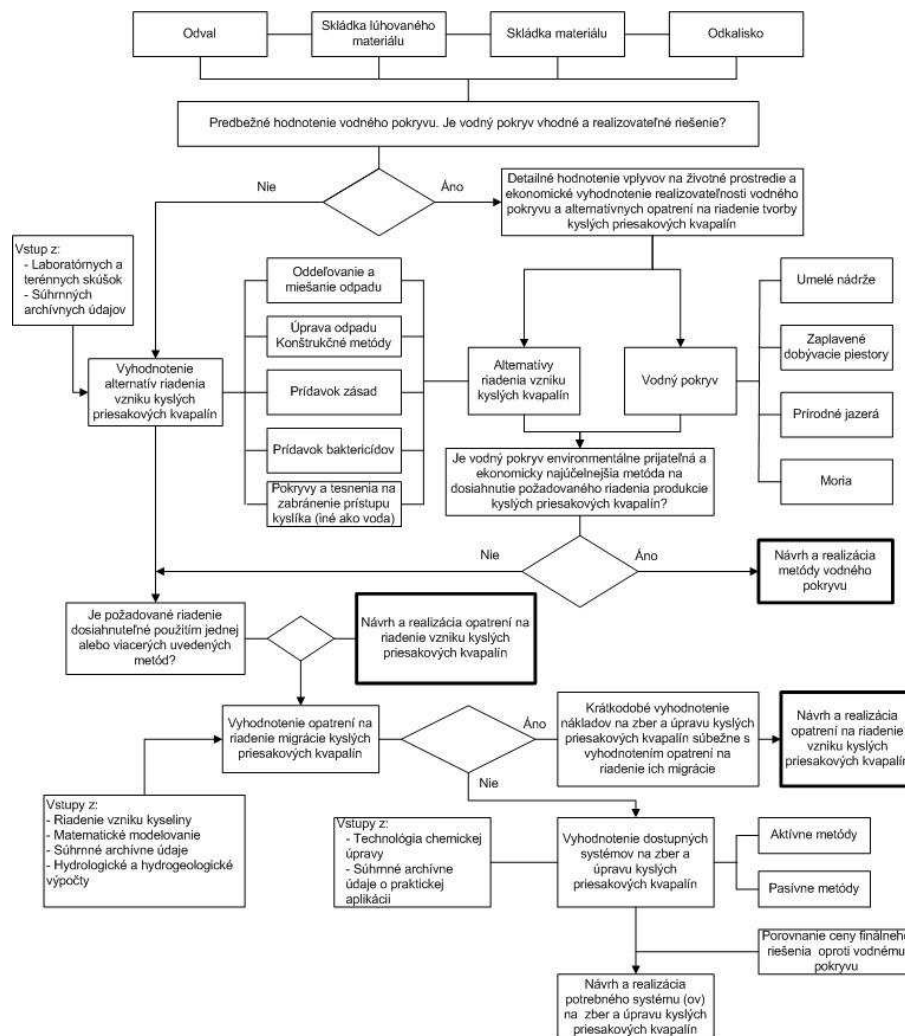
#### **III.5.1 Vodná bilancia**

Vypracovanie vodnej bilancie je dôležité pre návrh činnosti po uzavretí odkaliska. Pri uzatváraní musí byť vyhodnotená vodná bilancia pre vykonanie plánu uzavretia a pre hodnotenie prvkového hmotnostného zaťaženia z odkaliska. Vodný cyklus odkaliska je znázornený na nasledujúcom obrázku.

Vodná bilancia odkaliska zahŕňa predovšetkým tieto zložky:

- zrážky,
- povrchový odtok,
- odtok prevádzkovej vody,
- recyklovanú prevádzkovú vodu,
- výpar,
- odtok do povrchových tokov,
- priesak hrádzou a pod hrádzou.

Z vodnej bilancie môže byť odhadom vypočítané prúdenie z odkaliska alebo odvalu do podzemných vôd. Niektoré parametre nie je možné exaktne zmerať, a preto musia byť odhadnuté.



Obrázok 8: Rozhodovací diagram pre uzatváranie odkalísk a odvalov, ktoré sú potenciálnym zdrojom kyslých priesakových kvapalín [Eriksson, 2002 in BAT, 2004]

### III.5.2 Podmienky riadenia vzniku a migrácie kyslých priesakových kvapalín

Ak proces zvetrávania hlušiny nemohol, alebo nemôže byť obmedzený v priebehu ťažby, potom musí byť migrácia vznikajúcich kyslých vôd riadená. Metódy na minimalizáciu vplyvu kyslých výluhov zahŕňajú napríklad opatrenia na odchylenie prúdenia neovplyvnených povrchových a podzemných vôd, zachytávanie ovplyvnenej povrchovej vody a riadenie prúdenia podzemných vôd. Ďalšími metódami je primiešavanie materiálu (hlušina z ťažby alebo úpravy) s vysokou neutralizačnou kapacitou, prídavok minerálov s pufracnou kapacitou (vápnenie). Prídavok materiálu s pufracnou schopnosťou (napríklad vápenec) sa bežne používa pred aplikáciou suchého pokryvu. Pomáha to imobilizovať produkty zvetrávania, ktoré vznikajú v priebehu zatvárania lokality.

Dosiahnutie dlhodobého efektu pufrácie v oblastiach s potenciálom vzniku kyslých výluhov vyžaduje veľké množstvo materiálu s pufráčnou schopnosťou, čo znamená veľké finančné náklady. Miešanie prídavkov je realizovateľné iba na lokalitách kde existuje materiál s dostatočnou pufráčnou schopnosťou v dostatočnom množstve (napr. ako súčasť produkovanej hlušiny).

### III.5.3 Nakladanie s odsedimentovanou vodou

Ak nie je odsedimentovaná voda priamo vypúšťaná do povrchových vôd, je nevyhnutné zaistiť ukladanie takým spôsobom, aby bola vyparovaná a môže byť zhromažďovaná v nádrži na čistenie alebo recykláciu pod odkaliskom a v niektorých prípadoch vyžaduje úpravu pred vypúšťaním do prírodných povrchových tokov.

### III.5.4 Nakladanie s priesakmi

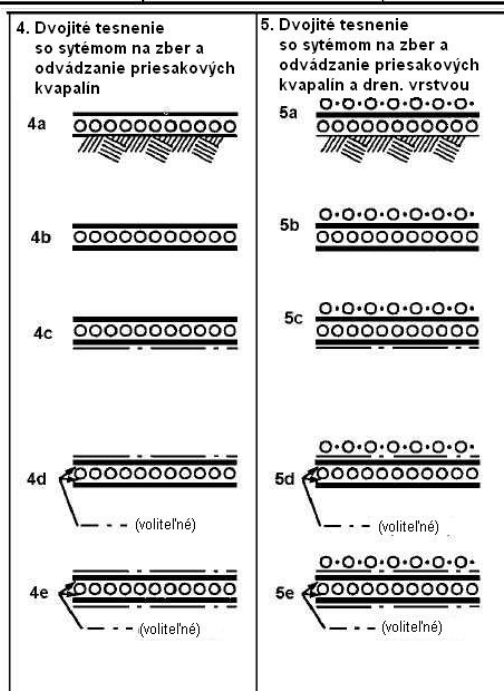
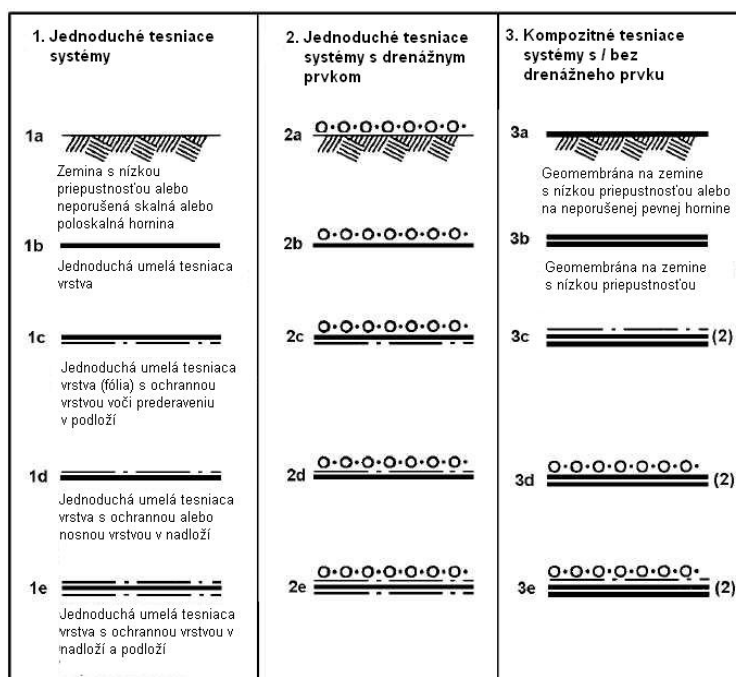
Predpokladom pre návrh systému nakladania s priesakmi je podrobná znalosť hydrogeologických pomerov lokality. Bežne sa vykonáva monitorovanie prostredníctvom inštalovaných piezometrov, ktoré určujú smer prúdenia podzemnej vody, hydraulický gradient a ďalšie charakteristiky zvodne. Na základe znalosti a vyhodnotenia týchto údajov sa vykonávajú rozhodnutia o vhodných opatreniach.

Každý priesak hrádzou je zachytávaný v priekopách, kde je minitorovaný prietok a kvalita vody. Tieto priekopy obvykle zároveň zabraňujú prenikaniu vody do podložia. Pokiaľ je kvalita priesakovej vody vyhovujúca, môže sa nechať presakovať do podložia (vypúšťanie do podzemných vôd). Zachytenie priesakov čerpaním je ďalšia možnosť pre riadenie emisií do podzemných vôd za predpokladu, že sa berie do úvahy existencia záväzku čerpať podzemnú vodu dlhodobo po uzavretí odkaliska. Nutnosť čerpania podzemnej vody po uzavretí musí byť preto rozpracovaná už v pláne rekultivácie a uzavretia úložiska.






Najefektívnejšou metódou pre zamedzenie priesakov do podložia je správny výber lokality, kde sú hydrogeologické pomery, ktoré spôsobujú prúdenie podzemnej vody do odkaliska, a nie naopak. Je potrebné dať prednosť obmedzeniu priesakov do úložiska pred opatreniami na utesnenie dna. Je prakticky nemožné dodatočne vybudovať, alebo opraviť poškodené zaťažené tesnenie. Tesniace injektážne práce sú obtiažne, nákladné a nie všade použiteľné.

Ďalšou možnosťou je vybudovanie prehradzujúcich priekop alebo hydraulických bariér na okrajoch odkaliska. Sú to náročné a nákladné opatrenia s obmedzeným hĺbkovým dosahom.

Množstvo priesakových vôd je podmienené veľkosťou hydraulického gradientu. Pokiaľ je gradient znížený, priesak je zanedbateľný alebo žiadny. Odvodnenia a prekrytie hlušín zníži alebo zabráni vytvoreniu hladiny a tým i priesakom. Toto je najvhodnejšie riešenie problému priesaku na uzavretom odkalisku. V mnohých prípadoch sú flotačné hlušiny tak jemnozrnné, že po konsolidácii majú podobnú priepustnosť ako minerálne tesnenia. Týmto spôsobom je vykonané sekundárne uzavretie. To je lepšie v prípadoch, keď sú flotačné hlušiny odvodnené. Spevnenie môže trvať i niekoľko rokov od uloženia, až dokiaľ hlušiny nie sú v dostatočnej hĺbke odvodnené. V tomto prípade syntetické tesnenie poskytuje základné uzavretie v prvej etape, neskôr izolačnú funkciu preberá konsolidovaná flotačná hlušina. Tesnenie (v medziach stavebných štandardov) zníži priesaky na takú mieru, že nespôsobia významné znečistenia podložia (podzemných vôd). To je najvhodnejšie riešenie priesakov na uzavretom odkalisku. Najbežnejšie systémy tesnení sú na nasledujúcom obrázku.



Vysvetlivky:

-  Zemina alebo skalná a poloskalná hornina v prirodzenom uložení s nízkou priepustnosťou
-  Tesnenie s nízkou priepustnosťou
-  Ochranná alebo nosná vrstva
-  Drenážna (odvodňovacia) vrstva
-  Systém na zber a odvádzanie priesakových kvapalín

Poznámky:

- (1) Kombinované tesniace systémy sú obvykle tvorené geomembránou nad vrstvou zeminy s nízkou priepustnosťou
- (2) Kombinované tesniace systémy zahŕňajú tiež geomembránu na zemine alebo pevnej hornine s nízkou priepustnosťou v prirodzenom uložení

Obrázok 9: Možné typy tesniacich systémov [EPA, 1995 in BAT, 2004]

### III.5.5 Regulácie priesakov

V praxi prichádzajú do úvahy prevažne dva typy opatrení, a to:

- priesakové bariéry,
- vratné systémy.

Bariéry slúžia na zabránenie priesakov do podlažia a zahŕňajú izolačné priekopy, cemento-ílové steny a cementačné bariéry. Tieto opatrenia sa musia vždy posudzovať aj s ohľadom na stabilitu hrádze.

V niektorých prípadoch môže byť vhodnejšia inštalácia vratných systémov namiesto priesakových bariér. Vratné systémy skôr zachytávajú ako zastavujú tok priesaku a tak umožňujú, aby priesaková voda bola vrátená do procesu úpravy alebo na likvidáciu spôsobom, ktorý nepoškodzuje prostredie. Vratný systém môže byť tvorený zbernými priekopami alebo vrtmi.

Výhody a obmedzenia pre riadenie priesakov je uvedený v nasledujúcej tabuľke (podľa BAT, 2004):

Opatrenia na riadenie priesakov	Druh	Výhody	Obmedzenia
Priesakové bariéry	Izolačná priekopa	Nie nákladné, objekty môžu byť jednoducho kontrolované a prevádzkované	Nie je vhodné pre nasýtené hlbšie bariérové základy, efektívne iba pre plytké priepustné vrstvy
	Cemeno-ílové steny	Môžu byť konštruované bariéry s veľmi nízkou priepustnosťou	Vysoké náklady, nevhodné pre svahovitý terén alebo balvanité podlažie. Je nutné nepriepustné podlažie
	Cementačné bariéry	Bariéry môžu byť realizované do veľkých hĺbok, nie sú ovplyvnené topografiou lokality	Vysoké náklady, obmedzená účinnosť v dôsledku priepustnosti cementovanej zóny. Vhodné iba pre hrubozrnné zeminy s veľkými medzizrnnými priestormi
Vratné systémy	Zberné kanály	Nie sú nákladné, sú vhodné pre akýkoľvek hrádzový systém	Efektívne pre plytké priepustné vrstvy, ale použiteľné aj v iných prípadoch
	Zberné vrty	Možné dosiahnutie väčšej hĺbky, vhodné ako sanačné opatrenie	Nákladné, efektívnosť závisí od vlastností zvodne

Pri praktickom riadení priesakov sa často používa kombinácia uvedených metód. Okrem bariér, ktoré sú budované pre riadenie postupu priesakov, úprava kvality podzemnej vody je možná reakčnými bariérami.



### III.5.6 Techniky na zníženie emisií do vody

#### III.5.6.1 Úprava rozpustených kovov

Adsorpčná schopnosť jemnozrnných hlušín (flotačných) má vplyv na čistenie vôd (drenážne vody z odvalov, banské vody) obsahujúcich rozpustené kovy. Keď sú takéto vody privádzané do prúdu flotačných hlušín, majú kovy tendenciu zachytiť sa na povrchu minerálnych zrn. Kovy ostávajú adsorbované na povrchu iba pri vhodných hodnotách pH (napr. > 7 pre Zn, > 5 pre Cu). Ide o jednoduchý systém využívajúci efekt prirodzeného materiálu, vhodný pri prevádzke odkaliska a menej po uzavretí.

#### III.5.6.2 Suspendované častice a rozpustené látky

Vo vypúšťaných vodách sú tuhé častice prítomné vo forme suspendovaných látok alebo sú v rozpustenej forme. Čistenie sa môže vykonávať v otvorenej vodnej ploche alebo v zariadení, ktoré je na tento účel postavené. Technológia zahŕňa zrážanie rozpustených prvkov (kovov), separáciu zrazeniny a častíc. Pri zrážaní je používané hlavne vápnenie v kombinácii s ďalšími činidlami (napr.  $\text{FeCl}_3$ ). Pre oddelenie zrazeniny a tuhých častíc sa používa gravitačná separácia v nádržiach alebo zahusťovačoch. Vytvorený kal si vyžaduje osobitný manažment nakladania podľa miestnych podmienok, či na ťažisku, alebo na skládke príslušnej kategórie.

#### III.5.6.3 Úprava kyslých vôd

Technológie úpravy kyslých vôd eliminujú alebo znižujú aciditu a zrážajú ťažké kovy. Rozdeľujú sa na:

- *aktívne* – zahŕňajú neutralizáciu kyslých vôd alkalickými činidlami. Výstavba, prevádzka a používané chemikálie sú nákladné,
- *pasívne* – zahŕňajú výstavbu systému úpravy vôd, ktorý využíva prírodné biologické alebo chemické reakcie drenážnych vôd, pri ktorých je nutný len minimálny manažment. Pasívne opatrenia zahŕňajú anoxickú drenáž, kanály z vápenca, alkalický charakter podzemnej vody a prechod drenážnych vôd cez umelo konštruované mokrade alebo iné sedimentačné objekty.

Možná je tiež kombinácia aktívnych a pasívnych technológií úpravy (napríklad vápnenie a umelé mokrade).

- **Aktívne metódy**

**vápenec (uhličitan vápenatý)** – výhody nízke náklady, ľahké použitie, vznik hustého kalu s ľahkým nakladaním. Nevýhody sú dlhý reakčný čas, zníženie účinnosti v dôsledku zrazenín železa, neúčinné pre odstraňovanie Mn.

**hydratované vápno (hydroxid vápenatý)** – je neutralizačné činidlo používané hlavne v uhľom priemysle. Výhodou je jednoduché a bezpečné použitie, dobrá účinnosť a priaznivá cena. Nevýhodou je produkcia veľkého objemu kalov a vyššie náklady na úpravňu vzhľadom na jej potrebnú veľkosť.

**sóda (uhličitan sodný)** – je vhodná pre úpravu malých emisií kyslých výluhov v citlivých oblastiach. Nevýhodou sú vysoké náklady a zlá sedimentácia kalu.

**kaustická sóda (hydroxid sodný)** je vhodná pre úpravu malého prietochného množstva v citlivých lokalitách a pre úpravu kyslých výluhov s vysokým obsahom Mn. Nevýhodou sú vysoké náklady, nebezpečné vlastnosti hydroxidu, jeho tuhnutie pri nízkych teplotách a zlé vlastnosti kalu.

**amoniak** – bezvodý amoniak je účinný pre úpravu kyslých výluhov s vysokým obsahom  $\text{Fe}^{3+}$ /Mn. Výhody sú podobné ako pri hydroxide sodnom. Použitie je technologicky náročné, nebezpečné a môže ovplyvniť biologické podmienky recipientu. Vedľajšími dôsledkami môžu byť prejavy toxicity na akvatické formy života, eutrofizácia a nitrifikácia. Pri použití sa vyžaduje dodatočný monitoring, povolenie použitia je legislatívne problematické.

## • Pasívne metódy

### Umelo vytvorené mokrade

Využívajú pôdne a vo vode sa vyskytujúce mikroorganizmy, ktoré sú viazané na mokradňé rastliny umožňujúce odstraňovať z vôd kovy v rozpustenej forme. Mokrade sú pasívnym systémom bez chemickej úpravy, ktorý nevyžaduje plynulé riadenie, alebo iba minimálne. Je to relatívne nová metóda so špecifickými mechanizmami, ktoré ešte nie sú celkom preskúmané. Pritekajúce kyslé vody s obsahom kovov pretekajú cez aeróbnu a anaeróbnu zónu mokradňého systému. Kovy sú odstraňované prostredníctvom iónovej výmeny, adsorpcie, absorpcie a zrážaním s geochemickou a mikrobiologickou oxidáciou a redukciou.

Iónová výmena prebieha ak sú kovy v kontakte s humínovými alebo inými organickými látkami. Pôdy sú v mokradi preto nahradené slamou, kompostom a pod. Oxidačné a redukčné procesy sú katalyzované baktériami, ktoré sa vyskytujú v aeróbnej alebo anaeróbnej zóne a pôsobia pri zrážaní kovov vo forme hydroxidov a sulfidov. Vyzrážané a adsorbované kovy sedimentujú v odkal'ovacom priestore, alebo sú filtrované presakovaním vody špecifickým prostredím alebo rastlinami.

Proces môže byť adaptovaný i pre úpravu alkalických alebo neutrálnych výluhov. Technológia mokradí musí byť prispôsobená miestnym geologickým podmienkam, terénu, zastúpeniu stopových prvkov a klimatickým pomerom. Najväčšie uplatnenie sa javí pri úprave malých prietokov, rádovo okolo desiatok litrov za minútu.

Mokrade sú dlhodobé technológie, ktoré môžu byť prevádzkované niekoľko rokov.

Použitelnosť mokradí a limitujúce faktory:

- dlhodobá účinnosť konštruovaných mokradí nie je dobre známa,
- náklady na realizáciu sú s ohľadom na miestne podmienky veľmi rozdielne a nemusia byť finančne úmerné pre mnoho lokalít,
- premenlivá teplota a prítok môžu byť príčinou nerovnomernej účinnosti (rýchlosti odstraňovania kontaminantov). Chladné podmienky spomaľujú až zastavujú funkciu mokradí. Nadmerný prítok môže spôsobiť presýtenie systému, nedostatočný prítok zase poškodiť rastliny.

### Otvorené vápencové kanály alebo anoxická vápencová drenáž

Ide o konštrukčne najjednoduchšiu metódu pasívnej úpravy, ktorá je tvorená otvorenými kanálmi, ktoré sú vyplnené vápencom. Pri anoxickej drenáži sú kanály zakryté. Rozpúšťanie vápenca zvyšuje kyselinovú neutralizačnú kapacitu a pH. Účinnosť metódy môžu znižovať povlaky zrazenín železa a hliníka vytvárané na povrchu vápencov.

### Záchytné vrty

Kyslá voda môže byť odvádzaná do záchytných objektov (podzemných prietokných nádrží alebo vrtov) vyplnených drveným vápencom. Turbulenciou vody sa zabraňuje usádzaniu povlakov. Vápencovú výplň je potrebné pravidelne vymieňať.

Aplikácia pasívnych systémov väčšinou nepostačuje ako jediné sanačné opatrenie z dôvodu závislosti na vonkajších faktoroch, ale môže sa použiť ako podporný prvok v kombinácii s ďalšími opatreniami po uzavretí úložiska.

### **III.5.6.4 Úprava alkalických vôd**

Alkalické vody z odkalísk je možné neutralizovať prídavkom kyseliny sírovej alebo CO<sub>2</sub>. V prípade hliníka je optimálne pH 6,85, keď sa hliník stáva vo vode nerozpustný a zrazenina sedimentuje. Voda preteká do flokulačnej nádrže. Čistá voda je vypúšťaná podľa možností alebo použitá.

### **III.5.6.5 Úprava vôd s obsahom arzénu**

Stopové prvky je možné z priesakových vôd účinne odstraňovať prídavkom železitých solí. Odstraňovanie arzénu sa vykonáva vyzrážaním vo forme arzeničnanu, alebo viac rozpustného a menej stabilného arzenitanu. Čistené vody sa pred procesom zrážania oxidujú, aby bola zaručená prevaha arzeničnanov. Prítomnosť kovových iónov Cu, Pb, Ni, Zn znižuje rozpustnosť As, pretože vznikajú menej rozpustné arzeničnany kovov. Stabilita arzeničnanov závisí od pomeru Fe a As. Čím vyšší je pomer, tým stabilnejšia a menej rozpustná je zrazenina. Pri molárnom pomere Fe : As > 8 arzeničnany kovov sú o rád menej priepustné ako relatívne nerozpustný arzeničnan železnatý v rozpätí pH od 2 do 8. Železité soli účinne odstraňujú stopové prvky. Prídavkom hydroxidu železitého môže byť znížená koncentrácia As i ďalších kovov ako Sb, Mo na úroveň menej ako 0,5 mg.l<sup>-1</sup>. V bežných podmienkach technologický proces čistenia zahŕňa pridávanie rozpustnej železitej soli, ktoré je doplnené pridaním dostatočného množstva hydroxidu, ktorý spôsobí vznik nerozpustného hydroxidu železitého. V niektorých prípadoch obsahuje čistená voda dostatočné množstvo železa, a preto je potrebné pridať iba zásadu (hydroxid), ktorý spôsobí vyzrážanie hydroxidu železitého.

### **III.5.6.6 Odstraňovanie kyanidov**

Prirodzená degradácia kyanidov je najrozšírenejšou metódou odstraňovania kyanidov z roztokov po vylúhovaní zlata. Často býva dopĺňaná ďalšími procesmi úpravy. Prehľad v súčasnosti používaných metód na znižovanie koncentrácie kyanidov z roztokov je uvedený v nasledujúcej tabuľke.

Technológia úpravy	Mechanizmus	Komentár
Prirodzená degradácia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• absorbcia CO<sub>2</sub></li> <li>• vyprchávanie HCN</li> <li>• disociácia komplexu kyanidov kovov</li> <li>• zrážanie kyanidov kovov</li> </ul>	Použitie je obmedzené špecifickými pomermi lokality (arídna, snečná klíma, legislatívne obmedzenia)
Oxidačné procesy	• alkalická chlorácia	Nahrádza sa metódou SO <sub>2</sub> /vzduch a peroxid vodíka z dôvodu ceny a neschopnosti odstrániť železo
	• technológia SO <sub>2</sub> /vzduch	Univerzálne použitie, úprava kalov vyžaduje vyššiu spotrebu činidiel
	• peroxid vodíka	Nepoužiteľné pre kaly pre vysokú spotrebu činidla
Adsorbcia	• adsorbcia na aktivovanom uhlíku	Použitie obmedzené nízkymi koncentraciami kyanidov, špecifické podmienky lokality
Biologická úprava	• biodegradácia	Použitie obmedzené nízkymi koncentraciami kyanidov, špecifické podmienky lokality, môže vyžadovať dodatočné teplo

### III.5.7 Monitorovanie podzemnej vody

Podzemná voda by mala byť monitorovaná v okolí všetkých odkalísk a odvalov. V pravidelných intervaloch by sa mala merať úroveň hladiny podzemnej vody a odoberať vzorky na stanovenie kvality podzemnej vody v relevantných ukazovateľoch. Rozsah a hustota monitoringu sa určujú na základe miestnych hydrogeologických podmienok a podľa polohy úložiska vo vzťahu k reálnym, či potenciálnym recipientom podzemnej vody, či receptorom znečistenia.

## III.6 Remedičné a rekultivačné metódy na elimináciu negatívnych vplyvov spôsobených odpadmi z ťažobného priemyslu

### III.6.1 Technológie sanácie zemín in situ

#### III.6.1.1 Biologické postupy

- **Fytoremediácia a rhizoremediácia**

Fytoremediácia je využitie rôznych rastlinných druhov pri degradácii, extrakcii, či imobilizácii látok kontaminujúcich pôdu alebo vodu (Cunningham a Ow, 1996 in Matějů ed. et al. *Atlas sanačných technológií*, 2006). Fytoremediácia je väčšinou využívaná in situ, ale môže byť použitá i na dekontamináciu vyťaženého materiálu landfarmingom (kultiváciou vybraných rastlín a organizmov na vyťaženom materiáli) alebo formou prirodzených alebo umelých mokradí. Fytoremediácia je použiteľná pre odstraňovanie anorganických a organických polutantov. Metóda je vhodná predovšetkým pre veľkoplošné použitie. Optimálnou rastlinou pre uplatnenie fytoremediácie (fytoextrakcie) je taký druh, ktorý dobre toleruje a akumuluje organické alebo anorganické polutanty, rýchlo rastie a produkuje veľké množstvo biomasy (najlepšie s možnosťou ďalšieho technického alebo energetického využitia) a ľahko sa zbiera (kosí) technickými prostriedkami.

Obmedzenie použitia: ide o pomalú metódu závislú od sezónnych klimatických podmienok, ktorou nie je možné dosiahnuť úplné odstránenie znečistenia. Polutanty musia byť biologicky dostupné a ich hĺbková distribúcia musí byť v dosahu koreňového systému rastlín. Pri nízkej prirodzenej vlhkosti pôdy je potrebné zaistenie umelého zavlažovania.

Je známych niekoľko základných dekontaminačných postupov využívajúcich rastliny:

- fytoextrakcia – priama absorpcia a presun kontaminantov do rastlinných tkanív,
- fytotransformácia – uvoľňovanie enzýmov podporujúcich biochemickú transformáciu v pôde,
- rhizosférna biodegradácia – degradácia polutantov spôsobená činnosťou húb a mikroorganizmov v koreňovej sfére,
- fytostabilizácia - použitie rastlín na zníženie pohyblivosti a biologickej dostupnosti znečisťujúcich látok,
- fytovolatilizácia – presun kontaminantov z pôdy a vody a ich následné uvoľňovanie transpiráciou do atmosféry.

Biodostupné kovy pre príjem rastlinami sú Ni, Cd, Zn, As, Se, Cu. Menej dostupné sú Co, Mn, Fe, Pb, Cr, U sú dostupné iba s prídavkom komplexačných činidiel (Schnoor 2002 in Matějů ed., 2006). V každom konkrétnom prípade je potrebné použiteľnosť fytoremediácie overiť pilotnými testami, ktorými sa overia rozhodujúce parametre pre návrh účinného sanačného systému.

#### III.6.1.2 Fyzikálne a chemické postupy

- **Vymývanie pôdy**

Princíp metódy je založený na infiltrácii vodného roztoku aktívnych látok (kyseliny, zásady, rozpúšťadlá, povrchovo aktívne látky) schopných rozpúšťať a meniť povrchové vlastnosti

polutantov viazaných v horninovom prostredí a previesť ich do roztoku alebo narušiť sorpčné väzby s časticami horninového prostredia. Roztok sa väčšinou recykluje, pričom sa cyklicky aplikuje do ohniska znečistenia a na periférii sanovaného územia sa zhromažďuje a odčerpáva na ďalšie použitie. Vymývanie zemín je použiteľné v homogénnych a dostatočne priepustných materiáloch. Podmienkou správnej aplikácie je dobrá znalosť hydrogeologických pomerov v mieste aplikácie a hlavne poznanie smeru prúdenia podzemnej vody, aby nedošlo k nežiaducemu rozptýleniu roztoku mimo sanovaný priestor. Technológia je použiteľná pre odstránenie širokého spektra polutantov. Pri odpadoch z ťažobného priemyslu pripadajú do úvahy ťažké kovy (Pb, Zn, Cu), rádionuklidy, výbušniny a ropné látky, avšak nie v zmesnej kombinácii.

Obmedzenie použitia: nízka priepustnosť a heterogenita horninového prostredia, zmesná kontaminácia rôznymi druhmi kontaminantov, silná sorpcia polutantov na povrch častíc hornín.

Aplikáciou vhodného roztoku do kontaminovaného horninového prostredia je znečistenie uvoľňované, mobilizované a odstraňované. Podľa druhu kontaminácie, resp. vlastností kontaminantov sa ako médium používa voda, vodné roztoky kyselín, zásad alebo povrchovo aktívnych látok. Technológiu je možné použiť pre saturovanú i nesaturovanú zónu. Systém zasakovacích a čerpacích objektov sa navrhuje vždy individuálne podľa miestnych hydrogeologických podmienok. Zasakovacie a čerpacie objekty môžu byť vertikálne alebo horizontálne. Odčerpávaný vymývacie roztok je čistený vhodnou technológiou čistenia. Prečistená voda je používaná na opätovnú prípravu vymývacieho roztoku alebo je odvádzaná na konečné vyčistenie. Vymyté kontaminanty, resp. ich roztoky sa odvádzajú na konečné zneškodnenie. Správny návrh takéhoto spôsobu sanácie si vyžaduje realizáciu laboratórnych a pilotných skúšok, pri ktorých sú overované technologické charakteristiky, rýchlosť a účinnosť procesu a množstvo účinného roztoku, ktorým je potrebné premyť horninové prostredie.

- **Zakrytie, uzavretie a enkapsulácia**

Ide o sanačné metódy, ktorých technické riešenia sú podobné, alebo zhodné s metódami uzavretia a rekultivácie úložísk odpadov z ťažobného priemyslu, ktoré sú popísané v kapitole III.4 (BREF – referenčný dokument BAT techník).

Zakrytím sa zabráni prístupu zrážkovej vody, vzduchu, alebo iných aktívnych činiteľov do uzavretého úložiska. Zakrytie bez ďalších opatrení je možné použiť iba za podmienky, že je preukázané nemožnosť úniku znečistenia cez dno a boky telesa uzatváraného materiálu.

Pri uzavretí je prekrytie doplnené bočnými vertikálnymi bariérami, ktoré siahajú až do nepriepustného podlažia a tvoria s vrchným prekrytím spoločný tesniaci systém. Pri takomto spôsobe uzavretia sa využívajú vhodné tesniace vlastnosti prirodzeného podlažia. Použitie tejto metódy je najčastejšie obmedzené absenciou prirodzeného izolátora v podlaží s vyhovujúcimi vlastnosťami.

V prípade sanácie hlboko uloženého a ťažko prístupného nebezpečného dopadu pri absencii prirodzeného nepriepustného podlažia je možné použiť princíp enkapsulácie, pri ktorom sa metódami injektáže, alebo tryskovej injektáže vytvorí súvislý obal okolo telesa nebezpečného odpadu.

- **Stabilizácia a solidifikácia in situ, vitrifikácia**

Stabilizácia je proces chemického viazania nebezpečných látok prítomných v kontaminovanom materiáli do stabilnej málo rozpustnej formy, ktorá znamená nízke alebo žiadne riziko pre okolité prostredie (Růžička, Matic in Matějů ed., 2006).

Solidifikácia je fyzikálna premena a uzavretie kontaminovaného materiálu do monolitckej, mechanicky odolnej a obmedzene priepustnej štruktúry. Chemické vlastnosti škodlivých látok v solidifikovanom materiáli nemusia byť týmto procesom ovplyvnené.

Solidifikácia a stabilizácia je použiteľná pre kontaminované zeminy, kalové lagúny a rôzne sedimenty s obsahom nebezpečných látok. Metódami solidifikácie a stabilizácie je možné sanovať ťažké kovy (predovšetkým Hg, As, Pb, Zn, Cd, Cr), rozpustné zlúčeniny (chloridy, sulfátu, fluoridy), uhlíkovodíky, organokovové zlúčeniny (ferokyanidy) a ďalšie látky.

Obmedzenie použitia: limitujúcim faktorom je hĺbka technického dosahu sanácie, ktorá obvykle neprekračuje 15 m, so špeciálnym strojovým vybavením je možné dosiahnuť hĺbku až 35 m (Růžička, Matic in Matějů ed., 2006). Prítomnosť niektorých látok, ako napríklad síranov, niektorých kovov a organických látok môže narúšať správny priebeh tuhnutia spojív, navyše kovy (mikropolutanty) sa ťažšie viažu. Spracovanie veľkého objemu nebezpečného odpadu môže byť technicky a ekonomicky problematické.

Technológia solidifikácie a stabilizácie je založená na premiešavaní sanovaného odpadu so spojivom a prípadne s ďalšími chemickými činidlami. Najčastejšie sa používajú hydraulické spojivá, ako cement, pucolány, popolček a ďalšie látky, ako napríklad vápenný hydrát alebo organické spojivá. Po premiešaní dochádza k pomocou chemických reakcií k zníženiu alebo odstráneniu nebezpečných vlastností ťažobného odpadu.

Vplyvom tvrdenia spojiva sú takto upravené častice odpadu uzavreté do inertnej a málo priepustnej matrice. Procesy stabilizácie a solidifikácie sú vzájomne prepojené a dopĺňajúce sa procesy. Uvedeným postupom je možné sanovať odpady s rôznym stupňom konzistencie, od tekutej, kašovitej až po pevnú.

Receptúra solidifikácie a stabilizácie sa pre každú aplikáciu navrhuje osobitne na základe dôkladného rozboru vstupných podmienok a analýz fyzikálnochemických vlastností nebezpečného odpadu a overuje sa laboratórnymi a pilotnými testami.

Vitrifikácia je vlastne termická solidifikácia. Podstatou je elektrické odporové tavenie zemín s nebezpečnými vlastnosťami pri teplote 1600 až 2000 °C (Matějů, 2004). Tavenie prebieha medzi grafitovými elektródami situovanými v sanovanej vrstve. Vzniknutá sklovitá tavenina uzatvára neprchavé kontaminanty, prchavé kontaminanty sa čiastočne rozložia alebo vyprchajú. V prípade sanácie odpadov z ťažobného priemyslu pripadá použitie tejto metódy na solidifikáciu a imobilizáciu predovšetkým kovov a rádionuklidov.

Obmedzenia použitia: hĺbková dostupnosť metódy je maximálne 7 m, sanovaná zemina musí obsahovať dostatok kremíka, hliníka a oxidov alkalických kovov, nemožno aplikovať v blízkosti podzemných vedení a v zeminách s obsahom stavebných odpadov alebo spáliteľného organického znečistenia viac ako 20 hm%. Vyžaduje sa dostatočný príkon elektrickej energie, metóda je vysoko energeticky náročná. Behom tavenia dochádza k zmenšeniu objemu sanovaného materiálu a poklesu povrchu terénu.

- **Chemická oxidácia in situ**

Chemická oxidácia in situ spočíva v infiltrácii roztoku oxidačného činidla do nenasaturovanej zóny tak, aby došlo k rozkladu prítomných kontaminantov (Siegrist, 2001). Výslednými produktmi oxidačných reakcií sú v závislosti na druhu použitých oxidačných činidiel málo rozpustné oxidy železa alebo mangánu, oxid uhličitý a voda. Metóda je použiteľná hlavne na sanáciu saturovanej zóny, ale i nenasaturovanej zóny a odstránenie širokého spektra organických látok. V rámci riešenia problematiky odpadov z ťažobného priemyslu prichádzajú do úvahy niektoré ropné uhľovodíky a výbušniny. Medzi hlavné výhody tejto metódy patrí rýchly rozpad kontaminantov na neškodné produkty a žiadna produkcia nebezpečných odpadov.

Obmedzenie použitia: metóda je málo účinná voči niektorým látkam, hlavne pri použití manganistanu ako oxidačného činidla na rozklad ropných látok a ďalších látok s nízkou rozpustnosťou. Vysoký obsah oxidovateľných prirodzených zložiek v sanovanom horninovom prostredí alebo podzemnej vody spôsobuje nadbytočnú spotrebu oxidačných činidiel, ktoré primárne oxidujú tieto, zväčša neškodlivé látky, pričom pri rozklade kontaminantov sa uplatní iba malá časť dodaného oxidačného činidla. Zariadenia na skladovanie a prípravu oxidačných činidiel na lokalite sú nákladné a náročné na odbornú obsluhu. Príprava sanačného zásahu a správny návrh dávkovania činidiel si vyžaduje náročnú predsanačnú prípravu pozostávajúcu z laboratórnych skúšok, stopovacích skúšok a pilotnej skúšky vo vybranej časti lokality.

Používa sa niekoľko spôsobov aplikácie oxidačných činidiel v roztoku systémom horizontálnych vrtov, vertikálnych drénov. Podmienkou správnej aplikácie je dobrá znalosť hydrogeologických pomerov v mieste aplikácie a hlavne poznanie smeru prúdenia podzemnej vody, aby nedošlo k nežiaducemu rozptýleniu aplikovaného roztoku mimo sanovaný priestor. Pri použití tuhých oxidačných činidiel je možné aj priame dávkovanie alebo premiešanie s kontaminovanou zemínou. Medzi najbežnejšie používané oxidačné činidlá patria manganistan draselný, manganistan sodný, peroxid vodíka (Fentonovo činidlo), ozón.

- **Elektrokinetická dekontaminácia**

Metóda je založená na vytvorení jednosmerného elektrického poľa v pórovitej kontaminovanej matrici (zemine a pod.). Pôsobením elektrického napätia dochádza k transportným javom, ako pohyb iónov v elektrickom poli (elektromigrácia) a pohyb vodných roztokov v matrici elektroosmóza. Metóda je použiteľná iba v prostredí s dostatočnou elektrickou vodivosťou, a teda zároveň vlhkosťou. Pri uplatnení elektroosmózy sa vlhkosť matrice musí blížiť skoro nasýtenému stavu. Elektromigráciou je možné odstraňovať kontaminanty v iónovej forme, napríklad toxické kovy. Elektroosmózou je možné odstraňovať látky rozpustené alebo dispergované vo vodnom roztoku. Metóda je použiteľná v prostrediach s malou priepustnosťou pre vodu, kde sú iné techniky nepoužiteľné.

Obmedzenie použitia: použitie je obmedzené predpismi pre prácu s elektrickým napätím, nevýhodná vysoká pohyblivosť iných iónov ako kontaminantov (sodík, draslík, vápnik, horčík, vodík, hydroxylové ióny), veľké straty elektrickej energie spôsobenej premenou na teplo (matrica sa zohrieva), nežiaduce zvýšenie mobility kontaminantov.

Riešenie spočíva v pravidelnom systéme vrtov do ktorých sú striedavo inštalované kladné a záporné elektródy. Elektródy sú umiestené v elektrolyte, ktorý zabezpečuje vodivé spojenie medzi elektródou a matricou.



V okolí elektród sú generované vodíkové a hydroxylové ióny, ktoré spôsobujú výrazný posun pH. Sanácia môže prebiehať s následnou úpravou pH (kondicionácia), alebo bez. Vplyvom elektrického poľa tieto ióny a kontaminujúce látky migrujú do elektrolytov v elektródach, z ktorých sú priebežne odstraňované. Ak nie sú kondicionované, môžu ovplyvňovať správanie prítomných kontaminantov. Pri aplikácii tejto metódy v nenasaturovanej zóne je obvykle potrebné pristúpiť k pridávaniu vody inštalovanými elektródami alebo priamym skrúpaním povrchu. O použití tejto metódy v danom type matrice by sa malo rozhodnúť až po vykonaní laboratórnych skúšok a modelov. Účinné komerčné využitie tejto metódy v podmienkach Slovenska zatiaľ nebolo zaznamenané.

### III.6.2 Technológie sanácie zemín *ex situ*

Použitiu metód *ex situ* vždy predchádza vyťaženie kontaminovaného materiálu a jeho preprava na miesto, kde sa vykoná zvolená sanačná metóda. Technológie *ex situ* umožňujú homogénnu sanáciu celého objemu kontaminovaného materiálu.

#### III.6.2.1 Biologické postupy

- **Biostabilizácia a bioimobilizácia**

Tieto postupy sa využívajú na elimináciu škodlivých vlastností polutantov, ktoré sú biologicky ťažko rozložiteľné, alebo nerozložiteľné (kovy). V sanovanom materiáli sa vytvoria podmienky pre biologickú tvorbu látok, ktoré viažu molekuly polutantov a tým znižujú ich biodostupnosť, škodlivosť a mobilitu. Ďalšou možnosťou je zmena molekúl kontaminantu biologickou cestou na nerozpustné, čím sa zníži ich mobilita a škodlivosť (Matějík ed., 2006). V prípade sanácie odpadov z ťažobného priemyslu môže byť metóda použitá pri odstraňovaní vplyvov spôsobených ťažkými kovmi, rádionuklidmi, prípadne výbušninami.

Obmedzenie metódy: nemôže sa aplikovať v prostredí s veľmi vysokou toxicitou, pri ktorej dochádza k inhibícii biologickej činnosti.

Oboma metódami nedochádza k rozkladu kontaminantov, ale k obmedzeniu ich pôsobenia na prírodné prostredie a zdravie. V Slovenských podmienkach neboli zatiaľ komerčne použité. Použitie v praxi je limitované používaním sanačných limitov vyjadrených analyticky stanovenými koncentračnými hodnotami nebezpečnej látky, bez zohľadnenia hodnotenia jej ekotoxicity.

Biologickou redukciov vyššie oxidovaných foriem kovov sa dosiahne, že kovy v nižšom oxidačnom stupni sú v nerozpustnej forme, takže sa znižuje ich mobilita. Následne je nutné v pôde vytvoriť redukčné podmienky, a to hlavne dávkovaním látok, ktoré slúžia ako heterotrofný substrát pre mikroorganizmy do kontaminovanej pôdy. Účinnosť bioimobilizácie možno zvýšiť prídavkom apatitu alebo Fe<sup>0</sup> (Kaplan in Matějík ed., 2006). Enzymatická redukcia kovov je schopná niektoré kovy zbaviť toxicity. Ide predovšetkým o Cr<sup>6+</sup> a Hg<sup>2+</sup>, ktoré redukciov strácajú svoju toxicitu.

- **Landfarming**

Princíp je založený na aeróbnom biologickom rozklade polutantov rozprestretých v tenkej vrstve. Ide o jednu z najstarších a najodskúšanejších metód. Slúži hlavne k sanácii ropných kalov, to znamená aj kalov vniknutých pri ťažbe ropy. Agrotechnickými činnosťami (preorávanie, kyprenie, zavlažovanie) je do pôdy dodávaný vzdušný kyslík. Opakované kyprenie homogenizuje sanovaný materiál, ktorý býva často obohacovaný o makrobiotické prvky (N, P), alebo sa tiež používa bioaugmentácia (biologické oživenie). Naočkovanie aktívnych baktérií sa vykonáva hlavne vtedy, keď je materiál znečistený ťažšie odbúrateľnými uhlíkovodíkmi, alebo autochtónna biologická aktivita je nedostatočná. V tom prípade je potrebné laboratórnymi testami zistiť, či tento jav nespôsobujú inhibičné faktory. Kontaminovaný materiál sa rozprestrie na nepriepustnú a protihavarijne zabezpečenú plochu v hrúbke, ktorá zodpovedá hĺbkovému dosahu technického vybavenia. V prípade potreby sa pridáva vyľahčovací materiál, väčšinou lignocelulóзовého charakteru. V priebehu landfarmingu sa pridávajú makrobiotické prvky, alochtónne organizmy, voda, udržuje sa optimálna vlhkosť (12-30 % hm) a hodnota pH (6-8). Kyprenie sa vykonáva v takých intervaloch, aby nevznikali anaeróbne podmienky.

Obmedzenia: inhibičné vlastnosti kontaminantov, zimné obdobie s nízkymi teplotami, pri ktorých dochádza k premŕzaniu relatívne tenkej vrstvy sanovaného materiálu.

### **III.6.2.2 Chemické a fyzikálne metódy**

Metódy čistenia odťažných materiálov chemickými a fyzikálnymi metódami je možné použiť na elimináciu alebo zníženie nebezpečných vlastností zemín, dnových sedimentov a niektorých druhov odvodnených kalov (Burkhard in Matějů ed., 2004). V Slovenskej republike nie je používanie týchto, technológií zaužívané. Pri riešení problematiky riešenia odpadov z ťažobného priemyslu v podmienkach Slovenska sa reálne použitie týchto metód aj v budúcnosti pravdepodobne obmedzí na separáciu a solidifikáciu a stabilizáciu ex situ.

- **Fyzikálne mechanická separácia**

Táto metóda využíva výlučne mechanické princípy separácie zložiek zo zmesi materiálu, pričom nebezpečné látky sú koncentrované v jednej z oddelených zložiek a druhá zložka obsahuje menej alebo žiadne nebezpečné látky a jej ďalšia úprava je menej náročná alebo nie je potrebná. Separácia je väčšinou prvá etapa inej sanačnej technológie aplikovanej na vyseparovaných zložkách materiálu. Mechanické separačné procesy sú pri odpadoch z ťažobného priemyslu použiteľné predovšetkým pre oddeľovanie a koncentráciu materiálov s obsahom niektorých ťažkých kovov.

Obmedzujúce faktory: Vysoký podiel jemnozrnných zložiek ťlovej frakcie a malý rozdiel mernej hmotnosti znižuje účinnosť separačného procesu.

V rámci ex situ separačných procesov prichádza do úvahy oddeľovanie na sítach, gravitačná separácia, prípadne magnetická separácia. Gravitačnou separáciou sa vzájomne oddeľujú častice materiálu s rozdielnymi mernými hmotnosťami alebo tuhá a tekutá fáza. Samotný proces oddeľovania sa vykonáva v zariadeniach využívajúcich rôzne technológie, navrhnutými pre konkrétne charakteristiky sanovaného materiálu.

Pri sitovaní sa častice tuhého materiálu mechanicky oddeľujú pomocou sít s okami požadovanej veľkosti.

Látky s nebezpečnými vlastnosťami majú afinitu viazať sa na jemnozrnnejšie frakcie. Účinnosť oddeľovania môže znižovať adhézia jemnozrných častíc ílovej a prachovej frakcie na hrubozrnnejšie častice pieskovej a štrkovej frakcie. Účinnosť oddeľovania je možné zvýšiť sitovaním za mokra.

Magnetickou separáciou je možné oddeľovať iba častice, ktoré majú feromagnetické vlastnosti.

- **Pranie**

Princíp spočíva vo vymývaní znečistenia z pevnej matrice vodou a v niektorých prípadoch vodným roztokom aktívnych látok napomáhajúcim rozpúšťaniu nebezpečných kontaminantov. Procesom prania môže byť priamo znečisťujúca látka prevedená do roztoku, alebo môže byť oddelené znečistenie alebo frakcia materiálu, ktorá je jeho dominantným nosičom. Potom ide podobne, ako v prípade sitovania, o oddeľovanie jemnozrných frakcií od hrubozrnnejších. Metóda je v prípade odpadov z ťažobného priemyslu použiteľná pre zeminy znečistené ťažkými kovmi. Pre niektoré polutanty, napr. arzén je to jediná účinná sanačná technológia (Kyclyt in Matějů ed., 2004). Pranie sa vykonáva iba v najviac kontaminovanej časti odpadového materiálu, z ktorého boli odstránené (kamene, väčšie úlomky). Po predúprave je sanovaný materiál dopravovaný do pracieho zariadenia, ktoré pozostáva zo sít, zmiešavačov, vodných trysiek. Pracia voda je z procesu odvádzaná do čistiaceho zariadenia, odkiaľ je opäť použitá v procese prania alebo je vypúšťaná do vhodného recipienta. S hrubozrnými a jemnozrnými podielmi zemín oddelenými v procese prania sa ďalej nakladá podľa analyzovaného obsahu nebezpečných látok.

Obmedzenia použitia: obmedzujúcim faktorom je vysoký podiel jemnozrnnej frakcie zemín a ekonomická nevýhodnosť pre čistenie zemín s nižšími koncentraciami polutantov.

Výhodou technológie je redukcia celkového množstva materiálu, ktoré by ináč bolo potrebné sanovať inými metódami.

- **Solidifikácia a stabilizácia ex situ**

Procesy solidifikácie a stabilizácie ex situ sú totožné s princípmi solidifikácia a stabilizácie in situ, ktoré boli popísané v kapitole III.6.1.2. Chemické vlastnosti nebezpečných látok uzavretých v solidifikovanom materiáli nemusia byť žiadnym spôsobom ovplyvnené, zatiaľ čo stabilizáciou sú nebezpečné látky viazané do stabilnej a slabo rozpustnej formy, ktorá predstavuje nižšie riziko pre okolité prostredie. Chemické vlastnosti škodlivých látok v solidifikovanom materiáli nemusia byť týmto procesom ovplyvnené. Solidifikácia a stabilizácia ex situ sa používa v prípadoch, keď je nutné materiál z nebezpečnými vlastnosťami s rôznymi dôvodov odťažiť.

Metódami solidifikácie a stabilizácie je možné sanovať odpady s obsahom ťažkých kovov (predovšetkým Hg, As, Pb, Zn, Cd, Cr), rozpustné zlúčeniny (chloridy, sulfáty, fluoridy), uhľovodíky, organokovové zlúčeniny (ferokyanidy) a ďalšie látky (napr. s obsahom azbestu). Obmedzenia použitia metódy dané špecifickými fyzikálno-chemickými vlastnosťami niektorých odpadov sú rovnaké ako v prípade modifikácie in situ. Receptúra solidifikácie alebo stabilizácie sa navrhuje rovnakým spôsobom, ako je to v prípade metódy in situ, osobitne pre každú aplikáciu na základe dôkladného rozboru vstupných podmienok a analýz fyzikálnochemických vlastností nebezpečného odpadu a overuje sa laboratórnymi a pilotnými testami.

Odtážený odpad sa môže spracovať buď v blízkosti miesta odtáženia v mobilnom zariadení, alebo môže byť odvázaný na vzdialenejšie miesto do stacionárneho spracovateľského závodu. Solidifikáty majú oveľa nižšiu vylúhovateľnosť a ekotoxicitu ako pôvodný materiál.

### III.6.3 Technológie sanácie podzemných vôd a priesakových kvapalín *in situ*

#### III.6.3.1 Biologické postupy

Biologické *in situ* metódy sanácie podzemných vôd vo všeobecnosti nie sú v Slovenskej republike bežne používané. V rámci problematiky sanácie úložísk odpadov z ťažobného priemyslu prichádza v našich podmienkach do úvahy z viacerých v zahraničí odskúšaných metód prakticky iba metóda biotransformácie.

- **Biotransformácia a bioredukcia**

Biotransformácia je proces, pri ktorom je jedna látka premieňaná na inú látku reakciami katalyzovanými enzýmami mikroorganizmov (Matějů ed., 2006). Biotransformácia má spôsobiť zníženie toxicity nebezpečných zložiek rozpustených vo vode. Rizikom je, že transformáciou môžu za nevhodných podmienok vzniknúť naopak ešte toxickejšie produkty ako mala pôvodná látka. Bioredukcia znamená zníženie mocenstva chemického prvku v dôsledku činnosti mikroorganizmov. Pre sanáciu majú význam tie bioredukčné procesy, pri ktorých sa vyzrážajú nerozpustné zlúčeniny toxických prvkov.

Metóda je použiteľná na redukciu toxických foriem nasledujúcich prvkov na netoxické: Cr, U, As, Se. Tiež je možné vyzrážanie kovov (napr. Cd, Zn) z roztoku v dôsledku vzniku nerozpustných zlúčenín, napr. sulfidov.

Obmedzenie použitia: použitie tejto metódy je problematické pri viaczložkovom znečistení, pretože niektoré kovy môžu inhibovať činnosť bioredukciou mikroorganizmami a je riziko mobilizácie vyzrážaných zlúčenín ďalšou činnosťou mikroorganizmov.

Redukciu kovových iónov sprostredkovávajú špecifické bakteriálne kmene, ktoré je potrebné inokulovať do vodného prostredia. Pre bioredukciu sa ako donor elektrónov používajú rôzne organické látky (alkoholy, fenoly, organické kyseliny, cukry, molekulárny vodík).

Aplikácia metódy sa vykonáva cyklicky v opakovaných cykloch pomocou vhodných infiltračných objektov zvolených podľa miestnych podmienok.

- **Monitorovaná prirodzená atenuácia**

V dôsledku niektorých prirodzených pochodov prebiehajúcich v horninovom prostredí bez zásahu ľudskej činnosti dochádza za priaznivých fyzikálnochemických podmienok k zmenám a rozkladu polutantov. Tieto zmeny sú väčšinou pomalé, žiaduce znižovanie koncentrácií kontaminantov je možné očakávať vo veľmi dlhom časovom období rokov až desiatok rokov.

Medzi prirodzené procesy podieľajúce sa na nožnej atenuácii odpadov z ťažobného priemyslu patria predovšetkým: disperzia, riedenie, sorpcia, chemická alebo biologická stabilizácia, hydrolýza, rádioaktívny rozpad, odparenie alebo rozklad. Existencia takýchto procesov a ich rýchlosť sa zisťuje nepriamymi opakovanými meraniami súborov rôznych fyzikálnochemických parametrov vybraných podľa druhu špecifických procesov a overuje sa výpočtami a špecializovanými matematickými modelmi.

Návrh monitorovacieho systému a monitorovaných parametrov musí vychádzať z konkrétnych podmienok na lokalite.

Dlhodobé merania vývoja hydrogeologických parametrov, koncentrácií polutantov a ďalších parametrov sa porovnávajú s vypočítanými teoretickými predpokladmi.

Základnou podmienkou použitia metódy je, že nedochádza k zväčšovaniu mraku kontaminácie v čase a z dlhodobého hľadiska nie je ohrozený žiadny receptor v jeho dosahu.

V takom prípade je vhodnou úpravou podmienok v zvodnenom prostredí dosiahnuť urýchlenie týchto žiaducich procesov.

- **Podporovaná atenuácia**

Princíp podporovanej atenuácie spočíva vo využití procesov prirodzenej atenuácie, pričom sa optimalizujú podmienky na elimináciu inhibičných a obmedzujúcich podmienok na lokalite. Hlavným atenuačným pochodom v prípade sanácie odpadov z ťažobného priemyslu je transformácia. Metóda je použiteľná pri odstraňovaní niektorých ťažkých kovov.

Obmedzenia: metódu nie je možné použiť v prostrediach s nepriaznivými podmienkami pre atenuačné procesy a kde doba sanácia i po podpore by bola neprimerane dlhá.

Najčastejším spôsobom podpory prirodzených atenuačných procesov je eliminácia nedostatku donorov elektrónov pre transformáciu (Murray in Matějů ed., 2006). Podporovanú atenuáciu je možné využiť na intenzifikáciu stabilizačných procesov kontaminácie kovmi a rádionuklidmi rozpustenými v podzemnej vode.

Proces prirodzenej spotreby kyslíka, znižovania oxidačnoredukčného potenciálu a vzniku redukčného prostredia je možné podporiť infiltráciou heterotrofných substrátov do podzemnej vody. Tým sa podporuje biologická redukcia síranov na sírniky kovov, ktoré sú vo vode nerozpustné. Prídavok substrátu musí odstrániť nedostatok organického uhlíka, makrobiotických prvkov alebo nedostatočne aktívnu autochtónnu bakteriálnu populáciu.

Podporovanú atenuáciu je v podmienkach Slovenska vzhľadom na prítomnosť receptorov znečistenia prakticky v blízkosti každého úložiska použiť iba na dočistenie zvyškových koncentrácií kontaminantov.

### **III.6.3.2 Chemické a fyzikálne metódy**

- **Bariéry**

Pod pojmom bariéra sa v rámci sanačných metód rozumie podzemná zóna obmedzujúca alebo brániaca šíreniu kontaminantu do horninového prostredia a podzemných vôd. K eliminácii šírenia znečistenia dochádza samotnou inštaláciou bariéry, väčšinou bez nutnosti ďalších sanačných zásahov.

Bariéry často súbežne plnia funkciu sanačného aj rekultivačného prvku, a preto ich použitie môže byť navrhnuté s prihliadnutím na niektorú z nich, či súbežne obidve funkcie.

### Vertikálne bariéry

Rozdelenie vertikálnych bariér:

- podľa pôdorysného tvaru: uzavreté (kompletne obkolesujú zdroj znečistenia)  
otvorené (oddeľujú mrak znečistenia od okolia v smere jeho šírenia)
- podľa hĺbky založenia: úplné (votknuté do nepriepustného podlažia)  
neúplné (založené v priepustných horninách)
- podľa funkcie: nepriepustné (tesniace alebo separačné)  
drenážne  
hydraulické (systém vrtov)  
priepustné (reaktívne)

### Nepriepustné bariéry

Nepriepustné bariéry sa používajú ako sanačný prvok v tých prípadoch, keď iné sanačné metódy neumožňujú efektívne odstránenie znečistenia, prípadne ako doplnkové opatrenie inej metódy.

Typ a spôsob realizácie podzemnej tesniacej steny sa v každom prípade navrhuje individuálne podľa miestnych hydrogeologických podmienok, typu znečistenia a predpokladanej doby využiteľnosti. Pre zaistenie vyhovujúcich tesniacich vlastností musí mať bariéra o niekoľko rádov nižšiu hodnotu koeficienta priepustnosti pre znečistenú vodu, resp. priesakovú kvapalinu v porovnaní s okolím. Zvolený typ tesniaceho materiálu musí okrem hydraulických vlastností vyhovovať aj dlhodobou odolnosťou voči pôsobeniu kvapalín s často agresívnymi vlastnosťami. Spôsob inštalácie musí zaručovať kontinuitu spojov jednotlivých segmentov z ktorých sa bariéra skladá a taktiež kontinuitu votknutia, pokiaľ ide o úplnú bariéru.

Vertikálne bariéry sa podľa typu a spôsobu konštrukcie rozdeľujú nasledovne (Černá, Řičica in Matějů ed., 2006):

- podzemné tesniace steny - hĺbené drapákom, rýpadlom, hydrofrézou,
- kompozitné podzemné tesniace steny – zaťahované v ryhe, uložené po vertikálnych pásoch,
- tenké steny – predrážané vibračne s injektážnou výplňou,
- štetovnicové steny – baranené alebo vibrované,
- premiešavané zeminy – vrtákmi alebo frézou,
- injekčná clona – impregnačná injektáž a tlaková výplň,
- trysková injektáž – jednoradová, dvojradová, usmernená.

### Drenážne bariéry

Drenážne bariéry sú vertikálne prvky, ktoré sa používajú na odvedenie a sústredenie alebo usmernenie prúdenia podzemnej vody alebo priesakovej kvapaliny. Využívajú sa hlavne v nehomogénnom prostredí na zachytenie kontaminovaných kvapalín prúdiacich prednostne preferenčnými cestami.

Obmedzenia: častým javom, ktorý je potrebné pri návrhu bariéry zhodnotiť je potenciálna kolmatácia drénu. Použitie drenážnych prvkov je problematické vo veľmi členitom teréne a geotechnicky nestabilnom teréne.

Drenážne bariéry je možné budovať pomocou líniových výkopov s dočasným pažením alebo hĺbených pod suspenziou. Technicky a finančne náročnejší spôsob je ťažba a budovanie po samostatných lamelách.

### Priepustné reaktívne bariéry

Priepustná reaktívna bariéra je priepustná zóna, ktorá obsahuje alebo vytvára reaktívnu oblasť pôsobenia, zameranú na prehradenie alebo odstránenie kontaminačného mraku. Odstraňuje polutanty z prúdiacej podzemnej vody pasívnym spôsobom, fyzikálnymi, chemickými alebo biologickými procesmi.

Priepustné reaktívne bariéry sú vhodné riešenie v priepustnom geologickom prostredí s ustáleným režimom prúdenia podzemných vôd a s hydrogeologickým izolátorom v podloží.

Technológia je použiteľná aj na rekultivované úložiská, kde niekoľko rokov po uzavretí je produkované malé množstvo kyslých vôd, resp. vôd obsahujúcich ťažké kovy. Priepustné reaktívne bariéry môžu byť použité pre kyslé aj alkalické vody. Pre úspešnosť tejto metódy musia byť dobre overené hydrogeologické pomery lokality, hlavne priepustnosť hydrogeologického kolektora a tiež musí byť identifikovaný režim prúdenia podzemnej vody, aby sa zabezpečilo, že znečistená podzemná voda bude prúdiť cez reaktívnu bariéru a nebude ju obtekať. Taktiež rýchlosť prúdenia, resp. hydraulický gradient je dôležitý z hľadiska určenia reakčnej doby (doby zdržania).

Priepustné reaktívne bariéry možno v závislosti od použitej reakčnej výplne použiť na odstraňovanie širokého spektra kontaminantov. Pri riešení problematiky odpadov z ťažobného priemyslu sa použitie obmedzuje na elimináciu ťažkých kovov. Podzemné reaktívne bariéry sú vhodnejšie na sanáciu nižších koncentrácií nebezpečných polutantov ako elimináciu vysokých koncentrácií menej nebezpečných látok.

Obmedzenia: vysoký gradient, nedostatočná doba zdržania podzemnej vody, kolmatácia a inkrustácia filtračných častí zrazeninami z chemických reakcií, veľmi nízka priepustnosť horninového prostredia ( $k < 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ ).

Reaktívnu (reduktívnu) výplň môže tvoriť rôzny organický alebo anorganický materiál, ktorého optimálna priepustnosť sa dosahuje zmiešaním s granulometricky a materiálovo vhodným štrkom. Okolo reaktívnej zóny môžu byť vybudované pufrovacie zóny. Účinnosť bariéry musí byť sledovaná pomocou pozorovacích vrtov vhodne situovaných pred a za bariérou (z hľadiska smeru prúdenia podzemných vôd). Návrhu bariér má predchádzať realizácia laboratórnych skúšok, kolónových testov a prípadne pilotná skúška. Poloha, tvar bariéry sa určuje na základe hydraulického modelu. Každá reaktívna bariéra musí byť navrhnutá individuálne s ohľadom na lokálne podmienky.

Existuje niekoľko spôsobov konštrukcie podzemných reaktívnych bariér:

- plne pretekaná reaktívna bariéra sa buduje ako súvislý výkop alebo ako línia širokopriemerových vzájomne sa prekrývajúcich vrtov vyplnených reaktívnym materiálom,
- reaktívna bariéra s prietoknou bránou (niekedy sa používa prebraté označenie zo zahraničnej literatúry: systém lieviek – brána) pozostáva z otvorenej tesniacej steny, zvyčajne s pôdorysom v tvare písmena U alebo L. Bočné krídla usmerňujú prúdenie

podzemnej vody smerom do čelnej časti, orientovanej priečne k smeru prúdenia podzemnej vody. V tejto časti podzemnej steny je inštalovaná jedna alebo viac reaktívnych brán navrhnutých individuálne pre daný typ znečistenia,

- systém drén-brána využíva drenážne účinky podzemného drény na usmernenie podzemnej vody, ktorá preteká podzemným reaktorom. Prečistená voda gravitačne prúdi prostredníctvom drenážneho systému späť do horninového prostredia,
- línia infiltračných vrtov plní podobnú funkciu ako reaktívna bariéra. Vrty v tomto prípade slúžia ako aplikačné prvky na priebežné alebo cyklické dodávanie reakčného činidla do zvodneného prostredia.

Ako reaktívny materiál sa najčastejšie využíva nulamocné železo (železné piliny, troska, železité oxidy na redukciu kovov Cr, U, As, Tc, Pb, Cd, Mo, Hg, P, Se, Ni). Pri úprave kyslých vôd sa pridáva vápenec na zvýšenie hodnoty pH, aby sa dosiahlo zrážanie sulfidov. Pri príliš vysokej hodnote pH dochádza k intenzívnemu zrážaniu zlúčenín kovov, ktoré môže spôsobiť rýchle upchanie filtračnej časti reaktívnej bariéry.

V priebehu činnosti podzemných aktívnych bariér je najdôležitejšou činnosťou monitoring kvality podzemnej vody pred a za bariérou a meranie piezometrických výšok hladiny podzemnej vody. Rozsah sledovaných ukazovateľov sa stanovuje individuálne podľa typu kontaminácie a použitej reakčnej náplne. Vo väčšine prípadov sa sledujú základné fyzikálnochemické ukazovatele, koncentrácia rozpustených látok, základné kationy a anióny a koncentrácie prítomných kontaminantov.

## • Injektáž

### Tlaková injektáž

Princípom injektáže je vyplnenie medzizrnových priestorov a puklín tlakovým dávkovaním vhodného média do horninového prostredia. Injektované médium môže mať po vytvrdnutí funkciu hydrogeologického izolátora alebo môže tiež reagovať s okolitým materiálom. Injektáž sa používa na vytvorenie tesniacej bariéry okolo znečisteného priestoru alebo aj priamo v znečistenom priestore. Hĺbkový dosah injektáže závisí od miestnych podmienok, môže dosahovať desiatky až stovky metrov.

Zloženie injektážnej zmesi sa navrhuje individuálne podľa podmienok v mieste použitia. Pripravuje sa na mieste a injektuje sa po etážach vzostupným spôsobom za použitia obojstranného obturátora. Injektáž sa obvykle vykonáva prostredníctvom špeciálnych injektážnych vrtov, ktoré sú utesnené proti úniku injektovanej zmesi mimo vymedzenú etáž.

### Trysková injektáž

Trysková injektáž má podobné použitie ako tlaková injektáž. Používa sa na vytvorenie tesniacich a enkapsulačných bariér. Pri tryskovej injektáži dochádza k dezintegrácii štruktúry horninového prostredia a premiešaním jeho častíc s injektovaným médium. Injektuje sa obvykle po obvode vrtu otáčaním injektážneho náradia o 360° alebo sa injektuje usmernene vo zvolenom rozmedzí azimutu. Dosah lúča môže byť podľa miestnych podmienok až 1,5 m. Postupným vyťahovaním injektážneho náradia vzniká preinjektované stĺpovité teleso alebo rebro. Vzájomným spájaním alebo prekryvaním takýchto telies vznikajú priestorové bariéry, ktorých polohu je možné navrhovať prakticky ľubovoľne, podľa potreby.



### III.6.4 Technológie čistenia vody ex situ

#### III.6.4.1 Biologické metódy

- **Umelé mokrade**

Umelé mokrade sa na základe svojej funkcie môžu zaradiť medzi sanačné i rekultivačné prvky. V umelých mokradiach sa využívajú prirodzené geochemické a biologické procesy v umelo vytvorených ekosystémoch. Pri čistení vôd pretekajúcich takýmito systémami sa využívajú procesy zrážania, akumulácie a transformácie. Umelé mokrade je možné využiť na dočisťovanie priesakových kvapalín vytekajúcich z telies úložísk, pokiaľ koncentrácie nebezpečných látok (kovov) nie sú príliš vysoké a ekotoxická umožňuje prežívanie potrebných mikroorganizmov a cievnatých rastlín. Tento spôsob čistenia je možné použiť na odstraňovanie kovov a ďalších anorganických látok.

Obmedzenie použitia: klimatické pomery, v chladných obdobiach sa procesy spomaľujú až úplne zastavujú. V dôsledku nerovnomerného prietoku môže nastať narušenie čistiacich procesov a straty účinnosti čistenia.

Umelé mokrade sa navrhujú individuálne podľa hydrogeologických podmienok na lokalite, mikroklimatických podmienok, prietoku a kvality pretekajúcej vody. Mokrade môžu byť s povrchovým tokom, podpovrchovým horizontálnym alebo vertikálnym tokom. Podľa spôsobu rastu rastlín môžu byť s vynoreným rastom, ponoreným rastom alebo plávajúce a ďalej sa delia podľa zloženia dna.

Pri odstraňovaní najbežnejších kontaminantov uvoľňovaných z odpadov z ťažobného priemyslu sa uplatňujú predovšetkým biotické procesy, a to fytoakumulácia, fytostabilizácia a hlavne mikrobiologické procesy. Mokrade sa úspešne dajú využiť na odstraňovanie kovov, avšak uplatnenie mokradí ako samostatného sanačného prvku je v klimatických podmienkach Slovenskej republiky problematické.

#### III.6.4.2 Chemické a fyzikálne metódy

Použitie chemických a fyzikálnych metód ex situ sanácie podzemnej vody zahŕňa kombináciu klasického sanačného čerpania, alebo iného spôsobu zachytávania podzemných vôd alebo priesakových kvapalín (napríklad drény) a špecializované postupy čistenia navrhnuté na odstraňovanie príslušných kontaminantov z odčerpávanej vody. Pre odstránenie najčastejšie sa vyskytujúcich typov znečistenia vôd na úložiskách odpadov z ťažobnej činnosti sa môžu využiť nasledujúce metódy:

- **Zrážanie**

Zrážanie je chemický proces pri ktorom sa zo sanovaných vôd odstraňujú polutanty vyzrážaním, ktoré sa dosiahne pridaním vhodného činidla, alebo zmenou fyzikálnochemických podmienok. Nerozpustná zrazenina sa z kvapalnej fázy odstráni separačnými postupmi (sedimentácia, filtrácia, koagulácia, flotácia). Zrážanie je možné použiť na odstraňovanie rozpustených zlúčenín kovov ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , Ba, Cd, Co,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$ , Cu, Hg, Ni, Pb) alebo kyanidov z podzemných vôd, povrchových vôd alebo priesakových kvapalín (Dubánek in Matějů ed., 2006).

#### Obmedzenie použitia:

- použitie metódy je komplikované v prípade súčasného znečistenia viacerými zložkami, ktorých vyzrážanie si vyžaduje rozdielne fyzikálnochemické podmienky a ktoré sa v roztoku navzájom ovplyvňujú a tvoria komplexné zlúčeniny,
- v prípade produkcie veľkého množstva kalov, ktoré je potrebné odvodniť a zneškodniť,
- v prípade, že požiadavky na kvalitu podzemnej vody sú prísnejšie, ako je možné dosiahnuť technológiou zrážania, ktorá je limitovaná súčinom rozpustnosti cieľovej zlúčeniny.

Účinnosť metódy zrážania je závislá od účinnosti separácie vznikajúcej zrazeniny. Dimenzovanie sanačnej linky je podmienené rýchlosťou zrážania nerozpustnej zrazeniny a jej kvalitou z hľadiska možnosti jej separácie. Návrh technológie je možné vykonať iba na základe laboratórnych skúšok zrážacích procesov. Odstraňovanie kovov s vysokými zvyškovými koncentraciami, alebo vysokými hodnotami pH, ktoré je potrebné na zrážanie je potrebné doplniť o technológie na následnú neutralizáciu alebo zachytávanie zvyšných kovov metódami adsorpcie alebo iónovýmeny. Typické usporiadanie zrážacej technologickej linky pozostáva z redukčného reaktora, miešaného reaktora s dávkovaním zrážacích chemikálií a zariadení na sedimentáciu, zahustenie a odvodnenie kalu.

#### • **Koagulácia a flokulácia**

Koaguláciou je možné z vody odstrániť kontaminanty tvorené termodynamicky nestálymi disperziami – koloidnými sólmi (napr. sulfidy kovov v podzemnej vode alebo priesakovej kvapaline). Proces koagulácie je založený na porušení agregátnej stability nerozpustených koloidných látok. Flokulácia je súčasť procesu, pri ktorom sa z mikrovločiek tvoria veľké vločky. Metódu koagulácie, resp. flokulácie je možné použiť na agregáciu koloidných suspenzií vzniknutých zrážaním nerozpustných zlúčenín kovov ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , Ba, Cd, Co,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$ , Cu, Hg, Ni, Pb). Celková účinnosť koagulácie je závislá na kvalite vzniknutých vločiek, agregátnej stabilite odstraňovanej látky a účinnosti separácie vzniknutých vločiek (sedimentácia, zahusťovanie).

Obmedzenia metódy: koaguláciou vznikajú veľké množstvá kalov, ktoré je potrebné následne odvodniť a zneškodniť. Procesy koagulácie sú závislé na teplote, nízka teplota spomaľuje tvorbu vločiek.

Zariadenie na koaguláciu sa navrhujú individuálne na základe chemického typu znečistenia, fyzikálnochemických vlastností sanovanej vody a množstva čistených vôd. Hydraulické riešenie zariadenia musí zohľadňovať kinetiku koagulácie. Pri sanáciách sa vzhľadom na zložitosť koagulačných procesov koagulácia navrhuje v kombinácii so zrážaním alebo čistením koncentrovaných výluhov získaných pri sanácii horninového prostredia, resp. priesakových kvapalín (Dubánek in Matějů ed., 2006). Technologická skladba koagulačnej linky a zrážacej linky je podobná, avšak reaktor na zrážanie je nahradený reaktorom rýchleho miešania s krátkou dobou zdržania (perikinetický reaktor) a reaktor na koaguláciu a flokuláciu je vybavený miešaním pre ortokinetickú koaguláciu, ktorá vyžaduje dlhšiu dobu zdržania.

Medzi základné a najčastejšie používané koagulačné činidlá patria chlorid železitý, síran železitý, síran hlinitý, alebo polyaluminiumchlorid (PAX).

Medzi pomocné koagulačné činidlá (flokulanty) patria zaťažkávadlá (perlit, jemný vápenec, práškové aktívne uhlie, prírodné organické polyméry (na báze škrobov) alebo syntetické

polyméry (kationaktívne alebo anión aktívne na báze polyakrylamidu). Na separáciu vločiek koagulantu sa preferujú gravitačné princípy, sedimentácia a zahusťovanie.

## Použitá literatúra:

- Cehlár, M. – Mihók, J. – Engel, J. – Rybár, R., 2005:* Povrchové dobývanie. Edičné stredisko/AMS F BERG Technickej univerzity v Košiciach.
- Ed. EXPO, 2004:* Reference Document on Best available Techniques for Management of Tailings and Waste\_Rock in Mining Activities. EC Directorate-General JRC Sevilla.
- Fell, R. – Phillips, T. – Gerrard, Ch., 1993:* Geotechnical Management of Waste and Contamination. A.A. Balkema, Rotterdam.
- INAP, 2009:* The Global Acid Rock Drainage Guide - hypertext multimedia publication in the Internet.
- Innemanová, P. – Vencelides, Z. – Šráček, O. 2001:* Monitorovaná prirodzená atenuácia ropných uhlovodíkov a chlorovaných uhlovodíkov v podzemnej vode. Ministerstvo životného prostredia Českej republiky.
- Koenigsberg, S. – Norris, R., 1999:* Accelerated Bioremediation Using Slow Release Compounds. Regenesys Bioremediation Products, San Clemente.
- Martoň, J. – Tölgyessy, J. – Hyánek, L. – Piatrik, M., 1984:* Získavanie, úprava, čistenie a ochrana vôd. ALFA Bratislava.
- Matějí, V. ed. et al., 2006:* Kompendium sanačných technológií. Vodní zdroje Ekomonitor spol. s r. o., Chrudim.
- Powell, R. – Blowes, D. – Gillham, R. – Schultz, D. – Sivavec, T. – Puls, R. – Vogan, J. – Powell, P. – Landis, R., 1998:* Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation. EPA Washington DC.
- Resch M., McCarthy L., 1998:* Field applications of in situ remediation technologies – Chemical Oxidation, EPA.
- Siegrist, R. – Urynowicz, M. – West, O. – Crimi, M. – Lowe, K. 2001:* In Situ Chemical Oxidation Using Permanganate. Battelle Press Columbus, Richland.
- Šráček, O. - Datel, J. - Mls, J., 2002:* Kontaminační hydrogeologie. Karolinum Praha.
- Vidic, R. – Pohland, F., 1996:* Treatment Walls. University of Pittsburgh.
- Vrana, K. – Šottník, P. – Frankovská, J. – Úradníček, Š. – Piovarčí, M., 2008:* Hodnotenie odpadov z ťažobného priemyslu pre potreby transpozície európskej smernice o nakladaní s odpadom z ťažobného priemyslu. HYDEKO-KV Bratislava.
- Wickramanayake G.B., Gavaskar A.R., Abraham S.C.C., 2000:* Chemical Oxidation and Reactive Barriers – Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Battelle Press, Monterey, California.
- Ženišová, Z. – Hyánková, K., 1997:* Hydrogeochémia. Univerzita Komenského Bratislava.