

Modely sanácie odkalísk, odvalov a banských vôd

Modellierung der Sanierungen von Klärteichen, Halden und Grubenwässer

Marek Hrabčák¹

Abstrakt

Slovensko má podobne ako susedná Česká republika veľmi dlhú tradíciu baníctva. Niektorí montanisti uvádzajú, že už staroveký Rimania tažili drahý opál na Dubníku pri Prešove, aj keď o tom nemáme žiadne hodnoverné doklady. Klasické rudné baníctvo zanechalo hmotné doklady až zhruba od 12.-13. storočia pričom rozmach nastal v 14. až 19. storočí. Aj plošne najväčšie pohorie na Slovensku - Slovenské Rudohorie (geologicky synoným je Spišsko-gemerské rudohorie), ktoré zaberá vyše 4 000 km² získalo svoje pomenovanie podľa bohatých zásob nerastných surovín.

Útlač baníctva v 20. storočia a jeho definitívne ukončenie na prahu 21. storočia ale prinieslo pre tento región niektoré väzne environmentálne dopady. Aj keď rudné baníctvo na Slovensku nie je spojené s hlbokými tažobnými jamami či masívnymi haldami a odvalmi ako napr. povrchová tažba uhlia v severných Čechách, má svoje špecifické problémy. Jedná sa predovšetkým o banské vody, ktoré voľne vytiekajú z opustených banských diel a ktorých chemizmus veľmi negatívne ovplyvňuje povrchové aj podzemné vody v okolí. Ďalším väzny environmentálnym problémom sú oxidačno-redukčné pochody na bývalých rudných haldách alebo flotačných odkaliskách, ktoré sú taktiež zdrojom kontaminácie najmä tažkými kovmi pre svoje okolie. Pretrvávajúci negatívny dopad aj po už vykonaných sanačných a rekultivačných opatreniach z nedávnej minulosti svedčí o tom, že tieto nápravne kroky boli vykonané buď metodicky alebo technicky nesprávne.

Kurzfassung

Ähnlich wie die benachbarte Tschechische Republik verfügt die Slowakei über eine lange Bergbautradition. Durch manche Montanisten wird behauptet, dass bereits durch die alten Römer der teure Opal in Dubník bei Prešov abgebaut wurde, obwohl es dazu keine glaubwürdigen Nachweise gibt. Der klassische Erzbergbau hinterließ materielle Nachweise erst seit dem 12. - 13. Jahrhundert, wobei der Bergbau seine Blütezeit im 14. - 19. Jhr. erreichte. Auch das der Fläche nach größte Gebirge in der Slowakei - das Slowakische Erzgebirge mit 4 000 km² Fläche erhielt seine Bezeichnung nach reichen Rohstoffvorkommen.

Der Rückgang des Bergbaus im 20. Jahrhundert und seine endgültige Stilllegung zu Beginn des 21. Jahrhunderts brachten für diese Region einige schwerwiegende ökologische Folgen. Obwohl der Erzbergbau in der Slowakei nicht mit tiefen Gruben oder massiven Halden verbunden ist, wie etwa der Tagebau in Nordböhmen, hat er seine spezifischen Probleme. Es handelt sich insbesondere um das Grubenwasser, das frei aus den Bergwerken herausfließt und dessen chemische Zusammensetzung negative Auswirkungen auf das Oberflächen- sowie das Grundwasser in der Umgebung hat. Ein weiteres wichtiges Umweltproblem stellen die Oxidations und Reduktionsprozesse in den ehemaligen Erz-halden oder Klärteichen dar, die ebenfalls eine Quelle der Verunreinigung insbesondere durch Schwermetalle für ihre Umgebung darstellen. Die andauernden negativen Auswirkungen auch nach den in der jüngsten Vergangenheit bereits durchgeföhrten Sanierungs- und Rekulтивierungsmaßnahmen zeugen davon, dass diese Maßnahmen methodisch oder technisch nicht richtig ausgeführt wurden.

In dem Beitrag wird eine kurze Übersicht mancher ausgewählter Standorte in der Slowakei sowie mancher von uns vorgeschlagener Modelle und Verfahren zur Sanierung dieser Gebiete vorgestellt.

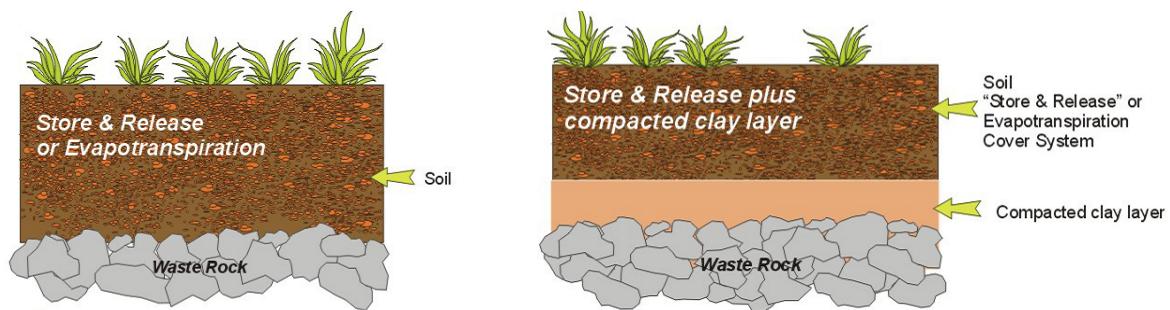
¹GEOSOFTING, spol. s r.o., Solivarská 28, SK-08005 Prešov, geosofting@stonline.sk

1 Rizika odvalov, odkalísk a opustených banských diel

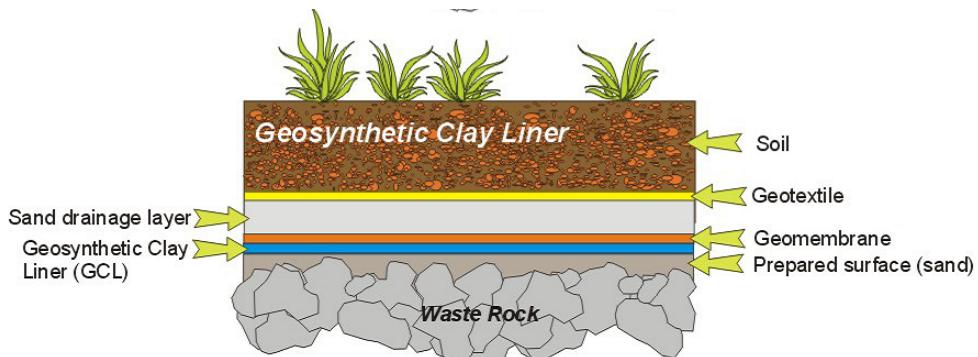
V banskej praxi sa zaužívalo rozdielne pomenovanie pre odvaly (haldy, výsypky), ktoré slúžia na ukladanie tuhého ťažobného odpadu a na odkaliská, ktoré sa budujú pre zneškodnenie jemnozrnného ťažobného odpadu zmiešaného s vodou pochádzajúcej z úpravy nerastov. Odpad z úpravy rúd (úpravníky resp. flotačný kal), ktorý bol naplavovaný hydraulickým spôsobom sa ukladá na odkaliske, pričom sa uplatňovali sedimentačné procesy v závislosti od granulometrického zloženia a fyzikálnych vlastností materiálu. Tako naplavované a usadené sedimenty sa vyznačujú špecifickými vlastnosťami, ktoré súvisia hlavne so samotným spôsobom úpravy rudy. Špecifickým problémom je pomenovanie úložísk ťažobného odpadu, ktorý vznikol pri úprave nerastov = flotačný kal, ktorý bol najprv uložený hydraulicky na klasickom odkaliske ale neskôr bol redeponovaný už v suchom stave na iné miesto. Vzhľadom na nemožnosť vysledovať historické postupnosti ukladania a premiestňovania ťažobných a upravárenských odpadov je potom striktné dodržiavanie terminológie podľa Kozákovej a rozdielne pomenovanie pre odvaly a pre odkaliska problematické.

2 Technické spôsoby rekultivácie odkalísk a odvalov

Pri rozhodovaní o spôsobe sanácie a rekultivácie odkalísk a banských odvalov navrhované technické riešenie vždy závisí na charaktere uloženého odpadu. Pokiaľ nehrozí priama vyluhovateľnosť škodlivín z odpadu zrážkami, resp. uložený materiál má viac menej charakter inertu, t.j. priesak neohrozuje okolité životné prostredie a zdravie ľudí, je postačujúce len prekrytie povrchu zeminou s hrúbkou dostatočnou pre životoschopný vegetačný pokryv (30-50 cm). Vegetačný pokryv, ako bude ďalej uvedené, je mimoriadne dôležitý v našich klimatických podmienkach na obmedzenie priesaku zrážkových vôd do telesa odvalu a tým aj tvorbe priesakových vôd. Schematický pohľad na jednoduché prekrytie odvalov prináša napríklad Jones - Fawcett [1] na nasledujúcich obrázkoch:

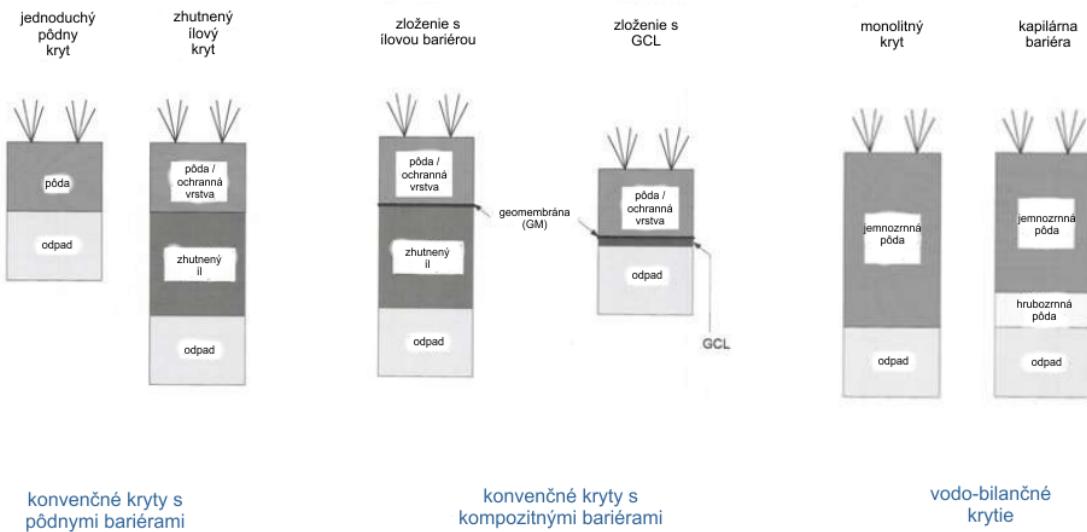


Pokiaľ ale hrozí vyluhovanie nebezpečných látok z uloženého odvalu alebo odkaliska (pre odvaly produkujúce kyslé banské vody vždy !), je potrebné v rámci sanácie a rekultivácie riešiť dostatočne funkčnú izoláciu povrchu proti priesakom zrážok pomocou geosyntetických materiálov:



Podľa Smitha [3] súčasné moderné trendy na izolácie a rekultivácie banských odkalísk a háld odporúčajú ako tesniace vrstvy tri druhy postupov:

1. CCL t.j. zhutnené vrstvy ílov resp. nízko prieplustných zemín
2. GM resp. GCL t.j. geomembrány (fólie) alebo geosyntetické bentonitové rohože
3. WBC t.j. evapotranspiračná vrstva (len pre oblasti s výparom väčším ako zrážky)



Z uvedeného rozdelenia je zrejmé, že variant 3. je pre naše klimatické podmienky nepoužiteľný. Ostáva tak možnosť použiť variant 1. alebo 2. variant č. 1 s prirodzeným ílovým tesnením je podmienený dostupnosťou ložiska kvalitného ílu na vybudovanie dostatočne hrubej a kvalitnej tesniacej vrstvy. Požiadavka na ílové tesnenie teda musí zodpovedať klasickému nepriepustnému ílovému tesneniu ako pre výstavby malých vodných nádrží (STN 73 6824 čl.78) resp. na ílové tesnenie pri výstavbe skládok odpadov (STN 83 8106 čl.3.1.2 až 3.1.3). Výber vhodného zemníka s požadovanými vlastnosťami suroviny, ako aj jeho ťažba, preprava na lokalitu a samotné zriadenie CCL kladie tak pomerne vysoké technologické ako aj finančné nároky na tento spôsob tesnenia (čl.3.1.5). Klasické ílové tesnenie 2x250 mm je možné modifikovať aj ďalšími vhodnými zeminami.

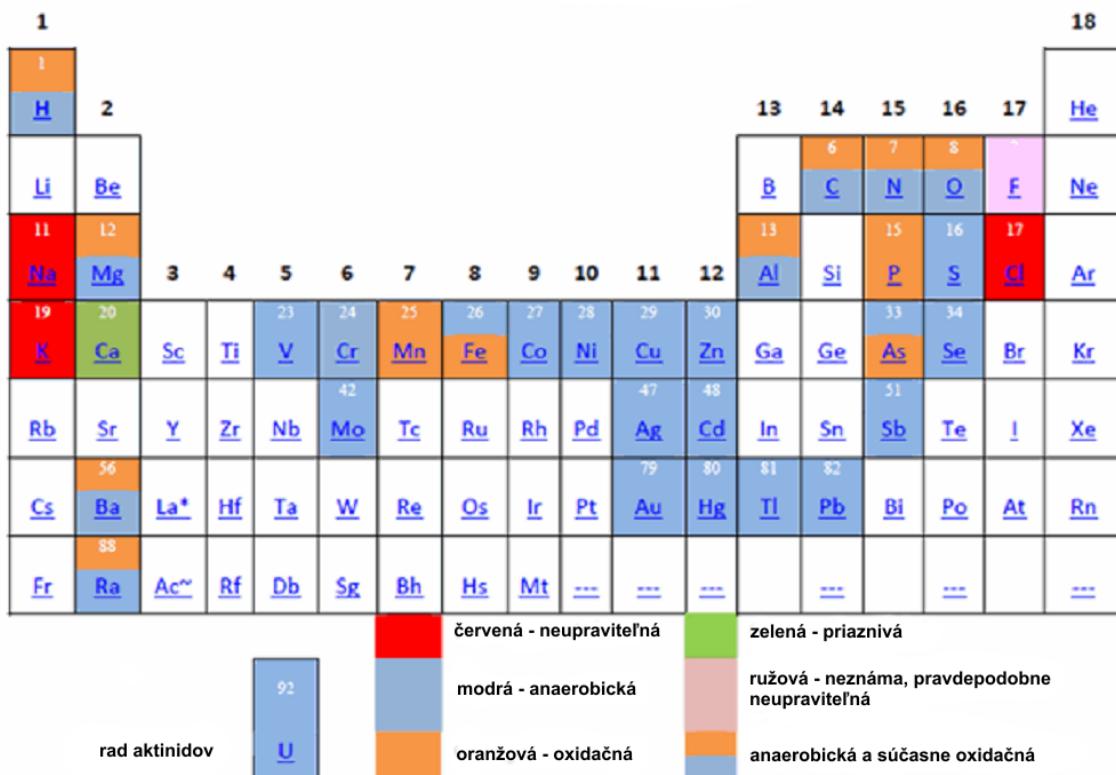
V prípade požiadavky na absolútну tesniacu účinnosť je možné aplikovať dvojité tesnenie: fóliu a bentonit (GM+GCL), prípadne použiť špeciálne bentonitové rohože (GCL) s integrovanou vrstvou HDPE geomembrány (GM), ktoré v jednom technologickom celku tak predstavujú dvojité tesniacu bariéru a prakticky nepriepustnú vrstvu. Spôsob a špecifiká pokladky GCL vrstvy je podrobne popísaný v technických manuáloch jednotlivých výrobcov. Výber konkrétneho geosyntetického materiálu na izoláciu a tesnenie potom závisí už len na lokálnych geotechnických a klimatických pomeroch. Príklady použitia geosyntetických materiálov na prekrytie a rekultiváciu banských odvalov a odkalísk v drsných aljašských pomeroch, na ropných pieskoch v kanadskej Alberte, v tropických monzúnových oblastiach Novej Kaledonie či extrémnych aridných ložísk v Južnej Afrike svedčia o dostatočne vyhovujúcich vlastnostiach týchto materiálov pre daný účel. Ich použitie v poslednom období na svetových rudných ložiskách či pri ťažbe tzv. krakováním, kde sa okrem rekultivačných prác používajú na oveľa náročnejšie aplikácie do spodných podložných vrstiev vylúhovacích polí a sedimentačných nádrží, je dostatočnou referenciou pre ich výborné technologické vlastnosti a funkčnosť.

3 Spôsoby úpravy banských vôd z opustených ložísk.

Banské vody (hlavne kyslé = AMD, ale aj alkalické) vytekajúce z opustených banských diel sú jednou z hlavných príčin znečistenia povrchových ale aj podzemných vôd. Vzhľadom na to, že toto znečistenie môže pretrvávať po niekoľko desaťročí až dokonca stáročia od ukončenia banskej činnosti, existuje akútna potreba nájsť efektívne riešenia na elimináciu týchto dopadov banských prác na životné prostredie a zdravie obyvateľstva. Tomuto problému sa venoval aj výskumný projekt v rámci 5. operačného programu "Sustainable Management and Quality of Water", ktorý pre EK realizovalo konzorcium PIRAMID v roku 2003.

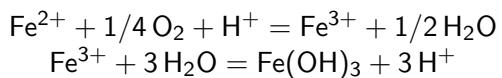
Zatiaľ čo pri aktívnej banskej činnosti je vypúšťanie odpadových a banských vôd regulované predpismi a povoleniami pre danú prevádzku a jej vlastníka, pre opustené banské diela už nie je možné tieto kroky uplatniť. Preto sa hľadajú účinne opatrenia, ktoré by boli aplikovateľné aj pre lokality "bez majiteľa" resp. lokality bez možnosti využitia elektrickej energie. Takéto postupy sa označujú ako "pasívne in situ sanácie" na úpravu kyslých alebo alkalických banských vôd. Oproti aktívnym postupom sa líšia najmä v ekonomickej štruktúre. Pri aktívnej úprave banských vôd sa celkové náklady na úpravu vôd (investičné aj prevádzkové) spoločne rozložia na celé obdobie prevádzky zariadenia. Pri pasívnych systémoch sú naopak relatívne vysoké investičné náklady už pri vybudovaní systému, samotné prevádzkové náklady sú už potom minimálne. Z toho potom vyplýva aj požiadavka, aby samotný systém (technológia) pracoval bez ďalších dotácií (energie, surovín) po celu dobu udržateľnosti.

Periodická tabuľka pasívnej úpravy



Obrázek 1: Možnosti pasívneho čistenia banských vôd pre jednotlivé prvky periodickej tabuľky.

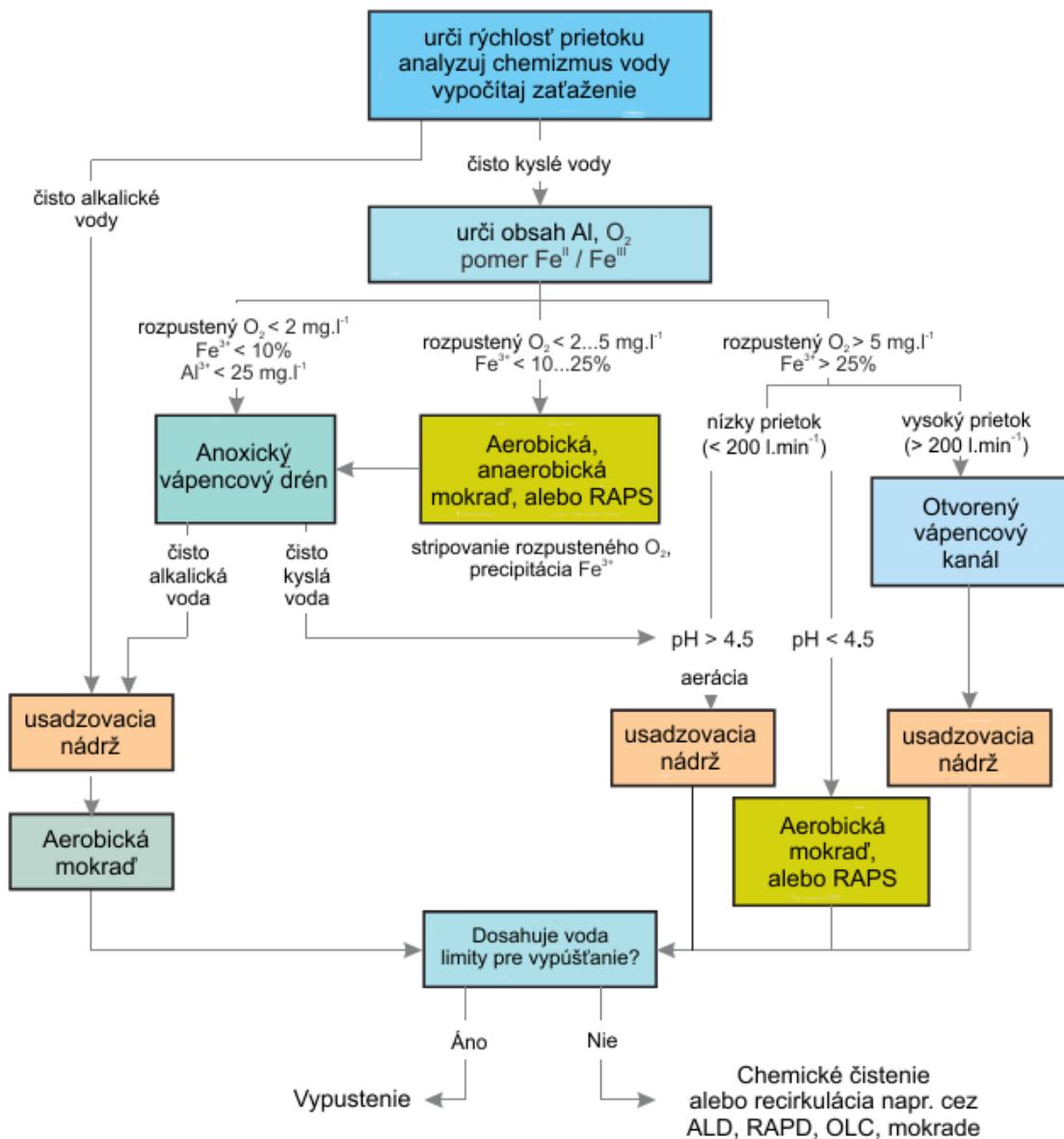
Základným chemickým princípom všetkých pasívnych systémov odstraňovania železa z banských vód je aeróbny proces, kde rozpustené dvojmocné železo je oxidáciou a hydrolízou prevedené na nerozpustný trojmocný hydroxid, ktorý následne sedimentuje ako kal na dne nádrží:



Pasívna úprava banských vód sa úspešne dlhodobo používa napríklad pri čistení banských vód z uhoľného baníctva, kde kombinácia mokradí, oxidačných rybníkov a sedimentačných nádrží je veľmi efektívna, nenáročná na údržbu a prevádzkovo relatívne veľmi lacná. Obsah celkového železa vo vode ($\text{Fe} = 50 \text{ mg/l}$) sa vo všeobecnosti považujú sa rozhodovacie kritérium pre rôzne scenáre použitej technológie na čistenie vód, ako je znázornené v nasledujúcej tabuľke podľa Cavazza et al. (2008). Z nej vyplýva, že pri prietokoch do $3,1 \text{ l/s}$ ($\approx 50 \text{ gpm}$) a obsahoch železa do 25 mg/l je čistenie pomocou samotných sedimentačných bazénov veľmi ľahké a účinné. Pri vyšších obsahoch železa alebo prietokoch sú už nutné ďalšie opatrenia na zvýšenie účinnosti čistenia banských vód. Rôzne kaskády, gravitačné prepady a pasívne turbulentné aeračné techniky sú potom nutné pre zvýšenie okysličovania banskej vody, kde samotná oxidácia na povrchu sedimentačnej nádrže nie je postačujúca. V prípadoch, kedy koncentrácie železa sú vyššie ako 50 mg/l je potom vyžadované ďalšie modelovanie a pokusné experimenty pre výhodnotenie, či pasívne systémy čistenia banských vód budú vôbec postačovať na priateľné zníženie obsahu Fe na výтокu zo zariadenia.

Je zrejme, že neexistuje univerzálny postup pre všetky lokality opustených banských diel. Pre každú lokalitu musí byť individuálne posúdená možnosť úpravy a čistenia banských vód na základe lokálnych faktorov ako sú prietok banskej vody na ústi zo štôlne, koncentrácie železa a prípade ďalších prvkov, cieľová koncentrácie železa na vyústení do recipienta, topografické možnosti lokality, investičné a prevádzkové náklady na technologické vybavenie ako aj požadovaná doba životnosti systému a jeho udržateľnosť. Z týchto poznatkov vyplývajú vo všeobecnosti pre pasívne čistenie alkalických banských vód nasledujúce skutočnosti, ktoré sú nižšie znázornené aj v rozhodovacom diagrame podľa PIRAMID:

- aeróbne mokrade sa použijú pre nízke obsahy Fe v banskej vode
- sedimentačné nádrže sa použijú, ak je vysoký obsah železa vo vode a požiadavka na vypúštanú vodu nie je prísnejšia ako 5 mg/l celkového Fe
- kombinácia oboch technológií sa použije pre vysoké obsahy Fe a prísne limity pre vypúštanú vodu
- pre veľmi vysoké obsahy Fe (nad 50 mg/l) je nevyhnutné predradiť pred sedimentačné nádrže aeróbne kaskády alebo iný spôsob dostatočného prekysličenia pritekajúcej banskej vody.



Obrázek 2: Rozhodovací diagram pre pasívnu úpravu banských vód (zdroj Skousen [2]).

4 Technologické možnosti pasívnej úpravy banských vód

4.1 Prevzdušňovacie fontány

Predstavujú bodový prvk na prevzdušňovanie banskej vody zvyčajne až priamo v sedimentačnej nádrži. Kedže pri pasívnej úprave nie je možné využiť klasické elektrické čerpadla, môže sa využívať na tlak vody len gravitačný spád medzi prítokom do sedimentačnej nádrže a jej hladinou. Ďalšou nevýhodou je častá potreba čistenia z dôvodu inkrustácie a komplikovaná dostupnosť uprostred nádrže. Výhodou je naopak minimálna investičná nákladovosť tohto zariadenia a relatívne dobrá účinnosť (v závislosti od gravitačného spádu).



Obrázek 3: Príklady aeračných fontán na prekysličenie vôd.

4.2 Gravitačná kaskáda

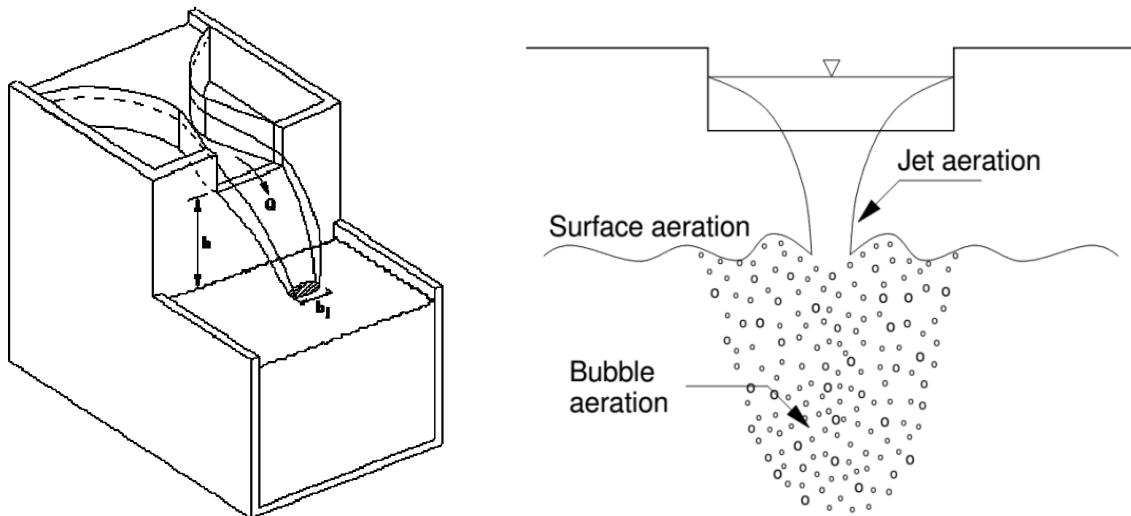
predstavuje líniový prvok prevzdušňovania. Potrebuje väčšiu plochu ako fontána, je však zvyčajne účinnejšia, aj keď finančne náročnejšia (podľa materiálu). Ako už bolo v predchádzajúcej kapitole uvedené, jedným z najdôležitejších faktorov na prechod rozpusteného železa do ne rozpustnej formy je pridávanie vzdušného kyslíka do banskéj vody. Pri pasívnych systémoch úpravy banských vôd sa môže využiť len gravitačná sila t.j. nejaká forma kaskády alebo výškového skoku na toku vody. Napriek zdanlivej jednoduchosti tohto systému (stačí malá hrádzka z kameňov) stále sa vylepšuje účinnosť týchto zariadení novými postupmi a výpočtami. Jeden z najrozšírenejších prístupov je návrh prepadovej kaskády, kde dôjde k rozdeleniu toku do tenkej vrstvy vody, aby vzdušný kyslík mal prístup k čo najväčšej ploche hladiny a rozhranie vzduch/voda bolo čo najviac maximalizované. Prepad je buď obdlžníkový (pri vyšších prietokoch) alebo kruhový s kolmou horizontálnou plochou vo forme kačacieho zobáku (pre malé prietoky) na čo najväčšie rozptýlenie dopadajúcej vody. Všeobecné odporúčanie je 100 mm šírky kaskády na každý 1 L/s pretekajúcej vody, pričom typicky sa inštaluje štyri až šesť stupňov, výška každého stupňa by mala byť medzi 500 – 800 mm. Teoreticky ba mala takáto kaskáda oxidovať až 50 mg/l železa, realistickejšie odhady uvádzajú 30 mg/l. Napriek jednoduchosti riešenia však účinnosť tohto systému môže byť znížená pri malých prietokoch alebo nedostatočnej výške prepadu, ako vidno na obrázku vpravo.





Obrázek 4: Gravitačná kaskáda na prevzdušnenie.

Novšie matematické výpočty preukázali, že efektívnejší prenos kyslíka do vody je pri maximizácii počtu malých vzduchových bublín. Rovnaký objem vzduchových bublín pri menšom priemere bublinky má výrazne vyššiu plochu a tým aj rozhranie vzduch/voda sa zväčší a prenos kyslíka je účinnejší. Tiež sa zistilo, že úprava kaskády tak, aby sa dopadajúca voda a vznikajúce bublinky vzduchu mohli symetricky rozptýliť okolo dopadiska pod hladinou zvyšuje účinnosť prevzdušnenia. Preto dopad na plytkú hladinu resp. až priamo na pevné dno je z hľadiska účinnosti prevzdušňovania nevhodný. Minimálna hĺbka hladiny v mieste dopadu vody z kaskády by sa mala rovnať výške kaskády, ako je znázornené na obrázku vedľa. Optimálny uhol odpadu vody na hladinu je 45, kedy sa dosahuje najmä pri vyšších prietokoch výraznejšiu efektívnosť prevzdušnenia ako pri kolmom dopade.



Obrázek 5: Princíp Venturiho prepádového žľabu podľa Muellera (2002).

4.3 Sedimentačná nádrž: zemná + HDPE / monolitický betón

Sedimentačné nádrže či bazény predstavujú základný prvok pri pasívnej úprave alkalických banských vôd, kde hlavným dôvodom čistenia je odstránenie železa (a mangánu). Aj keď aeróbne mokrade s vhodnou vegetáciou poskytujú o niečo lepšie výsledky, čistenie takýchto mokradí od kalov je oveľa náročnejšie ako klasických sedimentačných nádrží. Pri obsahu železa viac ako 5 mg/l sú sedimentačné nádrže nevyhnutnosťou, mokrade nemajú dostatočnú účinnosť. Preto sú sedimentačné bazény oveľa rozšírenejšie a častejšie sa využívajú v praxi pri čistení banských vôd.

5 Záver

Neexistuje zatiaľ jednotná metodika a centrálna databáza sanačných a remediačných postupov pre čistenie a úpravu banských vôd z opustených ložísk. Každá krajina, ktorej sa tento problém bytostne týka (severoamerické uhoľné bane, juhoafrické a austráliske rudné ložiska, opustené banské lokality v EU) rieši problematiku viac menej vlastnou metodikou. Veľmi by preto pomohla centralizovaná databáza štandardizovaných postupov a údajov o všetkých možnostiach nakladania s AMD, bez ohľadu na spôsob financovania či úroveň riadenie (štátne či súkromné). To by predstavovalo obrovskú pomoc pri rozhodovaní o voľbe čistenia a úpravy banských vôd pre nové lokality. Tieto databázové údaje a dáta by potom mohli byť vhodným podkladom pre projektantov a technológov pri výbere účinnej metódy čistenia a úpravy vôd, založenej na tom, čo úspešne funguje v podobných podmienkach v zahraničí.

Pre ďalšie projekčné práce spojené s návrhom vhodnej technológie budú potrebné podrobnejšie režimové merania a hydrogeologické štúdie stanovenia závislosti zloženia banských a drenážnych vôd so zrážkami. Presné údaje o prietoku totiž podstatným spôsobom ovplyvňujú veľkosť sedimentačných bazénov pri konštantnej dobe zdržania. Koncentrácie Fe a Mn zase výrazne ovplyvňujú množstvo vznikajúcich kalov a tým aj celé kalové hospodárstvo a intervaly čistenia nádrží vrátane vyvolaných nákladov. Veľmi dôležitou súčasťou pred - projektovej prípravy a výberu vhodnej technológie by mal byť aj poloprevádzkové skúšky s dostatočným časovým predstihom navrhovaných technologických zostáv pasívneho čistenia banských a drenážnych vôd. Len skutočným overením a reálnymi výsledkami pokusov je možné dokladovať vhodnosť, účinnosť a efektívnosť danej technológie pre konkrétnu lokalitu.

Literatura

- [1] JONES, D.; FAWCETT, M.: Technologies for Environmental Advancement of Mining in the Northern Territory. 2004, northern Territory Minerals Council (Inc.) and the Mines and Petroleum Management Division of the Northern Territory Government.
- [2] SKOUSEN, J.; ZIEMKIEWICZ, P.: Performance of 116 Passive Treatment Systems for Acid Mine Drainage, National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation Breckenridge, CO. 2005.
- [3] SMITH, M.; ATHANASSOPOULOS, C.: Evaluations of engineered cover systems for mine waste rock and tailings. 2013, geosynthetics magazine's 6-7/2013.