

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ  
ΤΜΗΜΑ: ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ  
ΟΞΙΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ (ΟΑΜ)**

Μεταπτυχιακή Εργασία  
**Δ.Π.Μ.Σ. «ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ»**

**ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ &  
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

Από  
**ΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ ΚΑΙ ΤΟ ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**Επιβλέποντες**

- 1) Φ. Μπατζιάς**  
Καθηγητής Τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας,  
Πανεπιστήμιο Πειραιώς
- 2) Χρ. Σιοντόρου**  
Λέκτορας Τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας,  
Πανεπιστήμιο Πειραιώς

**ΠΑΣΙΑΛΛΑΚΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ**

**ΑΘΗΝΑ, 2012**

## Περίληψη εργασίας

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του ΔΠΜΣ «Οργάνωση και Διοίκηση Βιομηχανικών Συστημάτων» με ειδίκευση στην κατεύθυνση «Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος».

Κύριος στόχος της εργασίας ήταν να συγκριθούν οι υπάρχουσες μέθοδοι επί τόπου (*in situ*) αντιμετώπισης της Ώξινης Απορροής Μεταλλείων (Ο.Α.Μ.). Η σύγκριση αυτή πραγματοποιήθηκε σε μεθόδους που εφαρμόστηκαν σε πιλοτική βάση (*pilot scale implementation*), με βάση συγκεκριμένα κριτήρια τα οποία αφορούν τεχνολογικές (αξιοπιστία μεθόδου, ωριμότητα τεχνολογίας, αποδοτικότητα μεθόδου κ.τ.λ.), οικονομικές (π.χ. σταθερό κόστος, λειτουργικό κόστος, κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου) και περιβαλλοντικές παραμέτρους (π.χ. διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων, δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου).

## Πρόλογος

Επιθυμώ να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς την Ειδική Διατμηματική Επιτροπή του Μεταπτυχιακού Προγράμματος στην «ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ» η οποία μου έδωσε την δυνατότητα να ολοκληρώσω αυτό το ΔΠΜΣ.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Ομότιμο καθηγητή κ. Μπατζιά Φραγκίσκο του Τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς για την ουσιαστική στήριξη του ώστε να περατωθεί αυτή η εργασία.

Ιδιαίτερος όμως αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω την Λέκτορα του Τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς την κα. Σιοντόρου Χριστίνα η οποία δέχθηκε να επιβαρύνει το ήδη φορτωμένο πρόγραμμά της με την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας. Την ευχαριστώ κυρίως για την κατανόηση που επέδειξε στο πρόβλημα του μειωμένου διαθέσιμου χρόνου από μέρους μου αλλά και για την ουσιαστική βοήθεια που μου προσέφερε στη συγγραφή της παρούσης εργασίας. Τέλος την ευχαριστώ θερμά για την ηθική στήριξη που μου προσέφερε όταν η κατάσταση είχε φτάσει προ αδιεξόδου και για το ειλικρινές ενδιαφέρον που επέδειξε και με βοήθησε να αξιολογήσω πιο σωστά και να αντιμετωπίσω με ψυχραιμία ορισμένα προσωπικά προβλήματα.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

	<b>Σελ.</b>
<b>Περίληψη εργασίας</b>	<b>2</b>
<b>Πρόλογος</b>	<b>3</b>
<b>Περιεχόμενα</b>	<b>4</b>
<b>Κατάλογος εικόνων</b>	<b>10</b>
<b>Κατάλογος πινάκων</b>	<b>10</b>
<b>Κατάλογος σχημάτων</b>	<b>12</b>
<b>Εισαγωγή</b>	<b>15</b>

## **Κεφάλαιο 1**

<b>ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΞΙΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ (ΟΑΜ)</b>	<b>17</b>
--	-----------

## **Κεφάλαιο 2**

<b>ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΟΞΙΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ</b>	<b>19</b>
2.1. Αντιδράσεις Οξειδωσης – Δημιουργίας Οξύτητας	19
2.2. Αντιδράσεις Εξουδετέρωσης	22
2.3. Ο Ρόλος των Βακτηρίων	23
2.4. Στάδια Δημιουργίας και Μετανάστευση της ΟΑΜ	23
2.5 Φαινόμενα κατά μήκος των οδών μεταφοράς της ΟΑΜ	25

## **Κεφάλαιο 3**

<b>ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΟΞΙΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ</b>	<b>28</b>
3.1 Γενικά	28
3.2 Προληπτικές Μέθοδοι	28
3.2.1. Τεχνική ταχείας ξήρανσης – υπαέρια απόθεση (sub-aerial disposal)	30
3.2.2. Τεχνική διατήρησης υπερκείμενου υδατικού καλύμματος (sub-aqueous disposal)	30
3.3 Μέθοδοι Περιορισμού	31
3.4 Διορθωτικές Μέθοδοι Επέμβασης	32
3.4.1 Ενεργητικές μέθοδοι	33
3.4.2 Παθητικά συστήματα	39
3.4.2.1 Τεχνητοί υγρότοποι (constructed wetlands)	42
3.4.2.2. Μηχανισμοί Απομάκρυνσης Ρυπαντών σε τεχνητούς υγρότοπους	44
3.4.2.3. Σχεδιασμός Τεχνητών Υγροτόπων	46
3.4.2.4. Επιλογή, Μέγεθος και Απόδοση Τεχνητών Υγροτόπων	49

## **Κεφάλαιο 4**

<b>ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ</b>	<b>50</b>
4.1 Κριτήρια σύγκρισης βέλτιστης τεχνολογίας αντιμετώπισης της ΟΑΜ	50
4.1.1 Τεχνολογικά κριτήρια	50
4.1.2 Οικονομικά κριτήρια	51

<b>4.1.3 Περιβαλλοντικά κριτήρια</b>	<b>52</b>
--------------------------------------	-----------

## **Κεφάλαιο 5**

<b>Αναλυτική παρουσίαση περιπτώσεων μελέτης (case studies)</b>	<b>54</b>
--	-----------

### **5.1 Μέθοδος SRB αντιδραστήρων**

#### **Case study 1**

<b>Wheal Jane Pilot Passive Treatment Plant</b>	<b>54</b>
---	-----------

#### **Case study 2**

<b>Βιοαντιδραστήρας στο Doe Run West Fork ενεργό ορυχείο εξόρυξης Pb και Zn</b>	<b>57</b>
---	-----------

#### **Case study 3**

<b>Επί τόπου βιοαντιδραστήρας στο εγκαταλελειμένο ορυχείο Lilly Orphan Boy</b>	<b>59</b>
--	-----------

#### **Case study 4**

<b>Βιοαντιδραστήρας στο εγκαταλελειμένο μεταλλείο Surething</b>	<b>62</b>
---	-----------

#### **Case study 5**

<b>Compost-Free βιοαντιδραστήρας στο εγκαταλελειμένο ορυχείο Leviathan</b>	<b>64</b>
--	-----------

### **5.2 Μέθοδος Ενεργών Διαπερατών Φραγμάτων (Permeable Reactive Barriers, PRB)**

#### **Case study 1**

<b>PRB in Vapokon on Funen Island, Denmark</b>	<b>77</b>
--	-----------

#### **Case study 2**

<b>PRB in Northumberland, UK</b>	<b>80</b>
----------------------------------	-----------

#### **Case study 3**

<b>PRB in Aznalcollar (Sw Spain)</b>	<b>83</b>
--------------------------------------	-----------

#### **Case study 4**

<b>PRB in Vancouver, Kanada</b>	<b>87</b>
---------------------------------	-----------

#### **Case study 5**

<b>PRB in Synthesia Pardubice in Bohemia, Τσεχία</b>	<b>90</b>
--	-----------

### **5.3 ANAEROBIOI YΓPOTOΠIOI (ANAEROBIC WETLANDS)**

#### **Case study 1**

**ANAEROBIC WETLAND in Durham, UK 102**

#### **Case study 2**

**ANAEROBIC WETLAND in Galicia, Northwest Spain 107**

#### **Case study 3**

**ANAEROBIC WETLAND in Siantiago de Compostela, NW SPAIN 110**

#### **Case study 4**

**ANAEROBIC WETLAND in Hohe Warte, German 113**

### **5.4 AEROBIOI YΓPOTOΠIOI (AEROBIC WETLANDS)**

#### **Case study 1**

**AEROBIC WETLAND in Bitterfed/Wolfen, Germany 124**

#### **Case study 2**

**AEROBIC WETLAND in Safira, Germany 126**

#### **Case study 3**

**AEROBIC WETLAND in Amfilochia, Western Greece 128**

#### **Case study 4**

**AEROBIC WETLAND in Glaslough, Monaghan, Ireland 133**

#### **Case study 5**

**AEROBIC WETLAND in Polk Country, Central Florida 136**

### **5.5 ANOΞΙΚΕΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΕΣ ΤΑΦΡΟΙ (Anoxic Limestone Drains, ALD)**

#### **CASE STUDY 1**

**ALD IN Mina Esperanza (SW Spain) 149**

#### **Case study 2**

**ALD in Huelva, SW Spain 153**

#### **Case study 3**

**ALD in ALD in Monte Romero mine, SW Spain 156**

#### **Case study 4**

**ALD in Alabama, USA 159**

**Κεφάλαιο 6**

**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

**171**

**Βιβλιογραφία**

**187**

Πανεπιστήμιο Πειραιώς



Πανεπιστήμιο Πειραιώς

<b>Κατάλογος εικόνων</b>	<b>Σελ.</b>
<b>Εικόνα 1:</b> Όξινη απορροή μεταλλείων.	17
<b>Εικόνα 2:</b> Εγκαταλελειμμένο μεταλλείο στο Maryland των ΗΠΑ.	18
<b>Εικόνα 3:</b> ΟΑΜ που δημιουργήθηκε σε ένα εγκαταλελειμμένο αναθρακορυχείο.	20
<b>Εικόνα 4:</b> Βακτήρια του γένους <i>Thiobacillus</i> .	25
<b>Εικόνα 5:</b> Μεταφορά ΟΑΜ διαμέσου αντλιών από την κοίτη ενός ποταμού στο εργοστάσιο που έχει εγκατασταθεί για την επεξεργασία της.	33
<b>Εικόνα 6:</b> Έξοδος των νερών από το μεταλλείο Hohe Warte.	114
<b>Εικόνα 7:</b> Α: στρώματα Fe. Β: λεπτομέρεια από στρώματα Fe που βρίσκονται πολύ κοντά στο ορυχείο. C: γενική εικόνα της δεξαμενής NFOL.	157

<b>Κατάλογος πινάκων</b>	<b>Σελ.</b>
<b>Πίνακας 1:</b> Συγκεντρωτικός πίνακας των χαρακτηριστικών της εισερχόμενης και της εξερχόμενης απορροής Surething στη Montana.	62
<b>Πίνακας 2:</b> Χημική ανάλυση εισερχόμενης και εξερχόμενης απορροής στο ορυχείο Leviathan κοντά στο Markleeville στην Καλιφόρνια σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο λειτουργίας.	67
<b>Πίνακας 3:</b> Χημική ανάλυση εισερχόμενης και εξερχόμενης απορροής κατά την λειτουργία της μεθόδου στο ορυχείο Leviathan κοντά στο Markleeville στην Καλιφόρνια σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο λειτουργίας.	67
<b>Πίνακας 4:</b> Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο SRB.	70
<b>Πίνακας 5:</b> Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα οικονομικά κριτήρια για τη μέθοδο SRB.	74
<b>Πίνακας 6:</b> Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο SRB.	75
<b>Πίνακας 7:</b> Σύσταση ενεργού υλικού σε κάθε ΕΔΦ.	85

## Κατάλογος πινάκων (συνέχεια)

Σελ.

<b>Πίνακας 8:</b> Συγκεντρώσεις σε δύο σημεία παρακολούθησης: στην είσοδο (σημείο ML-2) και στην έξοδο (σημείο ML-10) στο κατώτερο από τα δύο τμήματα του ΕΔΦ.	89
<b>Πίνακας 9:</b> Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ΕΔΦ.	94
<b>Πίνακας 10:</b> Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα οικονομικά κριτήρια για τη μέθοδο ΕΔΦ.	98
<b>Πίνακας 11:</b> Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο ΕΔΦ.	99
<b>Πίνακας 12:</b> Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΝΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ.	117
<b>Πίνακας 13:</b> Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα οικονομικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΝΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ.	121
<b>Πίνακας 14:</b> Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΝΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ.	122
<b>Πίνακας 15:</b> Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ.	139
<b>Πίνακας 16:</b> Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα οικονομικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ.	145
<b>Πίνακας 17:</b> Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ.	146
<b>Πίνακας 18:</b> Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ALD.	163
<b>Πίνακας 19:</b> Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα οικονομικά κριτήρια για τη μέθοδο ALD.	167
<b>Πίνακας 20:</b> Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο ALD.	168
<b>Πίνακας 21:</b> Συνοπτική παρουσίαση όλων των case studies της μεθόδου SRB ως προς όλα τα κριτήρια.	175

<b>Κατάλογος πινάκων (συνέχεια)</b>	<b>Σελ.</b>
<b>Πίνακας 22:</b> Συνοπτική παρουσίαση όλων των case studies της μεθόδου ΕΔΦ ως προς όλα τα κριτήρια.	177
<b>Πίνακας 23:</b> Συνοπτική παρουσίαση όλων των case studies της μεθόδου των αναερόβιων υγροβιότοπων ως προς όλα τα κριτήρια.	179
<b>Πίνακας 24:</b> Συνοπτική παρουσίαση όλων των case studies της μεθόδου των αερόβιων υγροβιότοπων ως προς όλα τα κριτήρια.	181
<b>Πίνακας 25:</b> Συνοπτική παρουσίαση όλων των case studies της μεθόδου των ανοξικών ασβεστολιθικών τάφρων (ALD) ως προς όλα τα κριτήρια.	183
<b>Πίνακας 26:</b> Συνοπτική παρουσίαση όλων των μεθόδων ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια.	186
<b>Πίνακας 27:</b> Συνοπτική παρουσίαση όλων των μεθόδων ως προς τα οικονομικά κριτήρια.	186
<b>Πίνακας 28:</b> Συνοπτική παρουσίαση όλων των μεθόδων ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια.	186

<b>Κατάλογος σχημάτων</b>	<b>Σελ.</b>
<b>Σχήμα 1:</b> Μετανάστευση της ΟΑΜ στο περιβάλλον.	26
<b>Σχήμα 2:</b> Καταβύθιση μετάλλων υπό τη μορφή υδροξειδίων συναρτήσει του pH.	26
<b>Σχήμα 3:</b> Κατανομή ρύπων σε υδρόρευμα.	27
<b>Σχήμα 4:</b> Διαλυτότητα των θειούχων ενώσεων συναρτήσει του pH με $[HS^-]=10^{-2}M$ .	36
<b>Σχήμα 5:</b> Διάγραμμα ροής μιας μεθόδου εξουδετέρωσης της ΟΑΜ με υδράσβεστο ( $Ca(OH)_2$ ).	38
<b>Σχήμα 6:</b> Βασικό σχέδιο δημιουργίας ενός παθητικού συστήματος πεξεργασίας ΟΑΜ.	41
<b>Σχήμα 7:</b> Διάγραμμα ροής για την επιλογή κατάλληλου παθητικού συστήματος επεξεργασίας «καθαρά» αλκαλικής απορροής δηλ. απορροής που έχει υποστεί προεπεξεργασία.	42
<b>Σχήμα 8:</b> Σχηματική αναπαράσταση αερόβιου υγρότοπου.	47

<b>Κατάλογος σχημάτων (συνέχεια)</b>	<b>Σελ.</b>
<b>Σχήμα 9:</b> Σχηματική αναπαράσταση ανααερόβιου υγρότοπου.	48
<b>Σχήμα 10:</b> Σχηματική αναπαράσταση Ανοξικής Ασβεστολιθικής Τάφρου.	48
<b>Σχήμα 11:</b> Συνοπτική καταγραφή των κριτηρίων αξιολόγησης μεθόδων επί τόπου επεξεργασίας Όξινης Απορροής Μεταλλείων.	53
<b>Σχήμα 12:</b> Παθητικό σύστημα επεξεργασίας OAM που εφαρμόστηκε στο ορυχείο Wheal Jane, στο Carnon Valley, Cornwall, UK.	55
<b>Σχήμα 13:</b> Παθητικό σύστημα επεξεργασίας OAM που εφαρμόστηκε στο ορυχείο Doe Run West Fork ενεργό ορυχείο στην περιοχή Reynolds στο Missouri.	58
<b>Σχήμα 14:</b> Παθητικό σύστημα επεξεργασίας OAM που εφαρμόστηκε στο Ορυχείο Lilly Orphan Boy που βρίσκεται στην περιοχή Montana.	60
<b>Σχήμα 15:</b> Διάγραμμα ροής σε ένα Compost-Free Παθητικό σύστημα επεξεργασίας OAM που λειτούργησε με τη μέθοδο της επανατροφοδότησης και εφαρμόστηκε στο ορυχείο Leviathan που βρίσκεται κοντά στο Markleeville στην Καλιφόρνια (δίπλα στα βουνά της Sierra Nevada).	66
<b>Σχήμα 16:</b> Ενεργό διαπερατό φράγμα τύπου «funnel-and-gate».	77
<b>Σχήμα 17:</b> Σχηματική αναπαράσταση του ΕΔΦ στο Varokon, Δανία.	78
<b>Σχήμα 18:</b> Σχηματική απεικόνιση τόσο του συνολικού συστήματος (επάνω) όσο και του βιοαντιδραστήρα που χωρίζεται σε τρεις θαλάμους (κάτω σχεδιάγραμμα).	92
<b>Σχήμα 19:</b> Σχεδιάγραμμα του παθητικού συστήματος επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκε στο Durham.	104
<b>Σχήμα 20:</b> Καμπύλες συνολικής απομάκρυνσης των κυριότερων ρυπαντών κατά την διάρκεια των 5,5 χρόνων λειτουργίας του συστήματος.	105
<b>Σχήμα 21:</b> Σχηματικό διάγραμμα του παθητικού συστήματος. Το κάτω σχέδιο είναι η κάτοψη.	107
<b>Σχήμα 22:</b> Σχηματικό διάγραμμα του παθητικού συστήματος (κάτω παρουσιάζεται η πλάγια όψη).	110
<b>Σχήμα 23:</b> Σχηματικό διάγραμμα παθητικού συστήματος στο ορυχείο Hohe Warte.	113

<b>Κατάλογος σχημάτων (συνέχεια)</b>	<b>Σελ.</b>
<b>Σχήμα 24:</b> Σχηματική αναπαράσταση του προτεινόμενου παθητικού συστήματος για την κατεργασία των νερών από το μεταλλείο Hohe Warte.	116
<b>Σχήμα 25:</b> Σχεδιάγραμμα του παθητικού συστήματος στην Αμφιλοχία.	129
<b>Σχήμα 26:</b> Σχηματικό διάγραμμα εγκατεστημένου παθητικού συστήματος στο χωριό Glaslough που βρίσκεται στην Ιρλανδία.	133
<b>Σχήμα 27:</b> Σχηματικό διάγραμμα του παθητικού συστήματος στην περιοχή Polk, στην πολιτεία Φλόριντα των ΗΠΑ.	137
<b>Σχήμα 28:</b> Σχηματική απεικόνιση του παθητικού συστήματος κοντά στον ποταμό Odiel.	150
<b>Σχήμα 29:</b> Σχηματική αναπαράσταση ολόκληρου του παθητικού συστήματος (δεξαμενή DAS+δεξαμενές αερισμού).	153
<b>Σχήμα 30:</b> Γενικό σχεδιάγραμμα του παθητικού συστήματος στο Monte Romero.	156
<b>Σχήμα 31:</b> Γενικό σχεδιάγραμμα του παθητικού συστήματος στην πολιτεία Αλαμπάμα.	160

## Εισαγωγή

Ένα σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα που προκαλεί η μεταλλευτική και μεταλλουργική δραστηριότητα είναι το φαινόμενο της Όξινης Απορροής Μεταλλείων (OAM). Το φαινόμενο αυτό είναι το αποτέλεσμα της οξείδωσης των θειούχων μεταλλευμάτων και αποβλήτων, όταν αυτά εκτίθενται στη συνδυασμένη δράση του νερού και του οξυγόνου μετά την μεταλλευτική και μεταλλουργική κατεργασία τους.

Η οξείδωση των θειούχων μεταλλευμάτων, τα κυριότερα εκ των οποίων είναι ο σιδηροπυρίτης ( $\text{FeS}_2$ ), ο πυροσίτης ( $\text{FeS}$ ) και ο χαλκοπυρίτης ( $\text{CuFeS}_2$ ), λαμβάνει χώρα δια μέσου μιας σειράς αντιδράσεων που περιλαμβάνουν άμεσους, έμμεσους και βακτηριακά ελεγχόμενους μηχανισμούς<sup>[1,2]</sup>. Ο σιδηροπυρίτης είναι συνήθως το κυριότερο θειούχο ορυκτό το οποίο με την οξείδωσή του προκαλεί την παραγωγή των μεγαλύτερων ποσοτήτων όξινης απορροής. Η οξείδωση των άλλων θειούχων ορυκτών (τα οποία είναι θειούχες ενώσεις δισθενών μετάλλων όπως θειούχες ενώσεις του Fe, Zn, Cd, Pb, Cu, Ni) έχει ως κύριο αποτέλεσμα όχι τόσο την παραγωγή οξύτητας αλλά την καταβύθιση των μετάλλων αυτών με τη μορφή θειικών ενώσεων (π.χ.  $\text{PbSO}_4$ ) ή με τη μορφή υδροξειδίων (π.χ.  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ). Κατά αυτό τον τρόπο η όξινη απορροή που έχει προκύψει από την οξείδωση του σιδηροπυρίτη παρουσιάζει αυξημένη συγκέντρωση σε βαρέα μέταλλα<sup>[7]</sup>. Έτσι η OAM αποτελείται από διαλύματα (όξινα νερά) τα οποία μεταναστεύουν. Οι τελικοί αποδέκτες της OAM μπορεί να είναι είτε φυσικοί συλλέκτες νερού (π.χ. λίμνη, ρυάκι, ποταμός, θάλασσα, υπόγεια νερά) είτε το έδαφος. Συνέπεια όλων αυτών είναι να ρυπαίνονται τα ύδατα (επιφανειακά και υπόγεια) με υψηλά φορτία θειικών και μεταλλικών ιόντων και να μειώνεται σημαντικά η οξύτητα των νερών αυτών.

Καθίσταται λοιπόν επιτακτική η ανάγκη της αντιμετώπισης του φαινομένου της OAM η οποία επιτυγχάνεται, κυρίως, με τις εξής μεθόδους:

- Μέθοδοι πρόληψης της OAM
- Μέθοδοι περιορισμού της επέκτασης της OAM
- Μέθοδοι καταστολής της OAM

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην σύγκριση των υπάρχοντων τριτογενών διορθωτικών μεθόδων (δηλαδή μεθόδων καταστολής της OAM) που έχουν εφαρμοστεί σε πιλοτική κλίμακα.

Για τον σκοπό αυτό, στα τρία πρώτα κεφάλαια γίνεται θεωρητική αναφορά στο φαινόμενο της OAM. Συγκεκριμένα, εξετάζονται συνοπτικά οι φυσικοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη γένεση της OAM και έπειτα παρουσιάζονται θεωρητικά οι

τρόποι πρόληψης και αντιμετώπισης του φαινομένου. Στο τέταρτο κεφάλαιο ορίζονται και αναλύονται τα κριτήρια με βάση τα οποία συγκρίνονται μεταξύ τους οι εξειδικευμένες περιπτώσεις (case studies) αντιμετώπισης της ΟΑΜ που παρουσιάζονται για κάθε μέθοδο. Οι περιπτώσεις αυτές (που είναι πέντε για κάθε μέθοδο) παρουσιάζονται στο πέμπτο κεφάλαιο. Στο τέλος της αναλυτικής αναφοράς των περιπτώσεων κάθε μεθόδου υπάρχουν πίνακες στους οποίους παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα κριτήρια και το κατά πόσο η κάθε μέθοδος τα πληροί. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα.



# Κεφάλαιο 1

## ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΑΜ

Η όξινη απορροή μεταλλείων (ΟΑΜ) (βλ. εικόνα 1) είναι το αποτέλεσμα της οξειδωσης των θειούχων μεταλλευμάτων και αποβλήτων, όταν αυτά εκτίθενται στη συνδυασμένη δράση του νερού και του οξυγόνου. Θεωρείται το χειρότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα που προκαλείται από τις μεταλλευτικές δραστηριότητες εξόρυξης άνθρακα, λιγνίτη και πολυμεταλλικών θειούχων μεταλλευμάτων (γαληνίτης – PbS, σφαλερίτης – ZnS, αρσеноπυρίτης - FeAsS, σιδηροπυρίτης – FeS<sub>2</sub>, χαλκοπυρίτης – CuFeS<sub>2</sub> κ.λπ.).



Εικόνα 1: Όξινη απορροή μεταλλείων στην περιοχή West Rand.

Η δημιουργία της ΟΑΜ είναι το αποτέλεσμα μιας περίπλοκης σειράς χημικών αντιδράσεων που περιλαμβάνουν:

- Παραγωγή θειικού οξέος, εξαιτίας της οξειδωσης των θειούχων ορυκτών που περιέχονται στα μεταλλεύματα και στα στερεά απόβλητα από τη συνδυασμένη δράση οξυγόνου και νερού. Οι αντιδράσεις αυτές είναι αυτοκαταλυόμενες και η ταχύτητά τους επιταχύνεται από τη δράση τυχόν υπαρχόντων βακτηρίων.
- Εξουδετέρωση της παραγόμενης οξύτητας από ανθρακικά κυρίως ορυκτά. Οι αντιδράσεις αυτές προκαλούν την καταβύθιση γύψου, υδροξειδίων των μετάλλων, οξυ-

υδροξειδίων και άλλων ενώσεων. Εάν η ικανότητα ενός υλικού (δυναμικό εξουδετέρωσης) να εξουδετερώνει την παραγόμενη οξύτητα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της παραγωγής της, τότε η προκαλούμενη απορροή θα είναι αλκαλική ή ουδέτερη. Πάντως θεωρείται πιθανόν, ακόμη και στην περίπτωση αυτή, να παράγεται τοπικά όξινη απορροή από κάποια τμήματα ενός αποβλήτου ή στείρου εκμετάλλευσης, στα οποία υπερτερούν οι θειούχες ενώσεις.

Οι ρυθμοί των χημικών διεργασιών που οδηγούν στο σχηματισμό οξύτητας επηρεάζονται από φυσικούς, βιολογικούς και ορυκτολογικούς παράγοντες. Οι φυσικές παράμετροι περιλαμβάνουν το πορώδες και τη διαπερατότητα των ορυκτών, την αναλογία του μεγέθους του κόκκου προς την επιφάνεια του κόκκου, μετεωρολογικούς παράγοντες κ.τ.λ. Καθοριστικό παράγοντα του ολικού ρυθμού παραγωγής οξύτητας αποτελεί η παρουσία βακτηρίων, που καταλύουν τις αντιδράσεις οξείδωσης επιταχύνοντας το ρυθμό τους. Σημαντικοί επίσης είναι οι ορυκτολογικοί παράγοντες όπως: το είδος και η ποσότητα των θειούχων ορυκτών, η υφή και η μορφολογία τους, καθώς και το είδος και η περιεκτικότητα των ορυκτών που καταναλώνουν οξύτητα.



Εικόνα 2: Εγκαταλελειμμένο μεταλλείο στο Maryland των ΗΠΑ.

Κύριες πηγές της ΟΑΜ, οι οποίες συνήθως παραμένουν ενεργές για πολλές δεκαετίες μετά το πέρας λειτουργίας των αντίστοιχων μονάδων, είναι οι επιφανειακές και υπόγειες μεταλλευτικές δραστηριότητες (βλ. εικόνα 2), οι σωροί υπερκειμένων και στείρων και τα τέλματα εμπλουτισμού. Η ΟΑΜ χαρακτηρίζεται από χαμηλό pH (1,5-3,5) και υψηλές συγκεντρώσεις τοξικών ιόντων, με αποτέλεσμα να προκαλεί σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση, σε περίπτωση που έλθει σε επαφή με επιφανειακά και υπόγεια νερά ή με

εδάφη. Οι αντιδράσεις δημιουργίας της ΟΑΜ είναι αυτοκαταλυόμενες και συνεπώς, όταν αρχίσουν, είναι πολύ δύσκολο να ανασταλούν.

Από τους προαναφερθέντες αποδέκτες είναι δυνατόν να προκληθεί σημαντική επιβάρυνση της υγείας ανθρώπων και ζώων δια μέσου διαφόρων οδών έκθεσης στα τοξικά συστατικά, όπως βρώση, αναπνοή και δερματική επαφή ή διαμέσου κατανάλωσης νερών, αγροτικών προϊόντων και κρέατος.

Η εξάλειψη / μείωση των σοβαρών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, που προκαλούνται από την ΟΑΜ, μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών, οι οποίες κυρίως χαρακτηρίζονται ως τεχνικές πρόληψης και ως διορθωτικές τεχνικές επέμβασης. Οι τεχνικές πρόληψης<sup>[1]</sup> θεωρούνται προτιμότερες, γιατί αποτρέπουν την εμφάνιση του φαινομένου αποκλείοντας την επαφή των θειούχων ορυκτών με το οξυγόνο και το νερό. Οι σημαντικότερες από τις τεχνικές αυτές είναι η εφαρμογή υγρών, στερεών ή οργανικών καλυμμάτων. Οι τεχνικές εγκιβωτισμού των αποβλήτων στοχεύουν στην παρεμπόδιση της μεταφοράς της ΟΑΜ στο περιβάλλον.

Οι διορθωτικές τεχνικές επέμβασης<sup>[1]</sup> περιλαμβάνουν συλλογή και επεξεργασία της ΟΑΜ. Διακρίνονται σε ενεργητικές, οι οποίες περιλαμβάνουν κυρίως χημική εξουδετέρωση της ΟΑΜ σε κατάλληλες μονάδες, και παθητικές, οι οποίες περιλαμβάνουν κυρίως καθαρισμό της ΟΑΜ με κατάλληλη επεξεργασία της σε τεχνητούς υγροτόπους (constructed wetlands).

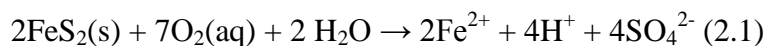
## **Κεφάλαιο 2**

### **ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΟΞΙΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ**

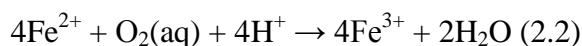
#### **2.1. Αντιδράσεις Οξείδωσης – Δημιουργίας Οξύτητας**

Η οξείδωση των θειούχων μεταλλευμάτων<sup>[2]</sup> λαμβάνει χώρα διά μέσου μιας σειράς αντιδράσεων που περιλαμβάνουν άμεσους, έμμεσους και βακτηριακά ελεγχόμενους μηχανισμούς. Μερικές αντιδράσεις οξείδωσης έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή οξύτητας, ενώ άλλες προκαλούν διαλυτοποίηση και κινητοποίηση των βαρέων μετάλλων. Ο σιδηροπυρίτης,  $FeS_2$ , είναι το βασικό ορυκτό, το οποίο προκαλεί την παραγωγή οξύτητας. Ο σιδηροπυρίτης θεωρείται συνήθως ως ένα σταθερό και αδιάλυτο ορυκτό, όταν δεν έρχεται σε επαφή με τον αέρα και το νερό. Εξαιτίας όμως της μεταλλευτικής δραστηριότητας εκτίθεται στους ανωτέρω παράγοντες και διαλυτοποιείται μερικώς.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, η οξείδωση του σιδηροπυρίτη (βλ. εικόνα 3) μπορεί να εκφραστεί από την αντίδραση (2.1):



Η αντίδραση αυτή παράγει οξύτητα. Εάν το δυναμικό οξείδωσης διατηρηθεί σε υψηλές τιμές, λαμβάνει χώρα οξείδωση του  $\text{Fe}^{2+}$  σε  $\text{Fe}^{3+}$  σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση (2.2):



Η οξείδωση του δισθενούς σιδήρου λαμβάνει χώρα, επίσης, απουσία οξυγόνου σε υψηλές τιμές pH και επιβραδύνεται, όταν το pH μειώνεται.

Σε  $\text{pH} < 3,5$  η αντίδραση (2.2) είναι ανεξάρτητη από το pH:

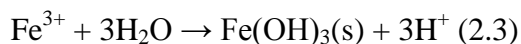
Σε περιοχές χαμηλού pH η ταχύτητα της αντίδρασης μπορεί να επιταχυνθεί κατά μερικές τάξεις μεγέθους λόγω της δράσης των βακτηρίων *Thiobacillus*.



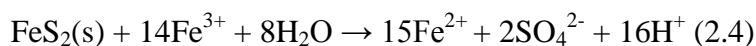
Εικόνα 3: ΟΑΜ που δημιουργήθηκε σε ένα εγκαταλελειμμένο ανθρακωρυχείο. Το πορτοκαλί χρώμα οφείλεται στον σίδηρο που έχει αρχίσει να ελευθερώνεται λόγω της οξείδωσης του σιδηροπυρίτη που λαμβάνει χώρα σύμφωνα με την αντίδραση 2.1.



Εάν το pH του προκύπτοντος διαλύματος είναι μεγαλύτερο από 3 (όπως στα αρχικά στάδια της αντίδρασης), τότε λαμβάνει χώρα υδρόλυση του τρισθενούς σιδήρου και καταβύθισή του ως υδροξείδιο με ταυτόχρονη παραγωγή οξύτητας.



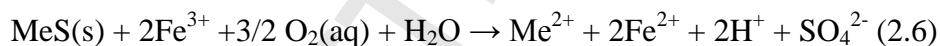
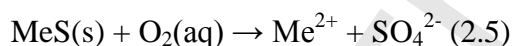
Επιπλέον, ο  $\text{Fe}^{3+}$  που παράγεται από την αντίδραση (2.2) θα οξειδώσει τον  $\text{FeS}_2$  σύμφωνα με την έμμεση αντίδραση



Ο προκύπτων δισθενής σίδηρος θα οξειδωθεί προς τρισθενή, σύμφωνα με την αντίδραση (2.2), με αποτέλεσμα να συνεχίζεται η οξείδωση του σιδηροπυρίτη (αυτοκαταλυόμενη αντίδραση).

Το διαλελυμένο στο νερό οξυγόνο,  $\text{O}_2(\text{aq})$ , δρα ως οξειδωτικό μέσο για τις αντιδράσεις (2.1) και (2.2). Με βάση αυτές τις αντιδράσεις, καθένα από τα άτομα του οξυγόνου ανάγεται από σθένος 0 σε σθένος  $-2$ , σχηματίζοντας  $\text{H}_2\text{O}$  ή  $\text{OH}^-$  σε όξινα ή βασικά διαλύματα αντίστοιχα.

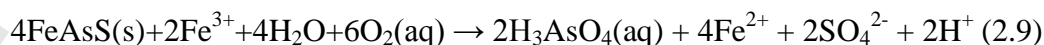
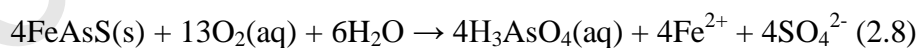
Όπως προαναφέρθηκε, το κυριότερο θειούχο ορυκτό, το οποίο με την οξείδωσή του προκαλεί την παραγωγή των μεγαλύτερων ποσοτήτων όξινης απορροής είναι ο σιδηροπυρίτης  $\text{FeS}_2$ . Τα άλλα θειούχα ορυκτά, τα οποία συνεισφέρουν στη δημιουργία ΟΑΜ, είναι τα θειούχα ορυκτά δισθενών μετάλλων ( $\text{MeS}$ , όπου  $\text{Me}$ : Fe, Zn, Cd, Pb, Cu, Ni), τα οποία οξειδώνονται έμμεσα ή άμεσα με τη δράση των ιόντων του τρισθενούς σιδήρου προς τα αντίστοιχα θειικά ιόντα:



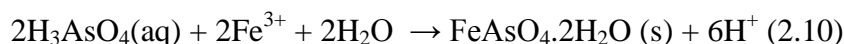
Οι παραπάνω αντιδράσεις δεν δημιουργούν οξύτητα (τα υδρογονοκατιόντα που παράγονται από την αντίδραση (2.6) καταναλώνονται σύμφωνα με την αντίδραση (2.2) και παράγουν  $\text{Fe}^{3+}$ ), εκτός και αν υδρολυθούν τα ιόντα  $\text{Me}^{2+}$ :



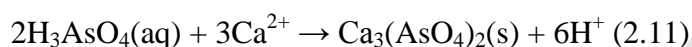
Η διαλυτότητα των ιόντων  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  και  $\text{Ni}^{2+}$  είναι υψηλή στην περιοχή pH 4,5 - 7, συνεπώς τα ιόντα αυτά δεν αναμένεται να υδρολυθούν σε μεγάλο βαθμό για να παράγουν οξύτητα. Συνεισφέρουν όμως σημαντικά στην αύξηση της συγκέντρωσης της προκύπτουσας απορροής σε βαρέα μέταλλα. Ο  $\text{Cu}^{2+}$  καταβυθίζεται ως  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  σε pH 5-6 παράγοντας οξύτητα, ενώ ο Pb θα σχηματίσει την αδιάλυτη ένωση  $\text{PbSO}_4$ . Ο αρσеноπυρίτης οξειδώνεται άμεσα ή έμμεσα ως εξής<sup>[21]</sup>:



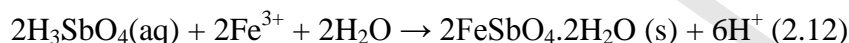
Σε όλες τις παραπάνω αντιδράσεις το διαλελυμένο αρσενικό θεωρείται ως μη διασπώμενο,  $\text{H}_3\text{AsO}_4(\text{aq})$ , όταν βρίσκεται στην πεντασθενή του κατάσταση. Μπορεί όμως να διαλυτοποιηθεί μερικώς σαν  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-(\text{aq})$ . Η άμεση ή έμμεση οξείδωση του αρσενοπυρίτη μπορεί να οδηγήσει σε σχηματισμό τρισθενούς αντί πεντασθενούς As στο διάλυμα,  $\text{HAsO}_2(\text{aq})$  ή  $\text{AsO}_2^-(\text{aq})$ . Η καταβύθιση του αρσενικού σιδήρου λαμβάνει χώρα σε  $\text{pH} > 3$  υπό μορφή  $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ή βασικού αρσενικινού σιδήρου,  $\text{FeAsO}_4 \cdot x\text{Fe}(\text{OH})_3$ :



Καταβύθιση αρσενικικών ενώσεων μπορεί να γίνει και με προσθήκη ιόντων ασβεστίου<sup>[2]</sup>:

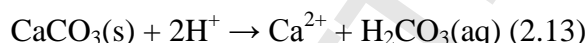


Τέλος, τα ιόντα του αντιμονίου καταβυθίζονται με όμοιες αντιδράσεις:

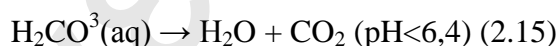


## 2.2. Αντιδράσεις Εξουδετέρωσης

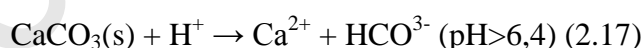
Τα κυριότερα ορυκτά, τα οποία μπορούν να καταναλώσουν την παραγόμενη οξύτητα, είναι τα ανθρακικά (ασβεστίτης, αραγωνίτης, δολομίτης, μαγνησίτης) και τα αλουμινοπυριτικά (ολιβίνης, πυρόξενος, μαρμαρυγίας, μίκα κ.λ.π). Όταν τα ορυκτά αυτά συνυπάρχουν με θειούχα ορυκτά, είναι δυνατόν να αντιδράσουν με τα παραγόμενα όξινα διαλύματα και να προκαλέσουν την εξουδετέρωσή τους. Για παράδειγμα, ο ασβεστίτης αντιδρά σύμφωνα με την παρακάτω τυπική αντίδραση:



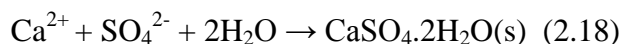
Το ασθενές και ασταθές ανθρακικό οξύ, που παράγεται από την αντίδραση (2.13), διασπάται σε  $\text{CO}_2(\text{aq})$  και ιόντα  $\text{HCO}_3^-$  και  $\text{CO}_3^{2-}$ . Η κατανομή των ιόντων αυτών εξαρτάται από το pH. Σε τιμές pH 7-10 συνήθως παράγεται  $\text{HCO}_3^-$ , ενώ σε pH μικρότερο του 6 παράγεται  $\text{CO}_2$ . Συνεπώς, οι αντιδράσεις διάσπασης μπορούν να διατυπωθούν όπως στη συνέχεια<sup>[2]</sup>:



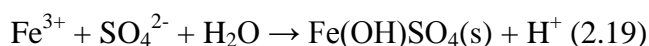
Εάν συνδυασθούν οι αντιδράσεις (2.13), (2.14) και (2.15), τότε θα προκύψουν οι καθαρές αντιδράσεις εξουδετέρωσης παρουσία  $\text{CaCO}_3$ :



Από τις αντιδράσεις αυτές αποδεικνύεται ότι απαιτείται διπλάσια ποσότητα ασβεστίτη για να εξουδετερωθεί ένα όξινο διάλυμα μέχρι τελικό pH>6,4, σε σχέση με την εξουδετέρωσή του έως την ελαφρώς αλκαλική περιοχή (pH<6,4). Γύψος καταβυθίζεται σύμφωνα με την αντίδραση:



Σε χαμηλό pH λαμβάνουν χώρα και άλλες αντιδράσεις καταβύθισης, οι οποίες οδηγούν στη δημιουργία βασικών θειϊκών ενώσεων ή ζαροσιτών<sup>[2]</sup>:



### 2.3. Ο Ρόλος των Βακτηρίων

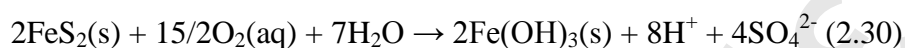
Οι μηχανισμοί οξειδωσης του σιδηροπυρίτη και των άλλων θειούχων ενώσεων παρουσία βακτηρίων θεωρούνται εξαιρετικά σημαντικοί σε περιοχές pH<4. Τα βακτήρια, που συμμετέχουν στην οξειδωση των ενώσεων αυτών, ανήκουν στα γένη *Thiobacillus* και *Leptospirillum*. Το γένος *Thiobacillus* περιλαμβάνει το είδος *Thiobacillus ferrooxidans* (*Th. ferrooxidans*), το οποίο συμμετέχει ενεργά στην οξειδωση των θειούχων ενώσεων. Το βακτήριο αυτό χαρακτηρίζεται ως αυτότροφο οξεόφιλο και είναι ικανό να οξειδώσει  $\text{Fe}^{2+}$ , S, σουλφίδια μετάλλων όπως και άλλες ανόργανες ενώσεις του θείου. Το είδος *Thiobacillus thiooxidans* (*Th. thiooxidans*) μπορεί να οξειδώσει στοιχειακό S και θειούχο S προς θειϊκά ιόντα, αλλά δεν μπορεί να οξειδώσει ιόντα  $\text{Fe}^{2+}$ . Το είδος *Leptospirillum ferrooxidans* συνυπάρχει με το είδος *Th. ferrooxidans*. Τα παραπάνω βακτήρια είναι ενεργά σε περιοχές pH 1,4-4 και θερμοκρασίας 5–35 °C, ενώ ως βέλτιστες συνθήκες ανάπτυξής τους θεωρούνται περιοχές pH πλησίον του 2 και θερμοκρασίας 30–35°C<sup>[2]</sup>.

Οι βακτηριακοί μηχανισμοί οξειδωσης των θειούχων ενώσεων περιλαμβάνουν άμεσες και έμμεσες αντιδράσεις. Οι άμεσες αντιδράσεις προϋποθέτουν φυσική επαφή μεταξύ των βακτηρίων και των θειούχων ενώσεων. Οι έμμεσες αντιδράσεις δεν απαιτούν φυσική επαφή, αλλά συμβάλλουν στην οξειδωση του  $\text{Fe}^{2+}$  προς  $\text{Fe}^{3+}$  στην υδατική φάση. Ο παραγόμενος  $\text{Fe}^{3+}$  συμμετέχει στη συνέχεια σε αντιδράσεις έμμεσης οξειδωσης των θειούχων ενώσεων και στην παραγωγή επιπλέον ιόντων  $\text{Fe}^{2+}$  και οξύτητας μέσω μιας επαναλαμβανόμενης κυκλικής διεργασίας.

### 2.4. Στάδια Δημιουργίας και Μετανάστευση της OAM

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η OAM δημιουργείται από μια σειρά πολύπλοκων και αλληλοεξαρτώμενων αντιδράσεων, οι οποίες λαμβάνουν χώρα με μηχανισμούς χημικής

και βακτηριακής οξείδωσης και εξαρτώνται<sup>[1]</sup> από το pH και το δυναμικό οξειδοαναγωγής. Οι μηχανισμοί αυτοί μπορεί να περιλαμβάνουν τα παρακάτω τρία στάδια: Κατά το πρώτο στάδιο<sup>[7]</sup>, που αρχίζει σε περίπου ουδέτερο pH και τελειώνει σε pH περίπου 4,5, λαμβάνουν χώρα οι αντιδράσεις (2.1) και (2.4), που αφορούν στην οξείδωση του σιδηροπυρίτη, και η αντίδραση (2.2), που αφορά στην οξείδωση του δισθενούς σιδήρου. Στην περιοχή αυτή του pH η διαλυτότητα του  $Fe^{3+}$  είναι περιορισμένη, με αποτέλεσμα να προκαλείται καταβύθιση υδροξειδίων του σιδήρου (αντίδραση 2.3). Συνεπώς, η συνολική αντίδραση οξείδωσης του σιδηροπυρίτη και δημιουργίας οξύτητας μπορεί να περιγραφεί ως εξής:



Εξαιτίας της περιορισμένης ύπαρξης ιόντων  $Fe^{3+}$ , οι έμμεσοι μηχανισμοί οξείδωσης στο στάδιο αυτό (π.χ. αντιδράσεις 2.4, 2.6 και 2.9) δεν θεωρούνται σημαντικοί. Εάν το ορυκτό περιέχει ανθρακικά ορυκτά, το παραγόμενο οξύ θα καταναλωθεί εν μέρει από τις αντιδράσεις εξουδετέρωσης που θα λάβουν χώρα. Όταν ελαττωθεί η περιεχόμενη αλκαλικότητα, το pH αναμένεται να μειωθεί. Ο ρυθμός μείωσης του pH επιβραδύνεται από τη μεγάλη μείωση της ταχύτητας της αντίδρασης (2.2).

Το δεύτερο στάδιο της δημιουργίας οξύτητας<sup>[7]</sup> αρχίζει από pH περίπου 4,5 και τελειώνει σε pH 2,5. Ενώ η οξείδωση του δισθενούς σιδήρου επιβραδύνεται κατά το τέλος του πρώτου σταδίου, η βακτηριακή οξείδωση επιταχύνεται εξαιτίας της συμμετοχής των βακτηρίων του είδους *Thiobacillus ferrooxidans* (βλ. εικόνα 4) και συνεπώς, οι αντιδράσεις (2.2) και (2.3) επιταχύνονται σημαντικά. Η οξείδωση του σιδηροπυρίτη σύμφωνα με την αντίδραση (2.1) λαμβάνει χώρα με άμεσους και έμμεσους μηχανισμούς. Σε pH μικρότερο του 3, η αυξημένη διαλυτότητα του  $Fe^{3+}$  μειώνει τον ρυθμό καταβύθισης υδροξειδίων (αντίδραση 2.3), με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ενεργότητα του  $Fe^{3+}$  στο διάλυμα και να επιταχύνεται η ταχύτητα των αντιδράσεων έμμεσης οξείδωσης (αντίδραση 2.4).

Το τρίτο στάδιο<sup>[2]</sup> αρχίζει σε pH περίπου 2,5, στο οποίο ουσιαστικά τερματίζονται οι αντιδράσεις καταβύθισης, όταν η ενεργότητα των ιόντων  $Fe^{3+}$  γίνεται σημαντική. Στην περίπτωση αυτή το κυριότερο οξειδωτικό μέσο, σύμφωνα με την αντίδραση οξείδωσης του πυρίτη (2.4), είναι ο  $Fe^{3+}$ . Η αντίδραση (2.2) λαμβάνει χώρα με ταχύτητα που καθορίζεται από την ενεργότητα των βακτηρίων του είδους *Th. ferrooxidans*. και αποτελεί το βραδύτερο στάδιο της αντίδρασης οξείδωσης του σιδηροπυρίτη. Επιπλέον, ο  $Fe^{3+}$  συμμετέχει στην οξείδωση των άλλων θειούχων ορυκτών (γαληνίτης, χαλκοσίτης, χαλκοπυρίτης, σφαλερίτης). Αν και αυτά τα ορυκτά δεν παράγουν οξύτητα με την



οξειδωσή τους, προκαλούν την απελευθέρωση ιόντων βαρέων μετάλλων και συνεπώς επιδεινώνουν τις οδυνηρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της OAM. Το συνολικό λοιπόν αποτέλεσμα του τρίτου σταδίου είναι η δημιουργία εξαιρετικά όξινων διαλυμάτων με  $\text{pH} < 2,5$ , τα οποία περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και θειϊκών ιόντων, ενώ επίσης χαρακτηρίζονται από μεγάλη οξύτητα και υψηλό λόγο συγκεντρώσεων  $[\text{Fe}^{3+}]/[\text{Fe}^{2+}]$ .



Εικόνα 4: Βακτήρια του γένους *Thiobacillus*.

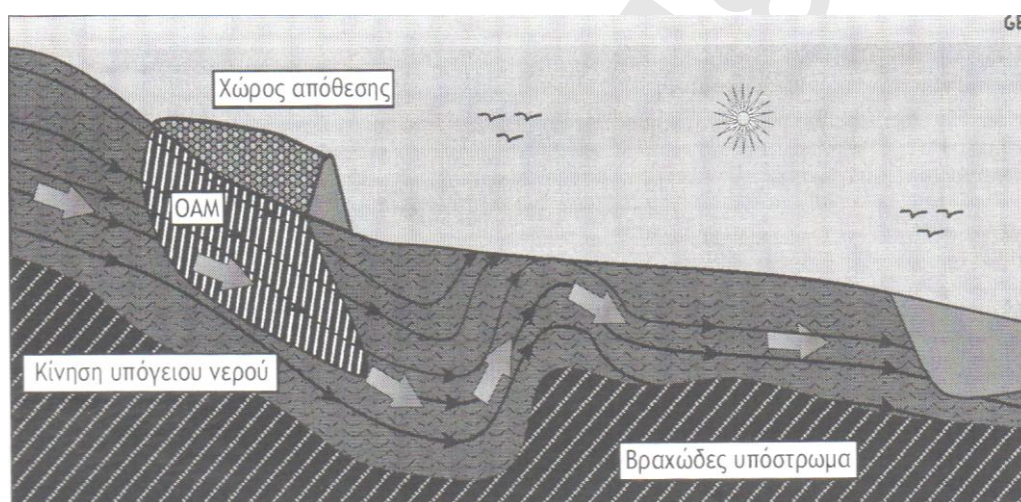
Προφανώς, η βακτηριακή οξείδωση, η οποία λαμβάνει χώρα κατά το δεύτερο και τρίτο στάδιο, θεωρείται εξαιρετικά σημαντική. Τα βακτήρια του είδους *Th. ferrooxidans* μπορούν θεωρητικά να επιταχύνουν την ταχύτητα της αντίδρασης (2.2) κατά ένα συντελεστή 106, αν και σε πραγματικά συστήματα η επιτάχυνση της ταχύτητας γίνεται μέχρι 5 φορές. Οι βακτηριακές αντιδράσεις της OAM καθιστούν τη συνολική κινητική του συστήματος εξαιρετικά πολύπλοκη, ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι στο εργαστήριο αναπαράγονται εξαιρετικά δύσκολα.

Κατά τη διάρκεια του τρίτου σταδίου, τόσο οι χημικοί όσο και οι βακτηριακοί μηχανισμοί, που προκαλούν την οξείδωση των θειούχων ορυκτών και την παραγωγή οξύτητας, καθίστανται αυτοκαταλυόμενοι. Συνεπώς, όταν το φαινόμενο της δημιουργίας OAM ξεκινήσει, είναι πολύ δύσκολο να ανασταλεί.

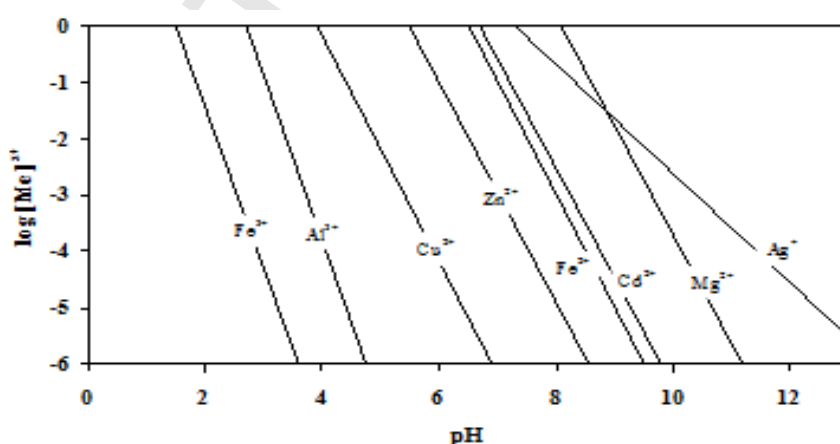
### 2.5 Φαινόμενα κατά μήκος των οδών μεταφοράς της OAM

Τα όξινα διαλύματα, τα οποία παράγονται στο μικροπεριβάλλον των κόκκων των θειούχων ορυκτών, σύντομα αρχίζουν να μεταναστεύουν. Βασικά, η έννοια της OAM αναφέρεται σε διαλύματα, τα οποία μεταναστεύουν από την πηγή παραγωγής τους (βλ. σχήμα 1) και στην πορεία τους συμμετέχουν σε ένα σημαντικό αριθμό αντιδράσεων με το

περιβάλλον οικοσύστημα. Ένα από τα αποτελέσματα, που προκαλούνται κατά τη διαδρομή των διαλυμάτων αυτών, είναι η αύξηση του pH εξαιτίας της αραιώσής τους, η οποία οφείλεται στην ανάμιξη με επιφανειακά και υπόγεια νερά ή σε αντιδράσεις εξουδετέρωσης, που λαμβάνουν χώρα, όταν η όξινη απορροή έλθει σε επαφή με αλκαλικά πετρώματα. Οι αντιδράσεις εξουδετέρωσης<sup>[1]</sup> οδηγούν στην καταβύθιση μιας σειράς ενώσεων, όπως γύψου (αντίδραση 2.18), υδροξειδίων των μετάλλων (βλ. σχήμα 2), όπως  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  και  $\text{Cd}(\text{OH})_2$ , καθώς και οξυυδροξειδίων,  $\text{FeOOH}$ , βασικών θειϊκών ενώσεων όπως ζαροσίτες (αντίδραση 2.19) και αρσενικικών αλάτων.



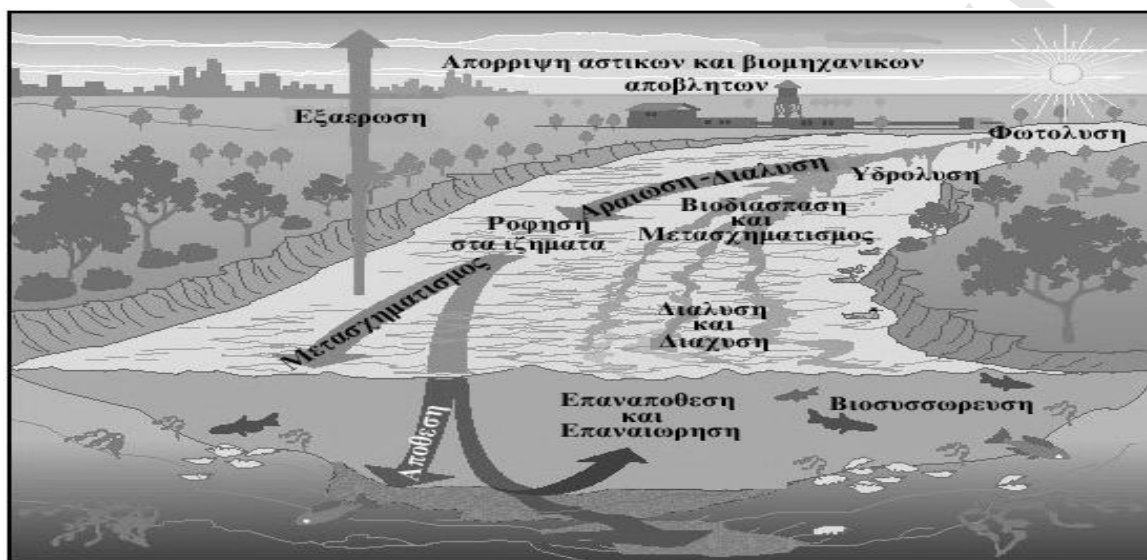
Σχήμα 1: Μετανάστευση της ΟΑΜ στο περιβάλλον.



Σχήμα 2<sup>[3]</sup>: Καταβύθιση μετάλλων υπό τη μορφή υδροξειδίων συναρτήσει του pH.

Εάν η αλκαλικότητα του συστήματος είναι σημαντική (αντίδραση 2.15), τότε λαμβάνει χώρα καταβύθιση βαρέων μετάλλων υπό μορφή ανθρακικών ενώσεων. Τα

προϊόντα καταβύθισης αποτίθενται εν μέρει κατά μήκος της διαδρομής των διαλυμάτων, ενώ εν μέρει μεταφέρονται ως διαλελυμένα στερεά προσδίδοντας χρωματισμό τόσο στα διαλύματα όσο και στα τοιχώματα των οδών μεταφοράς (βλ. σχήμα 3).



Σχήμα 3: Κατανομή ρύπων σε υδρόρευμα.<sup>1</sup>

Άλλα φαινόμενα, τα οποία παρατηρούνται κατά μήκος των οδών μεταφοράς των διαλυμάτων της OAM, είναι<sup>[1,2]</sup>:

- Προσρόφηση ιόντων βαρέων μετάλλων στην επιφάνεια των κόκκων διαφόρων αργιλικών ορυκτών των εδαφών και υδροξειδίων του σιδήρου ή ζαροσιτών, που παράγονται επί τόπου κατά την εξουδετέρωση των διαλυμάτων της OAM.
- Αντιδράσεις ιοντοεναλλαγής.
- Συμπλοκοποίηση των μετάλλων με οργανικές ενώσεις των εδαφών.
- Καταβύθιση αδιάλυτων θειούχων ενώσεων, όταν τα ελεύθερα ιόντα των διαλυμάτων έλθουν σε επαφή με ιόντα  $S^{2-}$ , τα οποία παράγονται από τη δράση θειοαναγωγικών βακτηρίων σε αναγωγικές συνθήκες.

Τέλος, τα όξινα διαλύματα, τα οποία παράγονται στους πόρους των αποβλήτων, μπορούν να μεταναστεύσουν προς την επιφάνεια εξαιτίας της ύπαρξης τριχοειδών φαινομένων. Στην περίπτωση εξάτμισης του νερού λαμβάνει χώρα καταβύθιση των περιεχομένων αλάτων στην επιφάνεια των αποβλήτων (υδροξείδια σιδήρου, ζαροσίτης, αλουμίτης, γύψος κ.λπ.).

<sup>1</sup> www.usgs.gov

## Κεφάλαιο 3

### ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΟΞΙΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

#### 3.1 Γενικά

Η φυσικοχημική συμπεριφορά της ΟΑΜ προσδιορίζει σε μεγάλο βαθμό τη στρατηγική που πρέπει να σχεδιαστεί και να εφαρμοσθεί για την καταπολέμησή της. Εάν, για παράδειγμα, ένας σωρός αποβλήτων σιδηροπυρίτη αρχίζει να παράγει όξινη απορροή σε μεγάλες ποσότητες, η μόνη λύση είναι η συλλογή και επεξεργασία της με σκοπό την απομάκρυνση των μεταλλικών ιόντων και την εξουδετέρωση της περιεχόμενης οξύτητας. Εναλλακτικά, τα απόβλητα μπορεί να απομονωθούν από το περιβάλλον, ώστε είτε να μην παράγεται απορροή είτε, εάν παράγεται, να μπορεί απομονωθούν από το περιβάλλον, ώστε είτε να μην παράγεται απορροή είτε, εάν παράγεται, να μπορεί να ελέγχεται.

Λαμβάνοντας δε υπόψη τις μεγάλες ποσότητες όξινης απορροής που μπορεί να παράγονται συνεχώς για πολλές δεκαετίες, εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι η συλλογή και επεξεργασία της είναι μια διαδικασία που χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά υψηλό κόστος. Αντίθετα, σε περιπτώσεις προγραμματισμού νέων εγκαταστάσεων διαχείρισης αποβλήτων προτιμάται η εφαρμογή τεχνικών πρόληψης της δημιουργίας ΟΑΜ.

- Οι μέθοδοι ελέγχου της ΟΑΜ μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες<sup>[1]</sup>:
- α) Πρωτογενείς ή προληπτικές μέθοδοι, που στοχεύουν στην πρόληψη της δημιουργίας ΟΑΜ.
  - β) Δευτερογενείς ή μέθοδοι απομόνωσης ή περιορισμού, που στοχεύουν στον περιορισμό της μετανάστευσης της ΟΑΜ προς το περιβάλλον.
  - γ) Τριτογενείς ή κατασταλτικές ή διορθωτικές μέθοδοι επέμβασης, που στοχεύουν στη συλλογή και επεξεργασία της ΟΑΜ

#### 3.2 Προληπτικές Μέθοδοι

Σκοπός των μεθόδων πρόληψης είναι η εξάλειψη ή η δραστική μείωση του ρυθμού δημιουργίας όξινων εκχυλισμάτων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την κατ' αρχήν ελεγχόμενη διάθεση των αποβλήτων σε κατάλληλες περιοχές και στη συνέχεια με την απομόνωσή τους, ώστε να αποκλεισθεί η επαφή τους με το οξυγόνο ή/και το νερό, παράγοντες οι οποίοι συντελούν στη διαλυτοποίηση των τοξικών συστατικών και τη

μεταφορά τους στο περιβάλλον. Έτσι, οι μέθοδοι πρόληψης που έχουν αναπτυχθεί περιλαμβάνουν συνοπτικά τα εξής<sup>[3]</sup>:

- Απομάκρυνση και απομόνωση των θειούχων ορυκτών
- Αποφυγή έκθεση στο οξυγόνο με χρήση υδατικών καλυμμάτων καθώς και με χρήση ξηρών καλυμμάτων χαμηλής διαπερατότητας
- Αύξηση του PH με προσθήκη αλκαλικών προσθέτων
- Χρήση βακτηριοκτόνων για την αναστολή της δράσης των βακτηρίων.

Πιο συγκεκριμένα:

Διάθεση υγρών αποβλήτων σε ελεγχόμενες περιοχές: Η διάθεση των υγρών αποβλήτων υπό μορφή πολφού χαμηλής πυκνότητας σε ελεγχόμενες περιοχές, οι οποίες περιλαμβάνουν αδιαπέραστα πλευρικά τοιχώματα και πυθμένα, όπως είναι τα φράγματα απόθεσης, θεωρείται ως μία από τις καταλληλότερες μεθόδους περιορισμού της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Οι ελεγχόμενες αυτές περιοχές, εκτός του ότι ελαχιστοποιούν την πιθανότητα δημιουργίας όξινης απορροής, εγκλωβίζουν και το νερό των πόρων, το οποίο συνήθως περιέχει υψηλά φορτία βαρέων μετάλλων.

Για τον περιορισμό της διαφυγής των παραγομένων εκχυλισμάτων, τα δάπεδα των ελεγχόμενων περιοχών πρέπει να κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτυγχάνονται βέλτιστες συνθήκες υγρασίας, συμπίεσης και ισοκατανομής των πιθανών διαρροών. Τα δάπεδα αυτά αποτελούνται συνήθως από εδαφικά ή συνθετικά υλικά, των οποίων η διαπερατότητα μειώνεται με την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου. Έτσι, επιτυγχάνεται αφ' ενός μιν μείωση της ποσότητας των παραγομένων εκχυλισμάτων, αφ' ετέρου δε μείωση της συγκέντρωσης των τοξικών συστατικών στα εκχυλίσματα λόγω αραίωσης.

Τα συνθετικά δάπεδα, τα οποία κατασκευάζονται από πολυαιθυλένιο χαμηλής ή υψηλής πυκνότητας, χρησιμοποιούνται ευρύτερα, κυρίως επειδή χαρακτηρίζονται από χαμηλή διαπερατότητα. Θεωρείται πάντως ότι και αυτά τα δάπεδα έχουν πεπερασμένη διαπερατότητα, η οποία οφείλεται κυρίως σε δημιουργούμενες μικροσκοπικές οπές και σε ατέλειες εξαιτίας της συρραφής των επιμέρους τμημάτων τους κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης. Βέλτιστη συμπεριφορά επιτυγχάνεται, όταν ένα συνθετικό δάπεδο τοποθετηθεί επί ενός αργιλικού στρώματος. Στην περίπτωση αυτή, οι συνέπειες πιθανών διαρροών ελαχιστοποιούνται σε μεγάλο βαθμό.

Η διάθεση των υγρών αποβλήτων σε ελεγχόμενες περιοχές πραγματοποιείται με τις παρακάτω τεχνικές:

- α) Τεχνική ταχείας ξήρανσης.
- β) Τεχνική διατήρησης υπερκείμενου υδατικού καλύμματος.

### **3.2.1. Τεχνική ταχείας ξήρανσης – υπαέρια απόθεση (sub-aerial disposal)**

Η τεχνική της ταχείας ξήρανσης των αποβλήτων περιλαμβάνει<sup>[2]</sup> συστηματική περιμετρική διάθεσή τους, υπό μορφή πολφού χαμηλής πυκνότητας σε στερεά, σε λεπτά στρώματα εντός μιας περιοχής διάθεσης, η οποία παρουσιάζει κλίση προς το κέντρο της. Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται γρήγορη απομάκρυνση του επιφανειακού νερού, λόγω αποστράγγισης και εξάτμισης και, συνεπώς, ταχεία ξήρανση των προκυπτόντων στρωμάτων των στερεών αποβλήτων. Αυτός ο τρόπος διάθεσης εξασφαλίζει άριστο διαχωρισμό μεταξύ των στερεών και υγρών φάσεων του αποτιθέμενου πολφού. Το σύστημα διάθεσης του πολφού περιστρέφεται περιμετρικά σε τακτά χρονικά διαστήματα έτσι, ώστε τα στερεά να μπορούν να καθιζήσουν και να συμπυκνωθούν και επιπλέον να ξηρανθούν, εάν οι κλιματικές συνθήκες το επιτρέπουν.

Η τεχνική αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός φράγματος ξηρών και συμπυκνωμένων αποβλήτων, τα οποία, με την πάροδο του χρόνου πακτώνονται με συνέπεια να μειώνεται σημαντικά η διαπερατότητά τους. Συνεπώς, μειώνεται δραστικά η πιθανότητα παραγωγής εκχυλισμάτων και ρύπανσης του περιβάλλοντος.

Η εφαρμογή αυτής της τεχνικής διάθεσης προϋποθέτει:

- 1) τη δημιουργία ενός αδιαπέραστου δαπέδου στην ελεγχόμενη περιοχή και
- 2) ύπαρξη συστημάτων συλλογής της περίσσειας του νερού και των τυχόν παραγομένων εκχυλισμάτων. Η απομάκρυνση της περίσσειας του νερού ελαχιστοποιεί τον μελλοντικό κίνδυνο διαρροών και αστοχίας των πλευρικών τοιχωμάτων της ελεγχόμενης περιοχής, ενώ η απομάκρυνση των εκχυλισμάτων ελαχιστοποιεί την πιθανότητα ρύπανσης των υπογείων υδάτων. Τέλος, η επιτυγχανόμενη συμπύκνωση και ξήρανση των στερεών αποβλήτων επιτρέπουν, μετά το τέλος της λειτουργίας της ελεγχόμενης περιοχής διάθεσης, την αποκατάστασή της, συνήθως με τη δημιουργία εδαφικού φυτοκαλύμματος.

### **3.2.2. Τεχνική διατήρησης υπερκείμενου υδατικού καλύμματος (sub-aqueous disposal)**

Η τεχνική αυτή<sup>[2]</sup> περιλαμβάνει διάθεση των υγρών αποβλήτων υπό μορφή πολφού χαμηλής πυκνότητας σε κατάλληλες περιοχές, οι οποίες ονομάζονται λίμνες τελμάτων

(tailing ponds). Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται η καθίζηση των στερεών με τη βαρύτητα, ενώ παράλληλα διατηρείται πάντοτε ένα στρώμα νερού υπεράνω του στρώματος των στερεών αποβλήτων (σχήμα 1). Αυτός ο τρόπος διάθεσης εμποδίζει τη μεταφορά οξυγόνου στα στερεά απόβλητα, υπό την προϋπόθεση ότι το στρώμα του νερού έχει επαρκές πάχος και, συνεπώς, επιβραδύνει σημαντικά τις διαδικασίες οξείδωσής τους.

Κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής πρέπει, όμως, να λαμβάνονται όλα τα κατάλληλα προληπτικά μέτρα, όπως στεγανοποίηση των τοιχωμάτων και του πυθμένα των περιοχών διάθεσης, ώστε το υπερκείμενο νερό, το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις χαρακτηρίζεται από υψηλή περιεκτικότητα τοξικών συστατικών, να μην διαφεύγει προς το περιβάλλον.

Στην περίπτωση κατά την οποία τα απόβλητα περιέχουν εξαιρετικά υψηλό ποσοστό ενεργών θειούχων ενώσεων, μπορεί εναλλακτικά να χρησιμοποιηθεί τεχνική, η οποία περιλαμβάνει απομάκρυνση των ενεργών θειούχων ενώσεων με δευτερογενή επίπλευση και δημιουργία: (α) ενός συμπυκνώματος με μικρό όγκο και υψηλή συγκέντρωση σε S, το οποίο μπορεί είτε να διατεθεί υπό ελεγχόμενες συνθήκες, είτε να ανακυκλωθεί σε κάμινο τήξης, και (β) δευτερογενών υγρών αποβλήτων με χαμηλή περιεκτικότητα σε S και θειούχες ενώσεις, τα οποία διαχειρίζονται εύκολα με τις τεχνικές που αναφέρθηκαν προηγούμενα.

Εάν η εφαρμογή της τεχνικής αυτής είναι δύσκολη ή αντιοικονομική, τότε συνιστάται η απομόνωση των στερεών αποβλήτων με ένα αδιαπέραστο κάλυμμα, το οποίο εμποδίζει την οξείδωσή τους και την παραγωγή όξινων εκχυλισμάτων.

### **3.3 Μέθοδοι Περιορισμού**

Η εφαρμογή μεθόδων περιορισμού έχει ως πρωταρχικό στόχο τον περιορισμό της μετανάστευσης της ΟΑΜ προς το περιβάλλον. Εάν αυτός δεν είναι πλήρως εφικτός, τότε επικεντρώνεται στην απομάκρυνση μέρους του φορτίου των βαρέων μετάλλων και των υπόλοιπων τοξικών συστατικών από τα όξινα διαλύματα. Με βάση αυτή τη λογική, ο «περιορισμός» αναφέρεται κυρίως στη μείωση του τοξικού φορτίου των βαρέων μετάλλων των υγρών αποβλήτων και όχι στη μείωση του όγκου τους. Η δημιουργία στερεών καλυμμάτων εμποδίζει σε σημαντικό βαθμό τη διείσδυση νερού προς τα απόβλητα και, συνεπώς, οδηγεί σε μείωση της ποσότητας της όξινης απορροής που μπορεί να δημιουργηθεί και τελικά να μεταναστεύσει προς το περιβάλλον. Άρα, η μέθοδος αυτή περιορίζει αποτελεσματικά τη μετανάστευση των παραγομένων υγρών

αποβλήτων. Άλλες σημαντικές μέθοδοι περιορισμού είναι: (α) η ανάσχεση της ροής επιφανειακού και υπόγειου νερού προς τις περιοχές διάθεσης ενεργών στερεών αποβλήτων, με στόχο την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας οξειδώσής τους και δημιουργίας ΟΑΜ και (β) η ανάσχεση της ροής υπόγειων ρυπασμένων υδάτων προς τον υδροφόρο ορίζοντα, με στόχο την αποφυγή της ρύπανσής του.

### 3.4 Διορθωτικές Μέθοδοι Επέμβασης

Η εφαρμογή διορθωτικών μεθόδων επέμβασης<sup>[1]</sup> αποτελεί το τελευταίο στάδιο της αντιμετώπισης των επιπτώσεων της ΟΑΜ και στοχεύει στη συλλογή και επεξεργασία των παραγομένων υγρών αποβλήτων. Η επεξεργασία αυτή (βλ. εικόνα 5) μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με χρήση ενεργητικών συστημάτων, τα οποία περιλαμβάνουν συνεχή χημική επεξεργασία, είτε με χρήση παθητικών συστημάτων (π.χ. τεχνητοί υγρότοποι), τα οποία, εάν σχεδιαστούν σωστά, λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς να απαιτείται ουσιαστικός έλεγχος.

Η χρήση και πιθανή βιομηχανική εφαρμογή των μεθόδων αυτών είναι το θέμα που αναπτύσσεται λεπτομερώς στην παρούσα εργασία και επομένως είναι αναγκαία η εκτενής αναφορά και ταξινόμηση των υπαρχόντων μεθόδων.

Η χημική επεξεργασία<sup>[8]</sup> θεωρείται μια ασφαλής βραχυπρόθεσμη, αλλά όχι μακροπρόθεσμη μέθοδος περιβαλλοντικής προστασίας, ειδικά όταν εφαρμόζεται σε εγκαταλελειμμένα μεταλλεία, τα οποία εξακολουθούν να παράγουν όξινη απορροή για μεγάλες χρονικές περιόδους μετά το πέρας των εργασιών. Σε τέτοιες περιπτώσεις εκτιμάται ότι η εφαρμογή Παθητικών συστημάτων αποδίδει ικανοποιητικότερα αποτελέσματα.

Όταν η απορροή είναι επιφανειακή, η συλλογή της γίνεται συνήθως με κατασκευή αναχωμάτων και τάφρων. Η συλλογή των ρυπασμένων υπογείων νερών απαιτεί την εγκατάσταση ενός προσεκτικά σχεδιασμένου συστήματος, το οποίο θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την κατεύθυνση ροής των υπογείων νερών, την τοπογραφία και υδρογεωλογία της περιοχής και τα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων που την περιβάλλουν. Ένα τέτοιο σύστημα συνήθως προϋποθέτει την εγκατάσταση αντλιών για την άντληση των ρυπασμένων υδάτων με παράλληλη εφαρμογή μέτρων προστασίας του υδροφόρου ορίζοντα (π.χ. με απομόνωσή του, η οποία επιτυγχάνεται με διοχέτευση στα υπερκείμενα υδατοδιαπερατά στρώματα πολφού τσιμέντου, ιπτάμενης τέφρας ή άλλων υλικών με ποζολανικές ιδιότητες).





Εικόνα 5: Μεταφορά ΟΑΜ διαμέσου αντλιών από την κοίτη ενός ποταμού στο εργοστάσιο που έχει εγκατασταθεί για την επεξεργασία της.

### 3.4.1 Ενεργητικές μέθοδοι

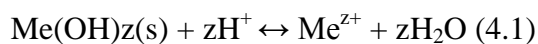
Η εφαρμογή ενεργητικών διορθωτικών μεθόδων επέμβασης αποσκοπεί στην παραγωγή απορροής που πληροί τις περιβαλλοντικές προδιαγραφές για ασφαλή διάθεση υγρών αποβλήτων και ιλύος (από την καταβύθιση των βαρέων μετάλλων), η οποία μπορεί να διατεθεί με περιβαλλοντικά κατάλληλες τεχνικές.

Οι ενεργητικές (δυναμικές) μέθοδοι επεξεργασίας στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας των νερών, απαιτούν συνεχή παροχή ενέργειας ή/και προσθήκη (βιο)χημικών αντιδραστηρίων. Ο όρος προσθήκη ενέργειας αναφέρεται σε διάφορες μορφές παρεχόμενης ενέργειας όπως ηλεκτρικό ρεύμα, θερμότητα ή πίεση. Τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως αλκαλικά υγρά ή στερεά αντιδραστήρια, οργανικά πολυμερή-κροκιδωτικά ή πιο σπάνια αέρια υπό πίεση.

Η μέθοδος, που χρησιμοποιείται συχνότερα, στοχεύει στην εξουδετέρωση της ΟΑΜ με προσθήκη βάσεων, προκαλώντας έτσι αύξηση του pH και καταβύθιση των βαρέων

μετάλλων υπό μορφή υδροξειδίων. Το As και το Sb μπορούν επίσης να απομακρυνθούν από τα όξινα διαλύματα υπό μορφή σταθερών αλάτων του σιδήρου και του ασβεστίου. Εάν η ποιότητα του τελικού διαλύματος δεν πληροί τα κριτήρια ασφαλούς περιβαλλοντικής διάθεσης, τότε μπορούν να εφαρμοσθούν και συμπληρωματικές μέθοδοι, όπως καταβύθιση των ρύπων υπό μορφή θειούχων ενώσεων, προσρόφιση και ιονεναλλαγή.

Εξουδετέρωση – καταβύθιση υδροξειδίων: Όπως είναι γνωστό, η προσβολή ενός διαλύματος ΟΑΜ που περιέχει ιόντα  $H^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ , κ.λπ. με βάση θα έχει ως αποτέλεσμα την καταβύθιση υδροξειδίων των αντιστοίχων μετάλλων. Οι τελικές συγκεντρώσεις των ιόντων αυτών στο διάλυμα καθορίζονται από την τελική τιμή του pH με βάση την ισορροπία της αντίδρασης<sup>[2]</sup>:



Από την αντίδραση αυτή προκύπτει η σχέση του  $\log[Me^{z+}]$  ως προς το pH

$$\log[Me^{z+}] = \log K_s - zpH \quad (4.2)$$

όπου  $K_s$  η σταθερά ισορροπίας της αντίδρασης (4.1).

Για τον προσδιορισμό της διαλυτότητας των οξειδίων και των υδροξειδίων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ισορροπία των συμπλόκων  $[Me(OH)_n]_{z-n}$  με τις στερεές φάσεις.

Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα μέσα εξουδετέρωσης είναι το  $CaO$ , το  $Ca(OH)_2$  και το  $CaCO_3$ , με το τελευταίο να παρουσιάζει αρκετά χαμηλότερη ικανότητα εξουδετέρωσης. Συνήθως ο λειοτριβημένος ασβεστόλιθος χρησιμοποιείται στο στάδιο προεξουδετέρωσης, ενώ η δράση του με την πάροδο του χρόνου μπορεί να επιβραδυνθεί από την καταβύθιση γύψου και υδροξειδίων του τρισθενούς σιδήρου, ενώσεις οι οποίες επικαλύπτουν την επιφάνειά του και προκαλούν μερική αδρανοποίηση. Η καταβύθιση γύψου, ο οποίος μπορεί να παραμένει στο διάλυμα και σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από αυτές που καθορίζονται από τη διαλυτότητά του, δημιουργεί επιπρόσθετα προβλήματα σε σωληνώσεις και αντιδραστήρες.

Εναλλακτικά, ως μέσο εξουδετέρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί δολομιτικός ασβεστόλιθος ( $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ ), ο οποίος εμπλουτίζει τα διαλύματα με μαγνήσιο και προκαλεί καταβύθιση μικρότερων ποσοτήτων ιλύος. Η παρουσία μαγνησίας [ $MgO$ ,  $Mg(OH)_2$ ] προκαλεί την παραγωγή ιλύος με μεγαλύτερη πυκνότητα, η οποία περιέχει μόνο υδροξείδια των μετάλλων. Η μέθοδος αυτή, όμως, απαιτεί υψηλότερο κόστος εξαιτίας της αναγκαίας τελικής απομάκρυνσης των θειϊκών ιόντων από το διάλυμα υπό μορφή γύψου. Εναλλακτικά, τα θειϊκά ιόντα, που παραμένουν στο διάλυμα, μπορεί να

χρησιμοποιηθούν για παραγωγή υδροθείου, το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την καταβύθιση των μετάλλων υπό μορφή θειούχων ενώσεων.

Τεχνολογίες εξουδετέρωσης: Η εξουδετέρωση της OAM, συνήθως, γίνεται με αύξηση του pH σε τιμές 8,5-9,5, ώστε να καταβυθιστούν όλα τα ιόντα υπό μορφή υδροξειδίων, τα οποία στη συνέχεια πρέπει να διαχωριστούν από τα διαλύματα πριν την τελική διάθεση. Εάν στο διάλυμα υπάρχει δισθενής σίδηρος, τότε απαιτείται αερισμός του πολφού, ώστε να οξειδωθεί ο δισθενής σίδηρος προς τρισθενή, επειδή, όπως είναι γνωστό, τα οξυ-υδροξείδια του τρισθενούς σιδήρου είναι πολύ πιο σταθερές ενώσεις από τις αντίστοιχες ενώσεις του δισθενούς σιδήρου.

Τα διαγράμματα ροής των τεχνολογιών εξουδετέρωσης ποικίλλουν και μπορεί να είναι είτε απλά είτε σύνθετα περιλαμβάνοντας και στάδιο ανακύκλωσης της ιλύος. Μια απλή τεχνική εξουδετέρωσης περιλαμβάνει συλλογή της OAM σε μια λεκάνη, προσθήκη του μέσου εξουδετέρωσης, καταβύθιση των τοξικών μετάλλων και απομάκρυνση του υπερκείμενου νερού. Σήμερα, στα περισσότερα μεταλλεία και σε άλλες βιομηχανικές μονάδες λειτουργούν περισσότερο σύγχρονες μονάδες χημικής εξουδετέρωσης. Η όξινη απορροή αναμιγνύεται με πολφό ασβέστου σε έναν ή περισσότερους αντιδραστήρες εξουδετέρωσης. Σε πολλές περιπτώσεις ακολουθεί διαύγαση του διαλύματος, αν και συχνά χρησιμοποιούνται δεξαμενές καθίζησης. Μετά το διαχωρισμό στερεών/υγρών και την ασφαλή περιβαλλοντική διάθεση της ιλύος που παράγεται, μέρος των υγρών μπορεί να ανακυκλωθεί.

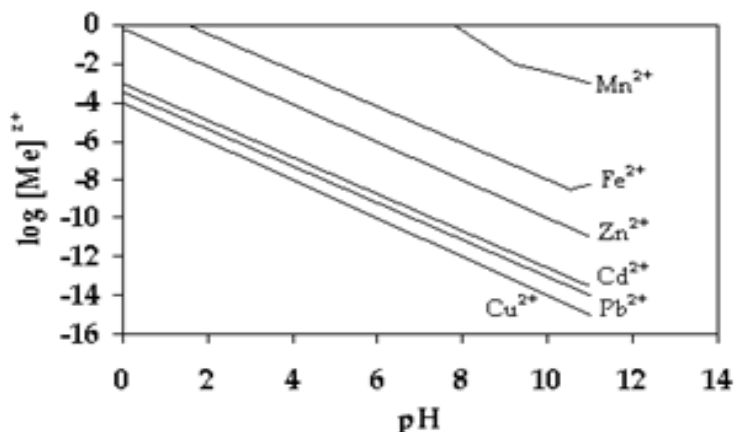
Η τεχνολογία αυτή, η οποία εφαρμόζεται ευρύτατα, οδηγεί στην παραγωγή ζελατινώδους πολφού με μεγάλο όγκο και χαμηλή πυκνότητα, ο οποίος περιέχει 2-5% στερεά.

Καταβύθιση θειούχων ενώσεων: Η καταβύθιση θειούχων ενώσεων των μετάλλων από όξινα διαλύματα θεωρείται ως μια εναλλακτική μέθοδος καθαρισμού τους, σε σχέση με την καταβύθιση των μεταλλικών ιόντων υπό μορφή υδροξειδίων. Οι θειούχες ενώσεις χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλότερες διαλυτότητες σε σχέση με τα αντίστοιχα υδροξείδια. Συνεπώς, αυτή η διεργασία μπορεί να μειώσει τις συγκεντρώσεις των διαλελυμένων μετάλλων στα διαλύματα σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα.

Η καταβύθιση των ιόντων των δισθενών μετάλλων με χρήση υδροθείου περιγράφεται από την παρακάτω αντίδραση:



Η παραμένουσα ποσότητα μετάλλου στο διάλυμα (συμπεριλαμβανομένων των ελεύθερων και των δεσμευμένων σε υδροξο-σύμπλοκα ιόντων) συναρτήσει της τιμής του pH για τις κυριότερες θειούχες ενώσεις παρουσιάζεται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4<sup>[3]</sup>: Διαλυτότητα των θειούχων ενώσεων συναρτήσει του pH με  $[HS^-]=10^{-2}M$ .

Όπως προαναφέρθηκε, η καταβύθιση θειούχων ενώσεων των μετάλλων παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με την καταβύθιση των αντίστοιχων υδροξειδίων, επειδή η παραγόμενη ιλύς είναι πυκνότερη και χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη διαλυτότητα. Επειδή οι θειούχες ενώσεις, όμως, υπόκεινται σε οξείδωση με την παρουσία νερού και οξυγόνου, η προκύπτουσα ιλύς πρέπει να αποτίθεται πολύ προσεκτικά. Τα στοιχεία, τα οποία μπορούν να απομακρυνθούν από τα όξινα διαλύματα υπό μορφή θειούχων ενώσεων είναι Cu, Zn, Cd, As, Ni, Fe, Pb και Sb, ενώ το Al μπορεί να απομακρυνθεί μόνο ως υδροξείδιο. Σε αρκετές περιπτώσεις εξετάζεται και η πιθανότητα ανάκτησης μεταλλικών αξιών από την παραγόμενη ιλύ.

Τα κυριότερα αντιδραστήρια που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό είναι<sup>[3]</sup>:

1. Ασβεστόλιθος,  $CaCO_3$
2. Υδράσβεστος,  $Ca(OH)_2$
3. Ασβέστης,  $CaO$
4. Άνυδρη σόδα,  $Na_2CO_3$
5. Καυστική σόδα,  $NaOH$
6. Αμμωνία,  $NH_3$  ή  $NH_4OH$
7. Υδρόθειο,  $H_2S$

Η καταβύθιση των θειούχων ενώσεων λαμβάνει χώρα συνήθως παρουσία  $H_2S$  αλλά και παρουσία  $Na_2S$  και  $CaS$ . Το  $H_2S$  μπορεί να παραχθεί με χημικά μέσα ενώ σε διαλύματα που περιέχουν θειϊκά ιόντα μπορεί να παραχθεί και βιοχημικά. Αυτό μπορεί να γίνει με αναγωγή των θειϊκών ιόντων σε αναερόβιες συνθήκες από θειοαναγωγικά βακτήρια,

παρουσία οργανικών ουσιών που χρησιμεύουν ως θρεπτικό μέσο για τα βακτήρια. Οι συνολικές αντιδράσεις εξαρτώνται από το pH και είναι<sup>[2]</sup>:



Η ένωση  $\text{CH}_2\text{O}$  χρησιμοποιείται για την περιγραφή οργανικού υλικού (π.χ. γλυκόζη  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ). Οι αντιδράσεις αυτές παράγουν αλκαλικότητα, ενώ το παραγόμενο υδρόθειο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καταβύθιση των θειούχων ενώσεων (αντίδραση 4.4).

Τα κυριότερα θειοαναγωγικά βακτήρια είναι τα είδη *Desulfovibrio Vulgaris*, *Desulfomonas Pigra* και *Desulfobacter Postgatei*. Ως θρεπτικά μέσα μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα οργανικά υλικά, όπως ιλύς βιολογικού καθαρισμού, οργανικά αντιδραστήρια, όπως μεθανόλη, αιθανόλη, ζάχαρη, μολάσα και άλλα, καθώς και ανόργανα αέρια, όπως διοξείδιο του άνθρακα, μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Οι ευνοϊκότερες συνθήκες για την ανάπτυξη των βακτηρίων αυτών είναι η ύπαρξη χαμηλού δυναμικού οξειδοαναγωγής σε ουδέτερη περιοχή pH.

Περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά παραγόμενης ιλύος: Η ιλύς που παράγεται από την εξουδετέρωση της ΟΑΜ, συνήθως περιέχει γύψο, υδροξείδια βαρέων μετάλλων και αρσενικά άλατα του σιδήρου και του ασβεστίου.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η παραγόμενη ιλύς αποτίθεται σε ελεγχόμενες περιοχές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη διάθεση των στερεών αποβλήτων των διαφόρων σταδίων των μεταλλευτικών-μεταλλουργικών διεργασιών.

Αυτή η πρακτική μειώνει σημαντικά το κόστος για το σχεδιασμό και την κατασκευή νέων περιοχών διάθεσης, έχει όμως το σημαντικό μειονέκτημα της αδυναμίας δευτερογενούς επεξεργασίας των αποβλήτων με σκοπό την ανάκτηση των περιεχόμενων μεταλλικών αξιών.

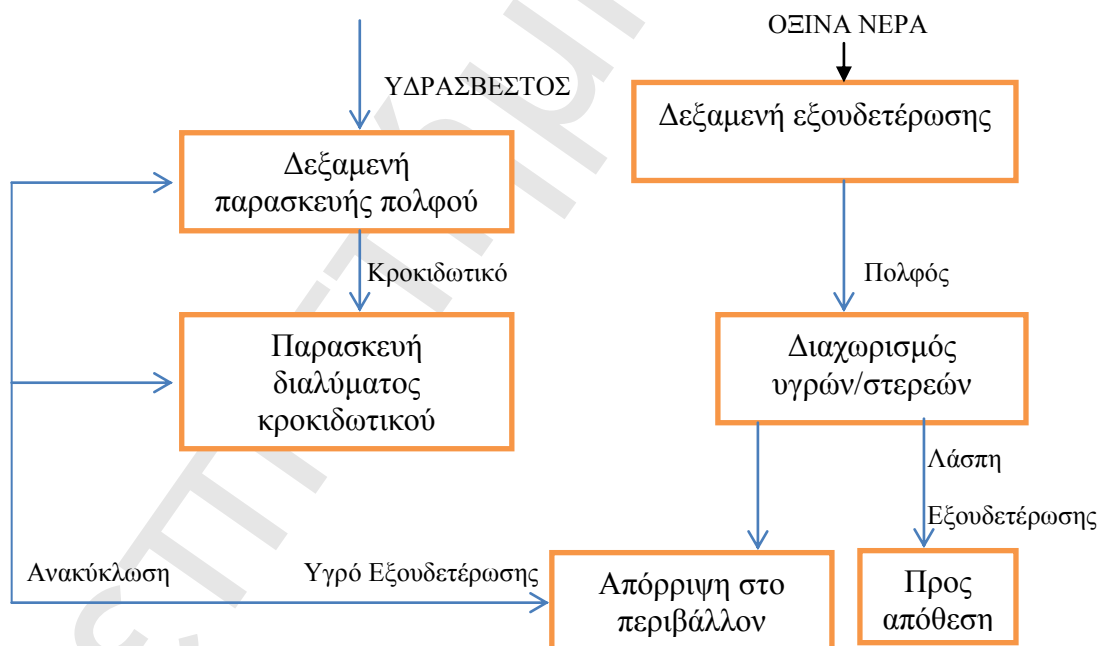
Η διάθεση της ιλύος στο περιβάλλον θα πρέπει να γίνεται με επιστημονικό τρόπο, αφού κατ' αρχήν μελετηθούν τα κυριότερα χαρακτηριστικά της περιοχής διάθεσης, όπως βάθος του υπόγειου υδροφορέα, απόσταση της περιοχής διάθεσης από επιφανειακά και υπόγεια νερά, και ποσοστό αραίωσης των εκχυλισμάτων, που πιθανά θα παραχθούν στο μέλλον από τη διαλυτοποίηση των συστατικών της ιλύος. Άλλα χαρακτηριστικά της περιοχής διάθεσης, τα οποία μπορούν να ληφθούν υπόψη, είναι η απόσταση της περιοχής από κοινωνικές και πολιτιστικές δραστηριότητες, οι ιδιότητες του εδάφους (ποιότητα εδάφους, pH, ιοντοανταλλακτική ικανότητα, κλίση) και τέλος, η γεωλογία και η υδρογεωλογία της περιοχής.

Συμπερασματικά πρέπει να αναφερθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις οι ιλύες, που προκύπτουν από την επεξεργασία της όξινης απορροής μεταλλείων, χαρακτηρίζονται ως επικίνδυνα απόβλητα, επειδή δεν πληρούν τις περιβαλλοντικές προδιαγραφές ασφαλούς διάθεσης.

Εάν από την εφαρμογή των διαφόρων περιβαλλοντικών δοκιμών προκύψει υψηλή τοξικότητα της ιλύος και πιθανότητα, σε σύντομο ή μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, να παραχθούν εκχυλίσματα που περιέχουν υψηλά φορτία τοξικών συστατικών, τότε πρέπει να ληφθούν όλα τα απαραίτητα μέτρα, ώστε η ιλύς να αποτεθεί σε κατάλληλα διαμορφωμένες περιοχές διάθεσης. Με τον τρόπο αυτό θα ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα διαλυτοποίησης των τοξικών συστατικών και θα εξασφαλισθούν η συλλογή και η επεξεργασία των τυχόν παραγομένων εκχυλισμάτων.

Τελειώνοντας την συνοπτική αναφορά στις ενεργητικές μεθόδους αντιμετώπισης της OAM, παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής (βλ. σχήμα 5) μια κλασσικής μεθόδου εξουδετέρωσης της OAM με υδράσβεστο ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

### ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΟΞΙΝΩΝ ΝΕΡΩΝ



Σχήμα 5<sup>[31]</sup>: Διάγραμμα ροής μιας μεθόδου εξουδετέρωσης της OAM με υδράσβεστο ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

### 3.4.2 Παθητικά συστήματα

Οι παθητικές μέθοδοι επεξεργασίας στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας των νερών με χρήση μόνο φυσικά διαθέσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. βαρύτητα, ενέργεια μεταβολισμού βακτηρίων, φωτοσύνθεση) σε συστήματα που δεν απαιτούν συνεχή συντήρηση για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά για όλο το χρονικό διάστημα σχεδιασμού τους (ωστόσο χρειάζονται τακτική παρακολούθηση).

Κατά την χρήση αυτών των μεθόδων οι κυριότεροι μηχανισμοί απομάκρυνσης μετάλλων που λαμβάνουν χώρα είναι<sup>[3]</sup>:

- Αντιδράσεις ανταλλαγής ιόντων με το οργανικό υπόστρωμα
- Καταβύθιση ανθρακικών ενώσεων από το παραγόμενο  $\text{HCO}_3^-$
- Αναγωγή θειϊκών ιόντων και καταβύθιση μετάλλων υπό μορφή θειούχων ενώσεων
- Καταβύθιση υδροξειδίων  $\text{Fe}^{3+}$  και  $\text{Mn}$
- Προσρόφηση μετάλλων σε υδροξείδια  $\text{Fe}^{3+}$
- Απορρόφηση μετάλλων από φυτικά είδη
- Εξουδετέρωση και καταβύθιση μετάλλων με χρήση  $\text{NH}_3$
- Προσρόφηση και ανταλλαγή μετάλλων σε άγλη

Τα παθητικά συστήματα επεξεργασίας της OAM είναι κυρίως τριών ειδών<sup>[9]</sup>:

#### 1) Παθητικά συστήματα Ανόργανων Υλικών

Τα συστήματα αυτά χωρίζονται στις εξής μεθόδους:

- Ανοξικές Αστεστολιθικές τάφροι (Anoxic Limestone Drains, ALD)
- Οξικές Ασβεστολιθικές τάφροι (Oxic Limestone Drains, OLD)
- Κλειστά συστήματα απομάκρυνσης  $\text{Zn}$
- Συστήματα απομάκρυνσης  $\text{Cd}$  και  $\text{As}$
- Συστήματα που χρησιμοποιούν πυρολουσίτη

#### 2) Παθητικά συστήματα βακτηριακής αναγωγής με υπόγεια ροή

Περιλαμβάνει τα εξής συστήματα:

- Διαπερατα κατακόρυφα φράγματα (Reactive Barriers)
- Υπόγεια συστήματα οργανικού υποστρώματος

#### 3) Παθητικά συστήματα τύπου υγρότοπου

Περιλαμβάνει τα εξής συστήματα:

- Αερόβιοι Υγρότοποι (Aerobic Wetlands)
- Αναερόβιοι Υγρότοποι-Υγρότοποι οργανικού υποστρώματος (Anaerobic Wetlands)
- Αναγωγικά συστήματα παραγωγής αλκαλικότητας

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την λειτουργία και την επιλογή του κατάλληλου παθητικού συστήματος επεξεργασίας είναι:

- Παροχή της προς επεξεργασία ΟΑΜ
- Οξύτητα της προς επεξεργασία ΟΑΜ
- Σύσταση της ΟΑΜ (π.χ. συγκέντρωση σε  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}$  κ.τ.λ.)
- Διαλελυμένο οξυγόνο
- Διαθεσιμότητα γης

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των παθητικών μεθόδων επεξεργασίας είναι:

- 1) Χαμηλό κόστος κατασκευής για επεξεργασία ΟΑΜ με μικρή παροχή
- 2) Χαμηλό λειτουργικό κόστος
- 3) Δυνατότητα λειτουργίας για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς παρακολούθηση
- 4) Είναι συστήματα που εντάσσονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στο ευρύτερο οικοσύστημα

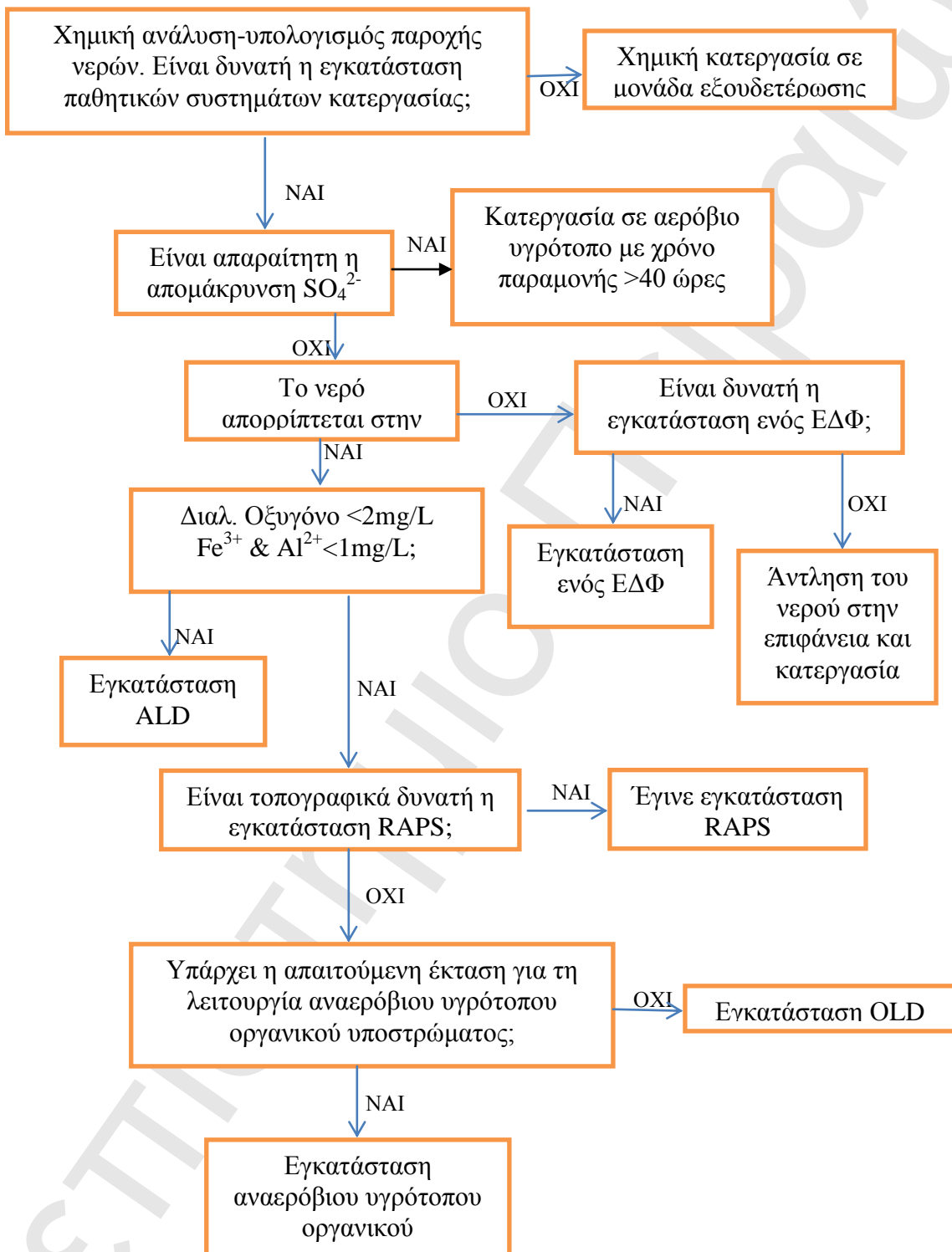
Τα κυριότερα μειονεκτήματα των παθητικών μεθόδων επεξεργασίας είναι:

- 1) Δεν γίνεται καθημερινός έλεγχος της τελικής ποιότητας των αποβλήτων
- 2) Υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις σε γη
- 3) Χρησιμοποιούν σχετικά νέα τεχνολογία και επομένως η αποκτειθείσα εμπειρία είναι περιορισμένη
- 4) Ο αριθμός των ερευνών για τις συχνότερες από αυτές τις διεργασίες είναι περιορισμένος και οι υπάρχουσες μελέτες είναι κυρίως εμπειρικές.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο διαφορετικά διαγράμματα ροής (Σχήματα 6 και 7) για την επιλογή του κατάλληλου παθητικού συστήματος. Το πρώτο αφορά στην επεξεργασία καθαρά όξινων νερών και το δεύτερο στην επεξεργασία «καθαρά» αλκαλικών νερών (δηλ. αναφέρεται σε απορροή που έχει προκύψει μετά από προεπεξεργασία

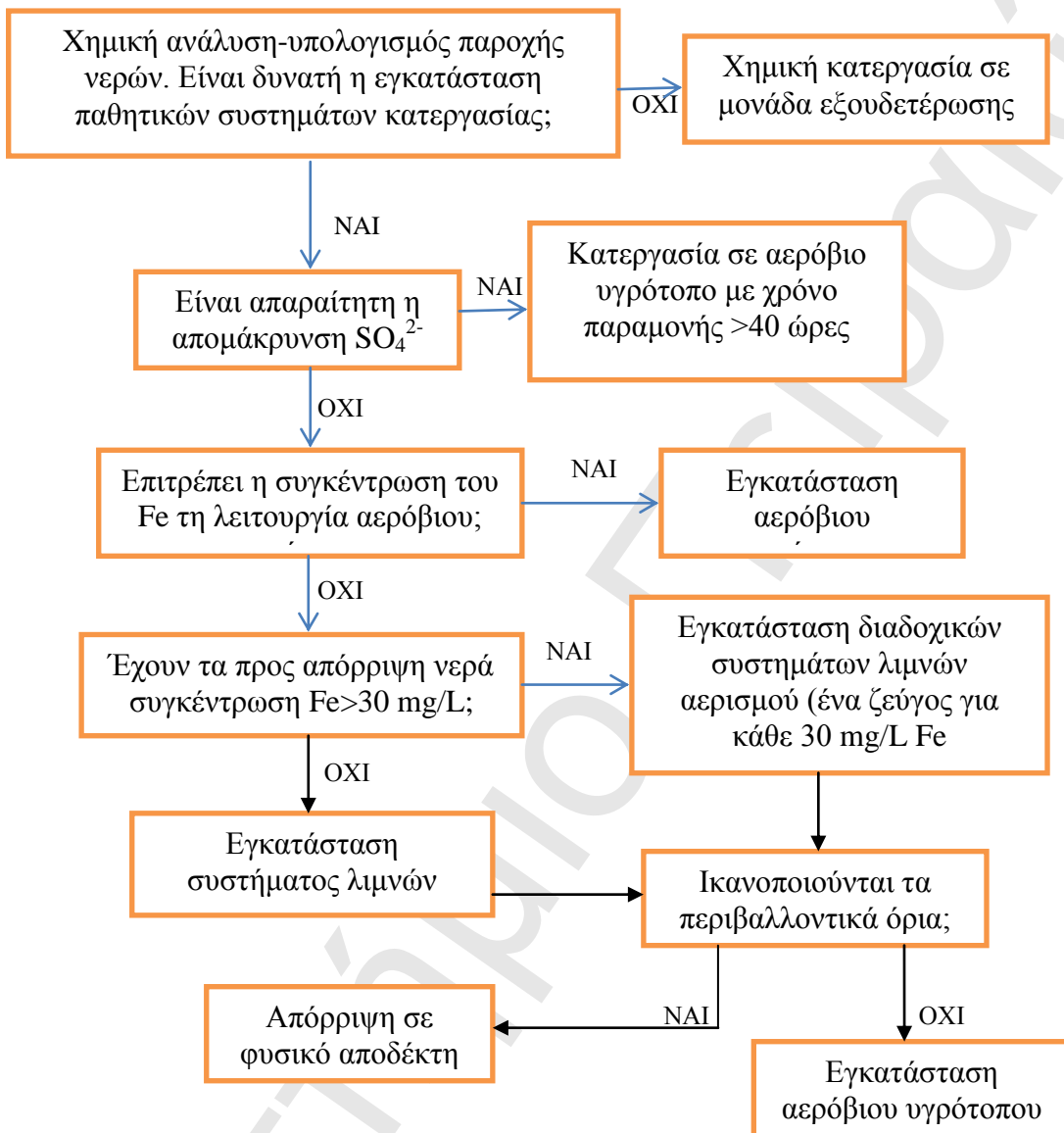


## ΠΑΘΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΟΞΙΝΩΝ ΝΕΡΩΝ



Σχήμα 6<sup>[31]</sup>: Διάγραμμα ροής για την επιλογή κατάλληλου παθητικού συστήματος επεξεργασίας όξινης απορροής που δεν έχει υποστεί προεπεξεργασία.

## ΠΑΘΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΟΞΙΝΩΝ ΝΕΡΩΝ



Σχήμα 7<sup>[3]</sup>: Διάγραμμα ροής για την επιλογή κατάλληλου παθητικού συστήματος επεξεργασίας «καθαρά» αλκαλικής απορροής δηλ. απορροής που έχει υποστεί προεπεξεργασία.

### 3.4.2.1 Τεχνητοί υγρότοποι (constructed wetlands)

Ως τεχνητοί υγρότοποι θεωρούνται κατάλληλα διαμορφωμένες περιοχές, οι οποίες είναι πλημμυρισμένες ή κορεσμένες σε νερό (επιφανειακό ή υπόγειο) και περιέχουν κατάλληλο υπόστρωμα και φυτά, τα οποία προκαλούν την απομάκρυνση ρυπαντικών συστατικών από υγρά απόβλητα.

Η κατασκευή των τεχνητών υγροτόπων περιλαμβάνει, συνήθως, τα ακόλουθα στάδια<sup>[2]</sup>

- Δημιουργία αδιαπέραστου πυθμένα (εάν απαιτείται).

- Κατασκευή υποστρωμάτων με διαφορετική υδραυλική αγωγιμότητα (π.χ. άμμος, χαλίκια, τύρφη, οργανικό υλικό).
- Εμφύτευση κατάλληλων φυτών, που μπορούν να αναπτυχθούν σε υποστρώματα, τα οποία βρίσκονται σε αναερόβιες συνθήκες κορεσμού.
- Εξασφάλιση ροής υγρών αποβλήτων (η ροή μπορεί να είναι είτε επιφανειακή είτε διά μέσου του υποστρώματος).
- Προσθήκη σπονδυλωτών ή ασπόνδυλων οργανισμών.
- Προσθήκη μικροοργανισμών, οι οποίοι αναπτύσσονται σε αερόβιες ή ανερόβιες συνθήκες.

Οι τεχνητοί υγρότοποι αποτελούν εναλλακτικές μεθόδους επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και κυρίως όξινης απορροής μεταλλείων, με ήπια χαρακτηριστικά. Χρησιμοποιούνται τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά το πέρας της λειτουργίας ενός μεταλλείου, εφόσον η παραγωγή όξινης απορροής είναι συνεχής. Θεωρούνται ως παθητικά συστήματα επεξεργασίας, επειδή μετά το πέρας της κατασκευής τους συνήθως δεν απαιτείται υποστήριξη της λειτουργίας τους. Η κατασκευή των τεχνητών υγροτόπων συνήθως απαιτεί σχετικά μεγάλες εκτάσεις, αλλά η λειτουργία τους χαρακτηρίζεται από μικρότερη κατανάλωση ενέργειας και αντιδραστηρίων και από εξαιρετικά χαμηλό κόστος συντήρησης.

Η επεξεργασία της ΟΑΜ στους τεχνητούς υγροτόπους, με την απομάκρυνση των ιόντων των βαρέων μετάλλων, επιτυγχάνεται κυρίως διά μέσου των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα με το περιεχόμενο οργανικό υλικό, το οποίο είτε προστίθεται από την αρχή είτε προέρχεται από την αποσύνθεση των φυτών. Ένα μέρος των ιόντων μπορεί να απομακρυνθεί με προσρόφησή τους από τα φυτά, τα οποία αναπτύσσονται σε αυτά τα υδατικά συστήματα.

Στην αερόβια ζώνη ενός υγρότοπου, το οργανικό υλικό αποσυντίθεται με τη δράση αερόβιων βακτηρίων, καταναλώνεται οξυγόνο και παράγεται διοξείδιο του άνθρακα και νερό, σύμφωνα με την αντίδραση:



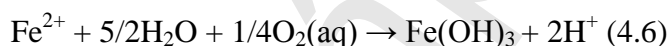
Η αναγωγή των θειικών ιόντων από τα θειοαναγωγικά βακτήρια θεωρείται ο σημαντικότερος μηχανισμός για τη μείωση της βιοδιαθεσιμότητας διαφόρων βαρέων μετάλλων σε υδατικά οικοσυστήματα. Σε αναερόβιες συνθήκες τα ιόντα του θείου, που οξειδώθηκαν από ανόργανα οξειδωτικά μέσα, όπως τα θειικά, μετατρέπονται σε θειούχα, σύμφωνα με τις αντιδράσεις (4.3) και (4.4). Τα προκύπτοντα προϊόντα, τα οποία αποτίθενται στο γειτονικό περιβάλλον, είναι αδιάλυτες θειούχες ενώσεις δισθενών

μετάλλων, σύμφωνα με την αντίδραση (4.2). Οι ενώσεις αυτές, εάν παραμείνουν σε αναερόβιες συνθήκες, δεν επιτρέπουν τη διαλυτοποίηση των βαρέων μετάλλων.

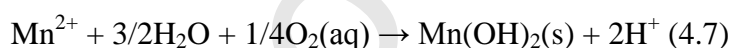
### 3.4.2.2. Μηχανισμοί Απομάκρυνσης Ρυπαντών σε τεχνητούς υγρότοπους

Οι μηχανισμοί, οι οποίοι λαμβάνουν χώρα σε έναν τεχνητό υγρότοπο και προκαλούν την απομάκρυνση των διαφόρων ρυπαντών, είναι φυσικοί, χημικοί και βιολογικοί. Ο απλούστερος μηχανισμός είναι η αραίωση του εισερχομένου διαλύματος, η οποία προκαλεί αύξηση του pH και απομάκρυνση των μεταλλικών ιόντων εξαιτίας της καταβύθισης διαφόρων ενώσεων. Ένας άλλος φυσικός μηχανισμός είναι η διήθηση των συστατικών που βρίσκονται σε αιώρηση. Οι υπόλοιποι μηχανισμοί περιλαμβάνουν:

1) Οξείδωση και υδρόλυση: Αυτός είναι ο κυριότερος μηχανισμός, ο οποίος λαμβάνει χώρα στην αερόβια ζώνη. Ο δισθενής σίδηρος οξειδώνεται προς τρισθενή (αντίδραση 2.2) είτε σε υψηλές περιοχές pH με ταχείς ρυθμούς είτε σε χαμηλές περιοχές pH με βραδύτερους ρυθμούς, οι οποίοι όμως μπορούν να επιταχυνθούν λόγω της βακτηριακής δράσης. Η υδρόλυση (αντίδραση 2.3), που ακολουθεί, προκαλεί την καταβύθιση υδροξειδίων του τρισθενούς σιδήρου υπό μορφή οργανικής ιλύος, η οποία καλύπτει το υπόστρωμα. Η συνολική αντίδραση καταβύθισης μπορεί να γραφεί ως:



Το μαγγάνιο υδρολύεται και προκαλεί το σχηματισμό οξυυδροξειδίων ή ανθρακικών ενώσεων, ενώ το αλουμίνιο προκαλεί το σχηματισμό υδροξειδίων, σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις<sup>[21]</sup>:



Οι παραπάνω αντιδράσεις παράγουν υδρογονοκατιόντα και συνεπώς οδηγούν σε μείωση του pH.

Τα υδροξείδια του σιδήρου, του αλουμινίου και του μαγγανίου, τα οποία καταβυθίζονται σε ζελατινώδη μορφή, έχουν ισχυρή τάση να προσροφούν μεταλλικά ιόντα και ανιόντα στην επιφάνειά τους.

2) Αναγωγή θειικών ιόντων και καταβύθιση θειούχων-ανθρακικών ενώσεων: Όταν τα όξινα νερά των μεταλλείων διέρχονται διά μέσου ενός στρώματος που περιέχει οργανικό υλικό και συνεπώς βρίσκεται υπό αναερόβιες συνθήκες, λαμβάνει χώρα

αναγωγή των θειϊκών ιόντων εξαιτίας της δράσης των θειοαναγωγικών βακτηρίων (Sulphur Reducing Bacteria, SRB). Η δράση αυτή επιταχύνεται σε  $\text{pH} > 4$  απουσία οξειδωτικών μέσων, όπως ιόντων  $\text{O}_2$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  και  $\text{Mn}^{4+}$ . Τέτοιες συνθήκες επικρατούν στα συστήματα των υγροτόπων, όπου η αναγωγή των θειϊκών ιόντων γίνεται με βάση τις αντιδράσεις (4.6) και (4.7) και το παραγόμενο υδρόθειο αντιδρά με τα διαλελυμένα ιόντα των μετάλλων προκαλώντας καταβύθιση θειούχων ενώσεων, σύμφωνα με την αντίδραση (4.4). Η καταβύθιση των θειούχων αυτών ενώσεων εξαρτάται από το  $\text{pH}$ , τη διαλυτότητα της προκύπτουσας ένωσης και τις συγκεντρώσεις των ιόντων.

Η βακτηριακή αναγωγή των θειϊκών ιόντων, η οποία λαμβάνει χώρα στους τεχνητούς υγροτόπους, θεωρείται ως εξαιρετικά σημαντική μακροπρόθεσμη διεργασία. Σε αντίθεση με τις μεγάλες ποσότητες ιλύος που προκύπτουν από την οξείδωση και υδρόλυση του σιδήρου, η καταβύθιση θειούχων ενώσεων του σιδήρου προκαλεί δημιουργία ιζημάτων μεγαλύτερης πυκνότητας, τα οποία παραμένουν εντός του οργανικού υλικού. Η διεργασία αυτή είναι αντίθετη από την οξείδωση του σιδηροπυρίτη και κατά την διάρκειά της καταναλώνεται οξύτητα. Τέλος, σε αντίθεση με τη βακτηριακή οξείδωση και την υδρόλυση, διεργασίες, οι οποίες δεν μπορούν να απομακρύνουν από τα διαλύματα ιόντα, όπως ο Zn και το Mn, σε περιοχές  $\text{pH}$  χαμηλότερες του 8, το υδρόθειο αντιδρά με τα βαρέα μέταλλα σε  $\text{pH} > 3$  και τα προκύπτοντα ιζήματα χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά χαμηλή διαλυτότητα.

Επιπλέον, στους υγροτόπους μπορεί να λάβει χώρα καταβύθιση μεταλλικών ιόντων υπό μορφή ανθρακικών ενώσεων, εξαιτίας της παρουσίας  $\text{HCO}_3^-$  και  $\text{CO}_2$ , που παράγονται από τις αντιδράσεις (4.6) και (4.7), σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



3) Απομάκρυνση μετάλλων από φυτά, φύκια και οργανικά υποστρώματα: Η συσσώρευση μετάλλων στη βιομάζα των φυτών αντιπροσωπεύει μόνο ένα μικρό ποσοστό της συνολικής απομάκρυνσης των μετάλλων, η οποία λαμβάνει χώρα στους τεχνητούς υγροτόπους. Η ικανότητα, όμως, των φυτών να διαχέουν οξυγόνο από τις ρίζες προς τα περιβάλλοντα υποστρώματα και διά μέσου των στελεχών τους, προς τη στήλη του νερού, θεωρείται ως μια σημαντική επικουρική δράση που λαμβάνει χώρα σε αυτά τα συστήματα. Το αποτέλεσμα αυτής της διεργασίας είναι η δημιουργία εντός των υποστρωμάτων τοπικών ζωνών οξείδωσης, οι οποίες ευνοούν την απομάκρυνση του σιδήρου. Μια άλλη σημαντική διεργασία, η οποία επιτελείται στους τεχνητούς υγροτόπους από τα φυτά, είναι ο εμπλουτισμός του υποστρώματος με βιομάζα, η

οποία κυρίως προκαλεί αναγωγή των θειϊκών ιόντων. Η εναλλαγή των εν διαλύσει ιόντων των μετάλλων με χουμικά και φουλβικά οξέα είναι η κυριότερη διεργασία που λαμβάνει χώρα και προκαλεί την προσωρινή δέσμευση των μεταλλικών ιόντων.

### 3.4.2.3. Σχεδιασμός Τεχνητών Υγροτόπων

Οι τεχνητοί υγρότοποι κατασκευάζονται σε περιοχές που περιέχουν νερά μικρού βάθους και στις οποίες κυρίως αναπτύσσονται καλάμια. Το υπόστρωμα, πάνω στο οποίο αναπτύσσονται τα καλάμια, περιέχει οργανικό υλικό και ασβεστόλιθο. Εκτός από καλάμια, στους υγροτόπους μπορούν να μεταφτευθούν και άλλα φυτά με βάση τις ιδιότητές τους και την ποιότητα των υπό επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Τα φυτά, τα οποία μεταφυτεύονται στους τεχνητούς υγροτόπους, συνήθως καλλιεργούνται σε οποιοδήποτε έδαφος ή απόρριμμα είναι διαθέσιμο στη συγκεκριμένη περιοχή. Οι τελευταίες τεχνολογίες σχεδιασμού υγροτόπων βασίζονται σε μοντέλα, τα οποία δεν προσομοιώνουν καθόλου τα αρχικά συστήματα αλλά περιλαμβάνουν την κατασκευή διαφόρων τμημάτων μέσα σε κάθε υγρότοπο, κάθε ένα από τα οποία εξυπηρετεί μια συγκεκριμένη δράση. Τα τμήματα αυτά μπορεί να είναι μικρές λίμνες, φράγματα ή λεκάνες και μπορεί να περιέχουν φυτά, εδαφικό ή οργανικό υλικό. Επιπλέον, πολλοί τεχνητοί υγρότοποι κατασκευάζονται έτσι, ώστε να δέχονται όξινα διαλύματα, τα οποία ήδη έχουν υποστεί προεπεξεργασία μετά από την έξοδό τους από στεγανά ασβεστολιθικά συστήματα (Alkaline Lime Drains - ALDs).

Με βάση τα παραπάνω, οι τεχνητοί υγρότοποι διακρίνονται στις εξής γενικές κατηγορίες<sup>[1]</sup>: Αερόβιοι υγρότοποι, Αναερόβιοι υγρότοποι και σε Ανοξικές Ασβεστολιθικές Τάφροι.

Αερόβιοι υγρότοποι: Οι αερόβιοι υγρότοποι (βλ. σχήμα 8) αποτελούν συστήματα, τα οποία επεξεργάζονται επιφανειακές ροές υγρών αποβλήτων, που χαρακτηρίζονται από καθαρή αλκαλικότητα. Μοιάζουν με τους φυσικούς υγρότοπους και αποτελούνται από διάφορα τμήματα, τα οποία ονομάζονται “λεκάνες”. Ο πυθμένας τους αποτελείται από υλικά (φυσικά ή συνθετικά), τα οποία χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά χαμηλή διαπερατότητα, ώστε να αποφεύγονται διαρροές εκχυλισμάτων προς τα υπόγεια νερά. Το υπόστρωμά τους είναι συνήθως εδαφικό υλικό, το οποίο υποστηρίζει την ανάπτυξη βλάστησης. Το νερό, το οποίο ρέει σε κάθε λεκάνη χαρακτηρίζεται από μικρό βάθος (10-50 εκ.).



Σχήμα 8: Σχηματική αναπαράσταση αερόβιου υγρότοπου.

Στα συστήματα αυτά λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις οξείδωσης, με αποτέλεσμα τα μεταλλικά ιόντα να απομακρύνονται καταβυθιζόμενα υπό μορφή υδροξειδίων, οξυυδροξειδίων και οξειδίων.

Συνεπώς, ο κύριος ρόλος των λεκανών ενός αερόβιου τεχνητού υγρότοπου είναι η οξείδωση του δισθενούς σιδήρου στη ζώνη αερισμού και η καταβύθιση υδροξειδίων του τρισθενούς σιδήρου. Η παραγόμενη οξύτητα από την υδρόλυση του σιδήρου εξουδετερώνεται, στην περίπτωση που το διάλυμα περιέχει αλκαλικότητα και το pH διατηρείται στην περιοχή 5,5-6,5, επιταχύνοντας έτσι την καταβύθιση του σιδήρου και άλλων στοιχείων, όπως το μαγγάνιο. Το αρσενικό απομακρύνεται προσροφούμενο στην επιφάνεια των υδροξειδίων του σιδήρου.

Αναερόβιοι υγρότοποι: Οι αναερόβιοι υγρότοποι (βλ. σχήμα 9) κατασκευάζονται όπως και οι αερόβιοι, με τη διαφορά ότι στον πυθμένα των λεκανών αποτίθεται ένα παχύ στρώμα οργανικού υλικού (30-45 cm). Το στρώμα αυτό συνήθως κατασκευάζεται με χρήση φθινών φυσικών οργανικών υλικών, όπως παραπροϊόντα επεξεργασίας μανιταριών, κόπρανα αλόγων και αγελάδων, δέματα σανού, τύρφη, πριονίδια και φλοιίδες ξύλου.

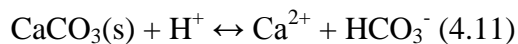
Το οργανικό στρώμα χρησιμοποιείται για τη δημιουργία αναερόβιων συνθηκών και την επιτάχυνση της χημικής και βακτηριακής παραγωγής αλκαλικότητας (με τη δράση θειοαναγωγικών βακτηρίων), με σκοπό να εξουδετερωθεί η περιεχόμενη οξύτητα των υγρών αποβλήτων. Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν παράγεται επαρκής αλκαλικότητα, λόγω της μικρής περιεκτικότητας του οργανικού στρώματος σε ανθρακικό ασβέστιο απαιτείται προσθήκη ασβεστολίθου.



Σχήμα 9: Σχηματική αναπαράσταση αναερόβιου υγρότοπου.

Οι αναερόβιοι υγρότοποι χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, τα οποία περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις διαλελυμένου οξυγόνου, τρισθενούς σιδήρου και αλουμινίου και οξύτητα που υπερβαίνει τα 300 mg/L CaCO<sub>3</sub>. Η ροή των υγρών αποβλήτων κατευθύνεται διά μέσου του οργανικού υλικού ώστε η όλη διεργασία να λαμβάνει χώρα σε αναερόβιες συνθήκες.

Ανοξικοί Ασβεστολιθικές τάφροι: Όπως είναι γνωστό, η ροή όξινων υδάτων (pH<6) πάνω από ένα στρώμα ασβεστολίθου προσφέρει στο διάλυμα αλκαλικότητα και οδηγεί σε αύξηση του pH σε τιμές μεγαλύτερες του 7, σύμφωνα με την αντίδραση:



Τα παθητικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, τα οποία βασίζονται σε αυτή τη φιλοσοφία, είναι γνωστά ως Ανοξικοί Ασβεστολιθικές τάφροι (βλ. σχήμα 10) και χρησιμοποιούνται συνήθως ως στάδιο προεπεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, πριν αυτά οδηγηθούν σε αερόβιους υγρότοπους.

Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν την κατασκευή ενός αγωγού με ασβεστολιθικό υπόστρωμα, ο οποίος συνήθως απομονώνεται από το περιβάλλον με την κατασκευή ενός αργιλικού καλύμματος σημαντικού πάχους. Σε αρκετές περιπτώσεις, μεταξύ του αγωγού με το ασβεστολιθικό υπόστρωμα και του αργιλικού καλύμματος τοποθετείται πλαστική μεμβράνη με σκοπό την απομόνωση του αγωγού και την πλήρη αποφυγή εισροής ατμοσφαιρικού οξυγόνου.



Σχήμα 10: Σχηματική αναπαράσταση Ανοξικής Ασβεστολιθικής Τάφρου.



Τα στεγανά ασβεστολιθικά συστήματα χρησιμοποιούνται ως στάδιο προεπεξεργασίας της ΟΑΜ. Η ΟΑΜ πριν από την έκθεσή της στην ατμόσφαιρα, χαρακτηρίζεται συνήθως από χαμηλή συγκέντρωση οξυγόνου και υψηλή συγκέντρωση ιόντων δισθενούς σιδήρου. Η ροή των αποβλήτων αυτών διά μέσου στεγανών ασβεστολιθικών συστημάτων τους παρέχει σημαντική αλκαλικότητα,. Η προκύπτουσα απορροή (στην έξοδο των στεγανών ασβεστολιθικών συστημάτων) χαρακτηρίζεται από pH 6,5-7,5 και αλκαλικότητα 300 mg CaCO<sub>3</sub>/L. Στα συστήματα αυτά μπορεί επιπλέον να πραγματοποιηθεί και μερική απομάκρυνση ιόντων Fe<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> και Mn<sup>2+</sup>, τα οποία καταβυθίζονται υπό μορφή ανθρακικών ενώσεων.

Η αποτελεσματικότητα των ανοξικών ασβεστολιθικών τάφρων μειώνεται, στις περιπτώσεις κατά τις οποίες τα υγρά απόβλητα περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις τρισθενών ιόντων σιδήρου, αλουμινίου και διαλελυμένου οξυγόνου. Η παρουσία των μεταλλικών αυτών ιόντων προκαλεί καταβύθιση υδροξειδίων των αντιστοιχών μετάλλων λόγω της επαφής των διαλυμάτων με τον ασβεστόλιθο, με αποτέλεσμα να επικαλύπτεται ο ασβεστόλιθος από τα παραγόμενα ιζήματα και να αναστέλλεται σημαντικά η δράση του. Η παρουσία διαλελυμένου οξυγόνου (>1 mg/L) επιταχύνει την οξείδωση των ιόντων του δισθενούς σιδήρου που περιέχονται στα υγρά απόβλητα προς τρισθενή. Για τους λόγους αυτούς είναι προτιμότερο η όξινη απορροή, η οποία προέρχεται από υπόγεια μεταλλευτικά έργα, να διοχετεύεται στα στεγανά ασβεστολιθικά συστήματα, πριν έλθει σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα.

#### **3.4.2.4. Επιλογή, Μέγεθος και Απόδοση Τεχνητών Υγροτόπων**

Η απαιτούμενη επιφάνεια των αερόβιων λεκανών υπολογίζεται<sup>[2]</sup> με βάση το συντελεστή επιφανειακής φόρτισης του υγροτόπου (area loading factor), ο οποίος αναφέρεται στην ποσότητα των ρυπαντών (ιόντων) που απομακρύνονται ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου. Το μέγεθος των αναερόβιων λεκανών προσδιορίζεται με βάση το συντελεστή ογκομετρικής φόρτισης του υγροτόπου (volumetric loading factor), ο οποίος εκτιμάται ως 0,3 mol διαλελυμένου μετάλλου ανά m<sup>3</sup> πλούσιου σε οργανικά υποστρώματος και ανά ημέρα. Η υπόθεση αυτή βασίζεται στην παραδοχή ότι 1 m<sup>3</sup> υποστρώματος παράγει 0,3 moles H<sub>2</sub>S ανά ημέρα, το οποίο στοιχειομετρικά απομακρύνει 0,3 moles ισοδύναμης ποσότητας μετάλλου υπό μορφή θειούχων ενώσεων. Αποτελεσματικότερη επεξεργασία της όξινης απορροής εντός του αναερόβιου υγροτόπου επιτυγχάνεται με τη συνεχή διατήρηση αναερόβιων συνθηκών. Αυτό μπορεί να

επιτευχθεί, εάν προσδιορισθούν με ακρίβεια τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του οργανικού υλικού, ώστε να αποφευχθεί πλημμύρισμα της λεκάνης.

Πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη ότι οι τεχνητοί υγρότοποι δεν σχεδιάζονται με σκοπό να λειτουργούν στο διηνεκές. Η αποδοτικότητά τους μειώνεται με την πάροδο του χρόνου τόσο λόγω της πλήρωσης των λεκανών τους από τις καταβυθιζόμενες ενώσεις, όσο και λόγω της αλλαγής των χαρακτηριστικών της εισερχόμενης απορροής (αύξηση ή μείωση του pH, της συγκέντρωσης διαφόρων ρυπαντών κ.λπ.). Οι αερόβιοι υγρότοποι θεωρείται ότι είναι αποδοτικοί, έως τη χρονική στιγμή κατά την οποία η διαθέσιμη επιφάνειά τους πληρωθεί από τα καταβυθιζόμενα υδροξείδια. Για την αύξηση του χρόνου ζωής τους πρέπει να απομακρύνεται η σχηματιζόμενη ιλύς. Εάν αυτό δεν θεωρείται εύκολο τότε θα πρέπει να κατασκευαστούν περισσότερες λεκάνες. Οι αναερόβιοι υγρότοποι θεωρούνται αποδοτικοί έως την χρονική στιγμή που περιέχουν ικανή ποσότητα ενεργού οργανικού υλικού.

## Κεφάλαιο 4

### ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

#### 4.1 Κριτήρια σύγκρισης βέλτιστης τεχνολογίας αντιμετώπισης της OAM

##### 4.1.1 Τεχνολογικά κριτήρια

1) Αξιοπιστία μεθόδου (κριτήριο 1.1): Ορίζεται ως η ικανότητα μίας μεθόδου να δίδει αναπαραγωγίσιμα αποτελέσματα όταν επιφέρονται σκοπούμενες μικροαλλαγές των πειραματικών συνθηκών που είναι δυνατό να εφαρμοστούν κατά την χρήση μιας μεθόδου σε βάθος χρόνου<sup>[4]</sup>.

Η έννοια της αξιοπιστίας συμπεριλαμβάνει τις έννοιες της ακρίβειας, της ευαισθησίας και της μετρούμενης αβεβαιότητας η οποία πρέπει να βρίσκεται εντός αποδεκτών ορίων<sup>[5,6]</sup>. Υπενθυμίζεται ότι για να είναι ένα μετρούμενο μέγεθος πλήρως ορισμένο πρέπει να αναφέρεται και η τιμή της διευρυμένης αβεβαιότητάς του που συνήθως αφορά επίπεδο εμπιστοσύνης 95%<sup>[7]</sup>.

Είναι προφανές ότι για να καταστεί μία μέθοδος αξιόπιστη πρέπει να εμφανίζει καθόλου ή ελάχιστη ευαισθησία σε μικρές μεταβολές των πειραματικών συνθηκών.

2) Αποδοτικότητα μεθόδου (κριτήριο 1.2): Αφορά στο βαθμό που η εφαρμοζόμενη μέθοδος επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα (π.χ. μείωση της συγκέντρωσης βαρέων ή τοξικών μετάλλων).

Το κριτήριο αυτό αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες κατά την επιλογή μιας μεθόδου επεξεργασίας ΟΑΜ. Συνήθως μειώνεται με την πάροδο του χρόνου τόσο λόγω της κάλυψης της επιφάνειας από τις καταβυθιζόμενες ενώσεις όσο και λόγω της αλλαγής των χαρακτηριστικών της εισερχόμενης απορροής (αύξηση ή μείωση του pH, της συγκέντρωσης διαφόρων ρύπων κ.λ.π.)

- 3) Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής της μεθόδου (κριτήριο 1.4): Αναφέρεται στον ελάχιστο χρόνο εφαρμογής ώστε η μέθοδος να αρχίσει να επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα και ποιος είναι ο μέγιστος χρόνος εφαρμογής πέρα από τον οποίο δεν επέρχονται σημαντικές μεταβολές στην επεξεργαζόμενη ΟΑΜ.
- 4) Πλήθος ρυπαντών (κριτήριο 1.5): Εξετάζει εάν η εφαρμοζόμενη μέθοδος είναι αποτελεσματική στο σύνολο των κυριότερων ρυπαντών (βαρέα ή τοξικά μέταλλα) ή είναι αποτελεσματική μόνο για ορισμένους από αυτούς (π.χ. μόνο για το As).
- 5) Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου (κριτήριο 1.6): Ελέγχεται εάν μία μέθοδος που δεν επιφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα έχει περιθώρια βελτίωσης. Τα περιθώρια αυτά εξετάζονται τόσο ως προς την εφαρμοζόμενη τεχνολογία όσο και ως προς το κόστος εφαρμογής της βελτιωμένης μεθόδου.
- 6) Ωριμότητα της τεχνολογίας (κριτήριο 1.7): Ελέγχεται εάν η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι ευρέως διαδεδομένη και συνεπώς είναι γνωστά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της ή εάν απαιτείται πολύ εξειδικευμένη τεχνολογία με όσα αρνητικά αυτό συνεπάγεται (π.χ. υψηλό κόστος ή ενδεχόμενες τεχνικές αστοχίες).

#### 4.1.2 Οικονομικά κριτήρια

- 1) Σταθερό κόστος (Capital Cost) (κριτήριο 2.1): Αφορά στις δαπάνες εγκατάστασης (π.χ. έξοδα ενοικίασης χώρου ή εξοπλισμού, κόστος εγκατάστασης εξοπλισμού)<sup>[8,9]</sup>.
- 2) Κόστος λειτουργίας (Operating Cost) (κριτήριο 2.2): Είναι το κόστος που μεταβάλλεται σε μηνιαία βάση και περιλαμβάνει τα έξοδα συντήρησης του εξοπλισμού, μισθούς, κόστος πρώτων υλών, κόστος χρησιμοποιούμενης ενέργειας<sup>[8]</sup>, κλπ. Στο κριτήριο 2.2 περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:  
Κόστος συλλογής και αποθήκευσης του επεξεργασμένου αποβλήτου (κριτήριο 2.3): Πολλές μέθοδοι επί τόπου επεξεργασίας χαρακτηρίζονται από την παραγωγή μεγάλου όγκου τελικού προϊόντος (π.χ. ιλύος ή αέρια προϊόντα τα οποία πρέπει να συλλεγούν). Σε τέτοιες περιπτώσεις το κόστος αυτό είναι αρκετά σημαντικό και επηρεάζει καθοριστικά το συνολικό κόστος μιας μεθόδου.

4) Κόστος επεξεργασίας του αποβλήτου (κριτήριο 2.4): Σε ορισμένες μεθόδους γίνεται προσπάθεια ανάκτησης μεταλλικών αξιών από την παραγόμενη ιλύ ώστε αυτή να μην παραμένει απλώς ένα αδιάθετο προϊόν αλλά να μπορεί να επιφέρει έμμεσα κάποιο κέρδος. Μάλιστα τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την χρήση παραγόμενων ιλύων στη βιομηχανία. Η ίδια προσπάθεια γίνεται και για την αξιοποίηση τυχόν αέριων προϊόντων (π.χ. συλλογή αερίου υδρόθειου και επαναχρησιμοποίησή του σε κάποιο στάδιο της εφαρμοζόμενης μεθόδου).

5) Κόστος αποκατάστασης του φυσικού τοπίου (κριτήριο 2.5): Ένα σημαντικό ποσοστό από τις εφαρμοζόμενες μεθόδους επιφέρει δυσμενείς επιπτώσεις στο φυσικό τοπίο. Είναι επομένως επιθυμητό να γίνουν διορθωτικές ενέργειες ώστε να αποκατασταθεί η εικόνα του τοπίου. Όπου αυτό είναι δυνατό, απαιτεί συντονισμένες ενέργειες, ευαισθητοποίηση από μέρους των υπευθύνων της λειτουργίας μιας μονάδος επί τόπου επεξεργασίας ΟΑΜ και βεβαίως όλα αυτά συνεπάγονται κάποιο κόστος που αν και δεν είναι πάντα πολύ υψηλό πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στον οικονομικό προϋπολογισμό μιας μεθόδου.

6) Ενεργειακές απαιτήσεις (κριτήριο 3.4): Ελέγχεται εάν η ενέργεια που απαιτεί κάθε μέθοδος προέρχεται ή όχι από ανανεώσιμες πηγές. Εάν οι πηγές ενέργειας είναι μη ανανεώσιμες τότε δίδεται ιδιαίτερη βαρύτητα τόσο στην ποσότητά τους όσο και στο κατά πόσο επιβαρύνουν το περιβάλλον.

#### **4.1.3 Περιβαλλοντικά κριτήρια**

1) Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων (κριτήριο 3.1): Εξαρτάται από το είδος των αποβλήτων που προέρχεται από κάθε μέθοδο και την ποιότητά τους. Αυτό που ελέγχεται κυρίως είναι εάν η σύσταση των επεξεργασμένων αποβλήτων πληροί τα κριτήρια ασφαλούς διάθεσής τους στο περιβάλλον.

2) Χρήση πρώτων υλών (κριτήριο 3.3): Εξετάζεται το είδος των πρώτων υλών που χρησιμοποιεί κάθε μέθοδος και ελέγχεται εάν αυτές είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Εάν δεν είναι περιβαλλοντικά φιλικές, συνυπολογίζονται (α) η απαιτούμενη ποσότητα πρώτων υλών, (β) η αναγκαιότητα αποθήκευσης και τα (γ) τα μέτρα ασφάλειας για διαρροές.

4) Απαιτήσεις γης (κριτήριο 3.5): Αξιολογείται η έκταση γης που χρειάζεται κάθε μέθοδος για να λειτουργήσει αποτελεσματικά

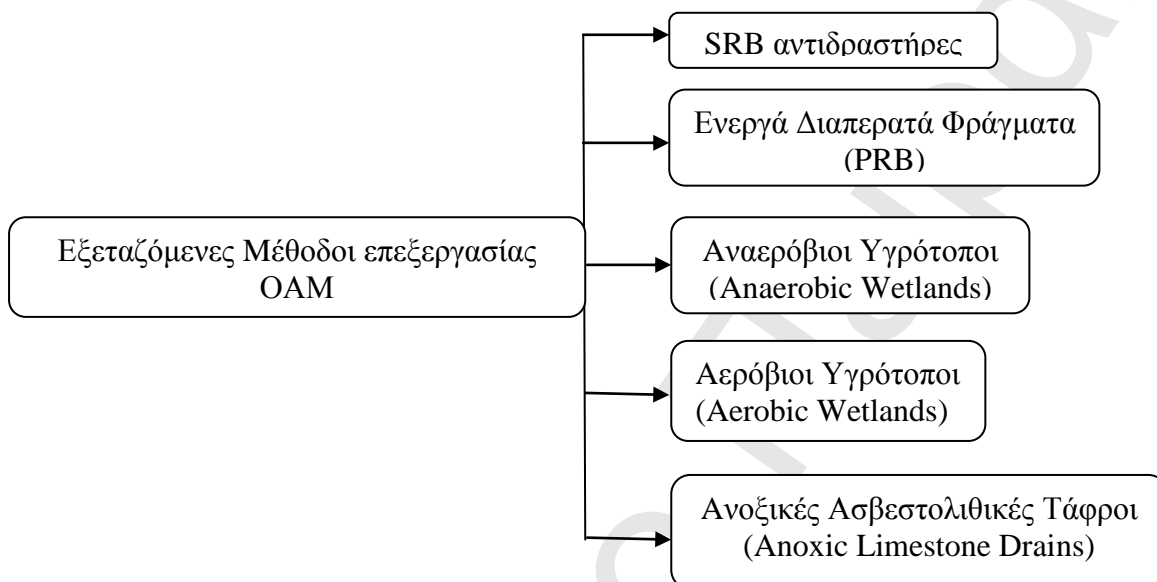


Σχήμα 11: Συνοπτική καταγραφή των κριτηρίων αξιολόγησης μεθόδων επί τόπου επεξεργασίας Ώξινης Απορροής Μεταλλείων.

## Κεφάλαιο 5

### Αναλυτική παρουσίαση περιπτώσεων μελέτης (case studies)

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν οι παρακάτω μέθοδοι επεξεργασίας ΟΑΜ:



### 5.1 Μέθοδος SRB αντιδραστήρων

#### Case study 1

##### Wheal Jane Pilot Passive Treatment Plant<sup>[10]</sup>

**Τόπος:** Wheal Jane ορυχείο, στο Carnon Valley, Cornwall, UK

**Συνήθεις καιρικές συνθήκες:** Η περιοχή έχει μέση θερμοκρασία 10-12<sup>0</sup>C

**Χρόνος:** 2000-2002

**Σύσταση εισερχόμενης ΟΑΜ:** Η προς επεξεργασία ΟΑΜ προερχόταν από ένα σύστημα υπόγειων σωληνώσεων και είχε αρχικό pH 3 ενώ οι συγκεντρώσεις των κυριότερων μετάλλων ήταν: Fe 161,3 mg/l, Al 12,4 mg/l, Zn 41,9 mg/l.

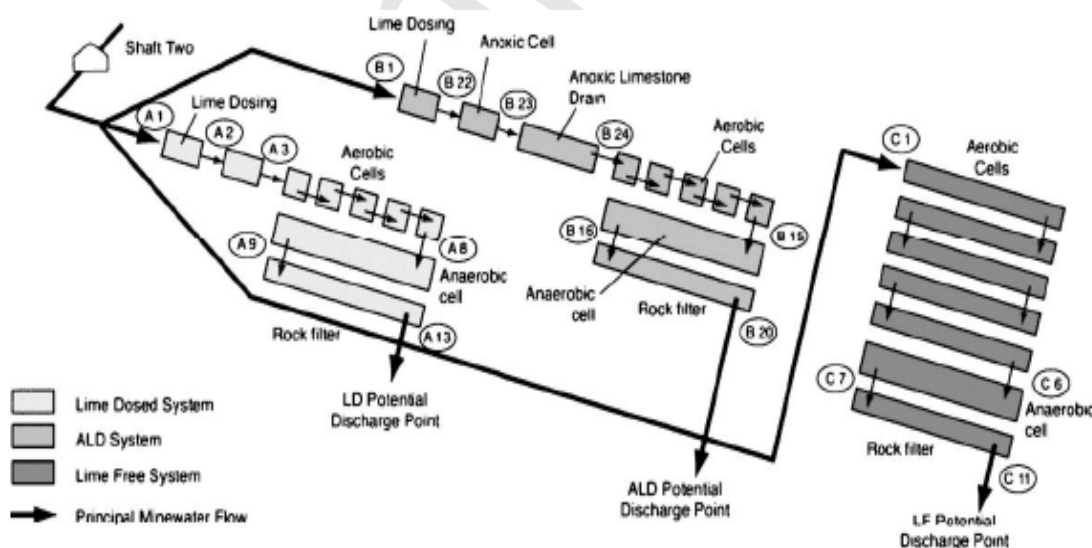
**Περιγραφή του συστήματος:** Πρόκειται για ένα ιδιαίτερο σύστημα το οποίο περιλαμβάνει ουσιαστικά τρία άλλα πολυκαναλικά υποσυστήματα που το καθένα με διαφορετικό τρόπο προσπαθεί να αυξήσει το pH. Το ένα υποσύστημα χρησιμοποιεί ανθρακικό ασβέστιο (LD), το άλλο είναι μία ανοξική ασβεστολιθική τάφρος (ALD), και το τρίτο είναι ένα σύστημα που δεν περιέχει ασβέστιο (LF, Lime-free). Επειδή τα υποσυστήματα αυτά συνδέονται, το σύστημα ALD αποτελεί και πάλι έναν άλλο τροφοδότη ασβεστίου.

Σε κάθε υποσύστημα το προς επεξεργασία υγρό περνάει μέσα από έναν αερόβιο υγροβιότοπο για την απομάκρυνση πρώτα του σιδήρου και του αρσενικού. Μετά απομακρύνονται τα βαρέα μέταλλα και τα θειικά ιόντα καθώς η απορροή περνάει μέσα από ένα αναερόβιο κελί. Το κελί αυτό είναι εξ ολοκλήρου υπόγειο. Οι διαστάσεις του είναι:

- Μήκος: 87,5 m
- Πλάτος: 8,75 m
- Βάθος: 1 m

και υπολογίστηκαν με βάση το γεγονός ότι ο συντελεστής ογκομετρικής φόρτισης είναι  $0,3 \text{ mol/m}^3/\text{ημέρα}$ , ενώ για τον υπολογισμό της επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε συντελεστής επιφανειακής φόρτισης ίσος με  $20 \text{ m}^2/1/\text{ημέρα}$ . Το κελί περιέχει μεμβράνες πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE) και για να διατηρούνται οι αναερόβιες συνθήκες το μίγμα καλύφθηκε από 0,4 m χώματος και χαλικιού.

Το τελικό στάδιο περιλαμβάνει το πέρασμα μέσα από ένα αερόβιο φίλτρο για την κατακράτηση του μαγνησίου (βλ. Σχήμα 12). Το υποσύστημα LF παρέμεινε κλειστό από τον Αύγουστο του 2000 έως τον Ιούνιο του 2001 λόγω απόφραξης του κύριου σωλήνα. Επομένως όλα τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας αναφέρονται στο διάστημα λειτουργίας Ιούνιος 2001-Σεπτέμβριος 2002.



Σχήμα 12<sup>[10]</sup>: Παθητικό σύστημα επεξεργασίας ΟΑΜ που εφαρμόστηκε στο ορυχείο Wheal Jane, στο Carnon Valley, Cornwall, UK.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Η μέθοδος δεν είναι ιδιαίτερα αξιόπιστη διότι η σύσταση της εξερχόμενης απορροής μεταβαλλόταν αισθητά ανάλογα με την εποχή και επειδή λόγω λανθασμένου σχεδιασμού των συστημάτων, το νερό της βροχής εισερχόταν στα αερόβια κελιά γεγονός που δυσκόλευε την λειτουργία των βιοαντιδραστήρων. Ακόμη, η αποδοτικότητα του ενός αντιδραστήρα (LF) μειωνόταν συνεχώς με τον χρόνο και τελικά τέθηκε εκτός λειτουργίας για δέκα μήνες λόγω απόφραξης στον κύριο σωλήνα του. Απαιτείται, λοιπόν, προσεκτική ρύθμιση των συνθηκών και συνεχής παρακολούθηση της διεργασίας.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Η μέθοδος είναι σχετικά αποδοτική. Στην εξερχόμενη απορροή παρατηρήθηκε μείωση της συγκέντρωσης όλων των μετάλλων (αλλά λιγότερο για τον σίδηρο) και επίσης η απορροή είχε ικανοποιητικό pH (έφτασε έως το 6). Όμως παρατηρήθηκε μικρός πληθυσμός μικροβίων στους βιοαντιδραστήρες προφανώς λόγω του χαμηλού pH της εισερχόμενης απορροής (σύμφωνα με τις αναλύσεις).

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Fe, Al, Zn

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Κρίνεται ότι υπάρχουν θετικές προοπτικές εξέλιξης εάν γίνουν οι εξής βελτιώσεις:

- Οι βιοαντιδραστήρες πρέπει να βρίσκονται πάνω από το σύστημα των αερόβιων κελιών ώστε η όξινη απορροή που εισέρχεται σε αυτούς να μην χαρακτηρίζεται από υψηλή οξύτητα.
- Πρέπει να αποτραπεί η εισροή νερού της βροχής στο σύστημα.
- Χρειάζεται να δοθεί περισσότερος χρόνος λειτουργίας στους βιοαντιδραστήρες.

Αναφέρεται επίσης ότι ο μέσος όγκος επεξεργαζόμενου υλικού ήταν 36L/min και ο μέγιστος όγκος επεξεργαζόμενου υλικού: 114L/min

### 2) Οικονομικά κριτήρια<sup>2</sup>

**Κριτήριο 2.1 (Σταθερό Κόστος):** 2,26 εκατομμύρια δολ./36L/min επεξεργαζόμενης ΟΑΜ

**Κριτήριο 2.2 (Λειτουργικό Κόστος):**

<sup>2</sup> Στα αναφερόμενα κόστη έχει γίνει αποπληθωρισμός



Κόστος παρακολούθησης και λειτουργίας:

332500 δολ./έτος (για μέσο όγκο επεξεργαζόμενου υλικού 36L/λεπτό)

**Κριτήριο 2.5 (Κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου):** Ελάχιστο αφού δεν αναφέρεται αρνητική επίδραση της μεθόδου στο φυσικό τοπίο.

### 3) Περιβαλλοντικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Μίγμα από πριονίδια (95%), σανός (5%), κόπρανα αγελάδων, χαλίκι. Δεν ενέχουν κινδύνους για το περιβάλλον.

**Κριτήριο 3.5 (Απαιτήσεις γης):** Πιθανόν απαιτείται αρκετή έκταση γης αφού η μέθοδος περιλαμβάνει τρία πολυκαναλικά υποσυστήματα. Δεν υπάρχουν όμως ακριβή αριθμητικά στοιχεία.

## Case study 2

### Βιοαντιδραστήρας στο Doe Run West Fork ενεργό ορυχείο εξόρυξης Pb και Zn<sup>[10]</sup>

**Τόπος:** περιοχή Reynolds στο Missouri

**Χρόνος λειτουργίας:** 8 έτη (Αρχή λειτουργίας 1996)

**Συνήθεις καιρικές συνθήκες:** Η περιοχή έχει μέση θερμοκρασία 13°C

**Χρόνος ζωής της εγκατάστασης (κατά τον αρχικό σχεδιασμό):** 30 έτη

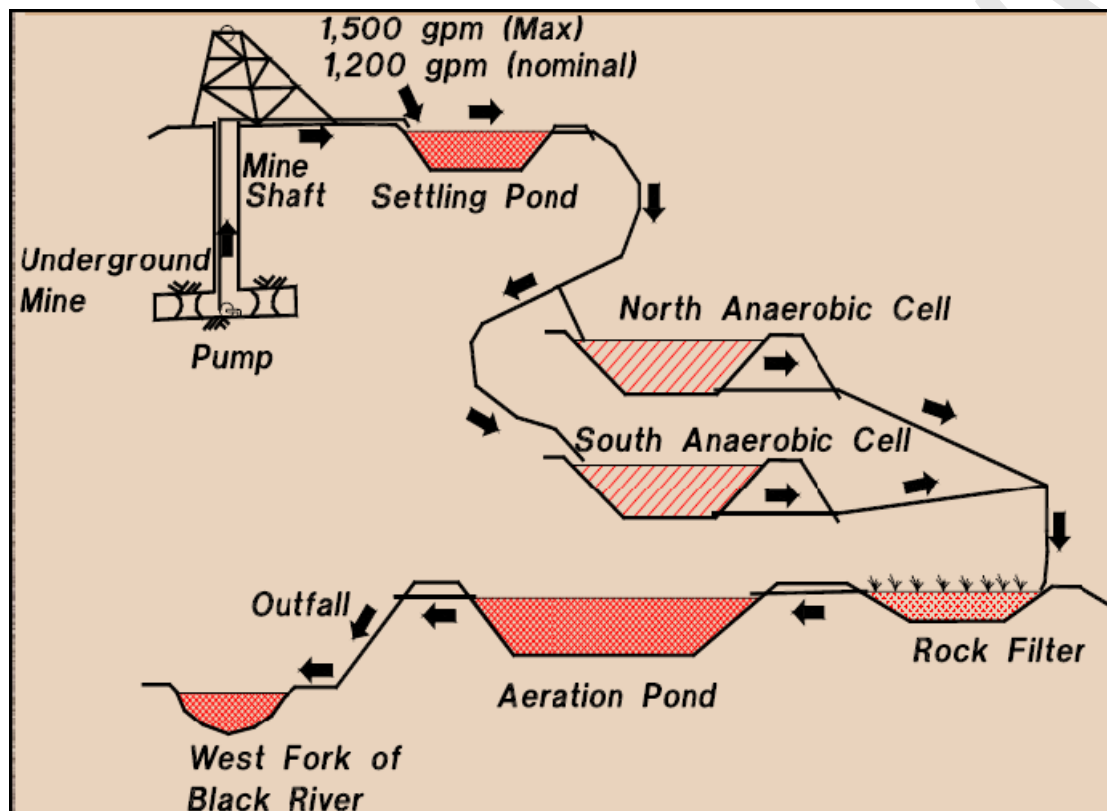
**Περιγραφή του συστήματος:** Το νερό αντλείται από το ορυχείο και αρχικά πηγαίνει σε μία δεξαμενή καθίζησης ενώ έπειτα αξιοποιείται η βαρύτητα και περνάει μέσα από τους υπόλοιπους αντιδραστήρες. Τα κύρια μέρη του παθητικού αυτού συστήματος είναι 2 παράλληλα αναερόβια κελιά (βιοαντιδραστήρες), ένα βραχώδες φίλτρο έκτασης 2300 m<sup>2</sup> και βάθους 0,3m, και μία λίμνη αερισμού έκτασης 3200 m<sup>2</sup> (βλ. σχήμα 14). Κάθε βιοαντιδραστήρας έχει έκταση 1900 m<sup>2</sup> και το υπόστρωμά του αποτελείται από ζώνες που περιέχουν μίγμα από 67% πριονίδια, 19% ασβεστόλιθο, 12% συμπιεσμένα κόπρανα αγελάδων και έχει συνολικό πάχος 1,8 m. Πάνω από το υπόστρωμα υπάρχει μία ζώνη συμπιεσμένου ασβεστολίθου ενώ το γένος των χρησιμοποιούμενων βακτηρίων είναι το *Leptothrix discophora* (βλ. Σχήμα 13).

### 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Είναι αξιόπιστη. Δεν υπάρχουν στοιχεία για το αντίθετο

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Γενικά η μέθοδος είναι αποδοτική. Ιδιαίτερα σε ότι αφορά την απομάκρυνση του Pb το σύστημα εμφανίζει ικανοποιητική απόδοση ακόμα

και σε υψηλές παροχές όξινης απορροής. Πιο συγκεκριμένα, η εξερχόμενη απορροή περιέχει συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων που βρίσκονται εντός των προβλεπομένων από την EPA (US Environmental Protection Agency) ορίων (Pb από 0,027 έως 0,5 mg/l, Zn < 0,05 mg/l, θειικά ιόντα < 140 mg/l και pH = 7,8).



Σχήμα 13<sup>[10]</sup>: Παθητικό σύστημα επεξεργασίας ΟΑΜ που εφαρμόστηκε στο ορυχείο Doe Run West Fork ενεργό ορυχείο στην περιοχή Reynolds στο Missouri.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

Εμφανίστηκαν κάποια προβλήματα στην απρόσκοπτη ροή της απορροής μέσα στο σύστημα (καθώς μειώθηκε η διαπερατότητα του υποστρώματος σε ένα αναερόβιο κελί μετά από έξι εβδομάδες λειτουργίας), για τον λόγο αυτό πρέπει να προσέχουμε σε τέτοια συστήματα να υπάρχει τρόπος για συνεχή πρόσβαση στο υπόστρωμα.

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Pb, Zn, θειικά ιόντα

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Κρίνεται ότι υπάρχουν θετικές προοπτικές εξέλιξης εάν λαμβάνεται μέριμνα κατά το σχεδιασμό να υπάρχει πρόσβαση στο οργανικό υπόστρωμα των βιοαντιδραστήρων ώστε με μικρές τροποποιήσεις να

επιλύονται προβλήματα που προκύπτουν από την ανάπτυξη άλγεων ή την παρουσία μικρών καταβυθισμάτων που φράζουν τους πόρους του υποστρώματος.

Αναφέρεται επίσης ότι ο μέσος όγκος επεξεργαζόμενου υλικού ήταν 4540 L/min και μέγιστος όγκος επεξεργαζόμενου υλικού ήταν 5680 L/min.

## 2) Οικονομικά κριτήρια (Στα αναφερόμενα κόστη έχει γίνει αποπληθωρισμός)

### **Κριτήριο 2.1 (Σταθερό Κόστος):**

Κόστος κατασκευής: 730000 δολ./ 4540L/min επεξεργαζόμενης OAM

**Κριτήριο 2.5 (Κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου):** Ελάχιστο αφού δεν αναφέρεται αρνητική επίδραση της μεθόδου στο φυσικό τοπίο.

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία όμως η μέθοδος αυτή δεν καταναλώνει πολλή ενέργεια γιατί ενέργεια απαιτείται μόνο στην αρχή για την άντληση της απορροής. Μετά η απορροή μεταφέρεται μέσω της βαρύτητας.

## 3) Περιβαλλοντικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Μπορούν να διατεθούν με ασφάλεια αφού η εξερχόμενη απορροή περιέχει συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων που βρίσκονται εντός των προβλεπομένων ορίων από την EPA.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Μίγμα από πριονίδια, ασβεστόλιθο, κόπρανα αγελάδων δηλ. υλών ακίνδυνων για το περιβάλλον.

**Κριτήριο 3.5 (Απαιτήσεις γης):** Η συνολική έκταση της όλης εγκατάστασης είναι 20000 m<sup>2</sup>

## Case study 3

Επί τόπου βιοαντιδραστήρας στο εγκαταλελειμένο ορυχείο Lilly Orphan Boy<sup>[10]</sup>

**Τόπος:** 11 μίλια βόρεια από το Elliston, Montana

**Χρόνος λειτουργίας:** 11 έτη (1994-2005)

**Συνήθεις καιρικές συνθήκες:** Πολλές φορές υπάρχει σφοδρή χιονόπτωση (εξαιτίας της οποίας η περιοχή είναι δύσκολα προσβάσιμη) ενώ η μέση θερμοκρασία είναι 6<sup>0</sup>C.

**Περιγραφή του συστήματος:** Ο βιοαντιδραστήρας χτίστηκε εντός του ορυχείου. Η όλη κατασκευή έγινε κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο αντιδραστήρας να χωρίζεται ουσιαστικά σε δύο μέρη (βλ. Σχήμα 14). Το υπόστρωμα είχε βάθος 9 μέτρα. Η προς επεξεργασία OAM

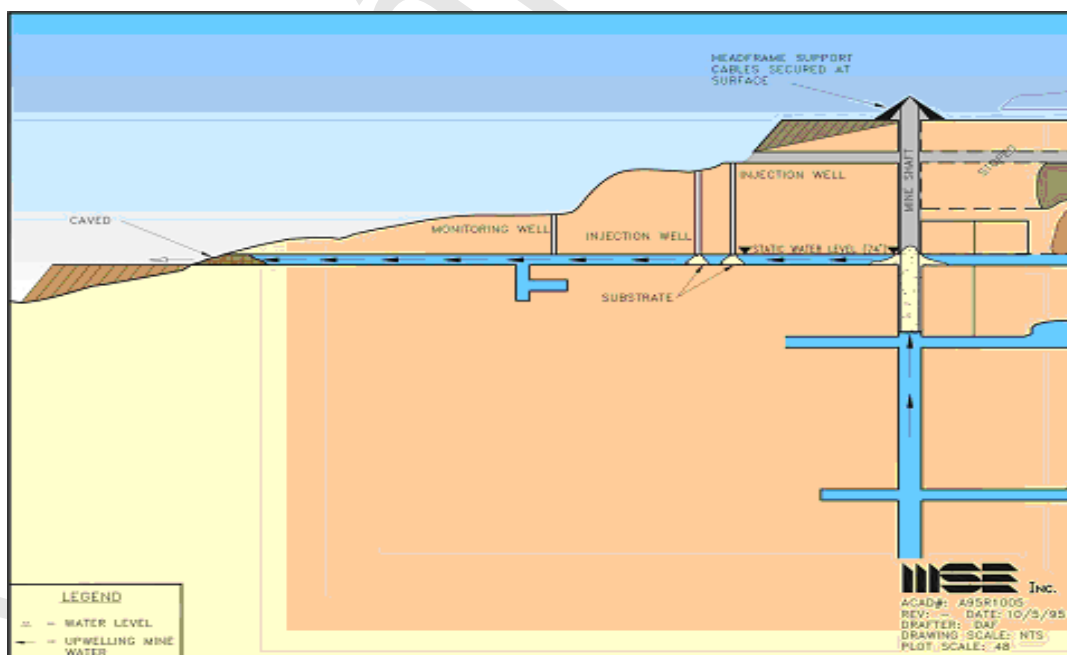
περνάει μέσα από ένα οριζόντιο τούνελ με ρυθμό 11L/min και περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων όπως Al, As, Cd, Cu, Mn, Fe, Zn, S. Το οργανικό υπόστρωμα στον αντιδραστήρα αποτελείται από ένα μίγμα που περιέχει κόπρανα, σανό, ροκανίδια. Δίπλα στον βιοαντιδραστήρα υπάρχουν δύο κάθετα τείχη για την περίπτωση που θα χρειαστεί κάποια επέμβαση σε αυτόν.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Είναι σχετικά αξιόπιστη. Το πρόβλημα εντοπίζεται στο ότι η σύσταση της εξερχόμενης απορροής μεταβάλλεται σημαντικά κατά την διάρκεια του χρόνου. Επίσης παρατηρήθηκε ανάμιξη εντός του τούνελ επεξεργασμένων λημμάτων με την προς επεξεργασία OAM (προφανώς λόγω σφάλματος κατά τον σχεδιασμό του τούνελ). Το πρόβλημα αυτό καταδεικνύει και την ανάγκη μιας εις βάθος γεωφυσικής ανάλυσης της περιοχής πριν σχεδιαστεί και εγκατασταθεί ένα τέτοιο σύστημα ώστε να είναι περισσότερο πιθανή η αναγνώριση και άλλων πηγών οξύτητας.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Η μέθοδος ήταν αρκετά αποτελεσματική τόσο ως προς την αύξηση του pH (ήταν σχεδόν ουδέτερο) όσο και ως προς την μείωση της συγκέντρωσης των περισσότερων μετάλλων. Πρόβλημα όμως υπήρχε με το μαγγάνιο όπου η μείωση έφθασε μόλις το 20%.



Σχήμα 14<sup>[10]</sup>: Παθητικό σύστημα επεξεργασίας OAM που εφαρμόστηκε στο ορυχείο Lilly Orphan Boy που βρίσκεται στην περιοχή Montana.

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Al, As, Cd, Cu, Mn, Fe, Zn, S

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Υπάρχουν δυνατότητες θετικής εξέλιξης της μεθόδου με μικρές παρεμβάσεις (π.χ. με τοποθέτηση φραγμάτων στους αρμούς του βιοαντιδραστήρα) ενώ η αρνητική επίδραση της μεταβολής της ροής που εισέρχεται στον αντιδραστήρα μπορεί να ελαττωθεί με τη χρήση κατάλληλων βαλβίδων στον αντιδραστήρα ή με την δημιουργία μεγαλύτερων χώρων εναπόθεσης του νερού. Επίσης είναι πολύ σημαντικό να γίνεται λεπτομερής γεωφυσική ανάλυση της περιοχής πριν σχεδιαστεί και εγκατασταθεί ένα τέτοιο σύστημα ώστε να είναι περισσότερο πιθανή η έγκαιρη αναγνώριση και άλλων πηγών οξύτητας ώστε να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα.

Τέλος σημειώνεται ότι ο μέσος όγκος του υλικού που επεξεργάζεται το σύστημα αυτό είναι 11 L/min.

### **2) Οικονομικά κριτήρια (Στα αναφερόμενα κόστη έχει γίνει αποπληθωρισμός)**

**Κριτήριο 2.1 (Σταθερό Κόστος):** Χαμηλό. Δεν αναφέρονται όμως συγκεκριμένα αριθμητικά στοιχεία.

**Κριτήριο 2.2 (Λειτουργικό Κόστος):** Χαμηλό αφού δεν απαιτείται συνεχής παρακολούθηση. Δεν υπάρχουν όμως αριθμητικά δεδομένα.

**Κριτήριο 2.5 (Κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου):** Ελάχιστο αφού δεν αναφέρεται αρνητική επίδραση της μεθόδου στο φυσικό τοπίο

### **3) Περιβαλλοντικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Απαιτείται προσοχή κατά την διάθεσή τους στο περιβάλλον διότι η εξερχόμενη απορροή περιέχει μεν συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων που βρίσκονται εντός των προβλεπομένων ορίων όμως υπάρχει πρόβλημα με το μαγγάνιο που παραμένει σε υψηλά επίπεδα.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Μίγμα από σανό, ροκανίδια, κοπριά. Άρα δεν υπάρχει κίνδυνος για το περιβάλλον.

**Κριτήριο 3.5 (Απαιτήσεις γης):** Η μέθοδος αυτή δεν απαιτεί μεγάλες εκτάσεις. Δεν υπάρχουν όμως ακριβή αριθμητικά στοιχεία.

## Case study 4

### Βιοαντιδραστήρας στο εγκαταλελειμένο μεταλλείο Surething mine<sup>[10]</sup>

#### (Εξήγαγε Au, Ag, Zn)

**Τόπος:** 11 μίλια νότια από το Elliston, Montana.

**Χρόνος λειτουργίας:** 4 έτη (2001-2005).

**Συνήθεις καιρικές συνθήκες:** Η περιοχή αυτή έχει δύσκολη προσβασιμότητα και χαρακτηρίζεται από σφοδρές χιονοπτώσεις ενώ η μέση θερμοκρασία είναι 6<sup>0</sup>C.

**Σύσταση εισερχόμενης ΟΑΜ:** Η προς επεξεργασία ΟΑΜ περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (Al, As, Cd, Cu, Fe, Pb, Mn, Zn) και θειϊκών ιόντων ενώ το αρχικό pH είναι πολύ χαμηλό (περίπου 2,6).

**Περιγραφή του συστήματος:** Η λειτουργία του όλου συστήματος στηρίζεται στην εκμετάλλευση της υψομετρικής διαφοράς ώστε να γίνεται μεταφορά της απορροής βάση του φαινομένου της βαρύτητας.

Χρησιμοποιείται συνδυασμός από αναερόβιους και αερόβιους αντιδραστήρες. Το όλο σύστημα αποτελείται από ένα σημείο προεπεξεργασίας έκτασης 28m<sup>2</sup> όπου η ΟΑΜ παραμένει για 4 ώρες, δύο βιοαντιδραστήρες, δύο συνερούς ροής λίμνες καθίζησης και ένα κανάλι αερισμού. Στην αρχή η ΟΑΜ που βγαίνει από το μεταλλείο εισέρχεται στον πρώτο αναερόβιο αντιδραστήρα όγκου 150 m<sup>3</sup> ο οποίος αποτελεί και την πηγή των θειοαναγωγικών βακτηρίων και παραμένει εκεί για 3 ημέρες. Το υπόστρωμα του αντιδραστήρα αυτού αποτελείται από 50% κόπρανα αγελάδων και το υπόλοιπο 50% είναι φλοίδες καρυδιάς. Έπειτα η απορροή πηγαίνει σε έναν αντιδραστήρα που χρησιμοποιεί ασβεστόλιθο και μετά περνάει πάλι σε έναν αναερόβιο αντιδραστήρα που έχει το ίδιο οργανικό μίγμα με τον πρώτο αλλά είναι λίγο μικρότερος από αυτόν (85 m<sup>3</sup>). Μετά από εκεί το φορτίο περνάει μέσα από σωλήνες που αναμιγνύεται με αέρα, περνάει και μέσα από μια δεξαμενή αερισμού ώστε να μειωθεί το θείο και τελικά περνάει μέσα από ένα αερόβιο ασβεστολιθικό στρώμα έκτασης 279 m<sup>2</sup> (είναι ο τρίτος βιοαντιδραστήρας) για να απορροφηθεί το μαγγάνιο.

Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

#### 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Η μέθοδος είναι σχετικά αξιόπιστη. Το πρόβλημα εντοπίζεται στο γεγονός ότι οι σωληνώσεις χρειαζόνταν κατά περιόδους καθαρισμό (για

την απομάκρυνση του καταβυθιζόμενου Fe) και όταν αυτό δεν επαρκούσε τότε ήταν αναγκαία η τοποθέτηση καινούριων σωληνώσεων.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Η μέθοδος είναι πολύ αποτελεσματική στο σύνολό της. Επιτυγχάνεται απομάκρυνση μετάλλων στο 92-99% και του θείου στο 60%, ενώ το pH ξεπερνά το 7 (βλ. πίνακα 1).

Πίνακας 1: Συγκεντρωτικός πίνακας των χαρακτηριστικών της εισερχόμενης και της εξερχόμενης απορροής μετά την επεξεργασία της με το σύστημα που έχει εγκατασταθεί στο μεταλλείο του Surething στη Montana. Όπως φαίνεται η εξερχόμενη απορροή καλύπτει πλήρως τα περιβαλλοντικά όρια<sup>[10]</sup>.

Φυσικά χαρακτηριστικά απορροής	Εισερχόμενη απορροή	Εξερχόμενη απορροή	Περιβαλλοντικά όρια
<b>pH</b>	2,58	7,31	6,5-8,5
<b>Al</b>	29,5	<0,04	0,087
<b>As</b>	0,127	<0,01	0,01
<b>Cd</b>	0,208	<0,00009	0,00076
<b>Cu</b>	2,35	<0,003	0,037
<b>Fe</b>	15	<0,014	0,3
<b>Pb</b>	0,151	0,004	0,015
<b>Mn</b>	26,7	0,037	0,05
<b>Zn</b>	22,7	<0,007	0,338
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	0,11	0,37	4,61
<b>Sulfate</b>	591	239	250

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που παρατηρήθηκε ήταν στη λειτουργία του πρώτου βιοαντιδραστήρα πιθανότατα λόγω της τροφοδότησής του με απορροή που είχε πολύ χαμηλό pH, γεγονός που δεν ευνοούσε την ανάπτυξη των θειοαναγωγικών βακτηριδίων. Ο αντιδραστήρας αυτός αύξησε το pH μόνο μέχρι το 4 και ενώ είχε θετικά αποτελέσματα στην απομάκρυνση Cd, Cu, Fe, Zn δεν επέφερε ουσιαστικά κανένα αποτέλεσμα στην μείωση της συγκέντρωσης του Al και του Fe. Άλλο πρόβλημα ήταν οι σωληνώσεις που χρειάζονταν κατά περιόδους καθαρισμό (για την απομάκρυνση του καταβυθιζόμενου Fe) και αν αυτό δεν επαρκούσε τότε έπρεπε να γίνει τοποθέτηση καινούριων σωληνώσεων

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Al, As, Cd, Cu, Mn, Fe, Zn, Pb, θειϊκά ιόντα

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Υπάρχουν και μάλιστα δεν απαιτούν σοβαρές αλλαγές στη μέθοδο παρά μόνο μικρές σχεδιαστικές παρεμβάσεις π.χ. και άλλους σωλήνες μεταφοράς της απορροής. Όμως απαιτείται να έχει γίνει πρόβλεψη ώστε στο σύστημα των σωληνώσεων να υπάρχει εύκολη προσβασιμότητα.

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Ο πρώτος βιοαντιδραστήρας δεν έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα και πιθανώς να χρειάζεται ορισμένες σχεδιαστικές παρεμβάσεις.

Σημειώνεται ακόμα ότι ο μέσος όγκος του επεξεργαζόμενου υλικού ήταν 7,6 L/min και αντίστοιχα ο μέγιστος όγκος ήταν 38L/min.

## **2) Οικονομικά κριτήρια**

**Κριτήριο 2.1 (Σταθερό Κόστος):** 325000 δολ./ 7,6 L/min επεξεργαζόμενης OAM

**Κριτήριο 2.5 (Κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου):** Ελάχιστο αφού δεν αναφέρεται αρνητική επίδραση της μεθόδου στο φυσικό τοπίο.

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία όμως η μέθοδος αυτή δεν καταναλώνει πολλή ενέργεια γιατί η μεταφορά της απορροής γίνεται με τη χρήση της βαρύτητας.

## **3) Περιβαλλοντικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Μπορούν να αποτεθούν στο περιβάλλον.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Μίγμα από καρυδιά, κόπρανα αγελάδας, ασβεστόλιθο. Επομένως δεν δημιουργούνται κίνδυνοι για το περιβάλλον.

**Κριτήριο 3.5 (Απαιτήσεις γης):** Συνολικά απαιτούμενος όγκος: 3000 m<sup>3</sup>.

Έκταση απαιτούμενου χώρου προεπεξεργασίας της OAM: 28m<sup>2</sup>

Έκταση τρίτου βιοαντιδραστήρα (εκεί μειώνεται η συγκέντρωση του μαγγανίου): 279 m<sup>2</sup>.

Δεν υπάρχουν στοιχεία για την συνολική έκταση γης που απαιτείται.

## **Case study 5**

### **Compost-Free βιοαντιδραστήρας στο εγκαταλελειμένο ορυχείο Leviathan<sup>[10]</sup>**

**Τόπος:** κοντά στο Markleeville στην Καλιφόρνια (δίπλα στα βουνά της Sierra Nevada).

**Χρόνος:** 2 έτη (2003-2005)

**Συνήθειες καιρικές συνθήκες:** Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από χειμώνες μεγάλης διάρκειας με πολλές χιονοπτώσεις.



**Περιγραφή του συστήματος:** Το σύστημα που εφαρμόστηκε (βλ. σχήμα 15) αποτελείται από μία λίμνη αρχικής επεξεργασίας της ΟΑΜ όγκου 28 m<sup>3</sup>, 2 βιοαντιδραστήρες, 2 σταθμούς λίμνες καθίζησης συνεχούς ροής καθώς και ένα κανάλι αερισμού. Επισημαίνεται ότι πηγή άνθρακα για τους SRB αντιδραστήρες αποτελεί η αιθανόλη που χρησιμοποιείται αρχικά ενώ κατά την προεπεξεργασία χρησιμοποιείται καυστικό νάτριο (σε ποσοστό 25%) με το οποίο αναμιγνύεται η ΟΑΜ. Η επιλογή αυτής της βάσης έγινε διότι λόγω των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών της (χαμηλό σημείο πήξης και μεγάλη διαλυτότητα).

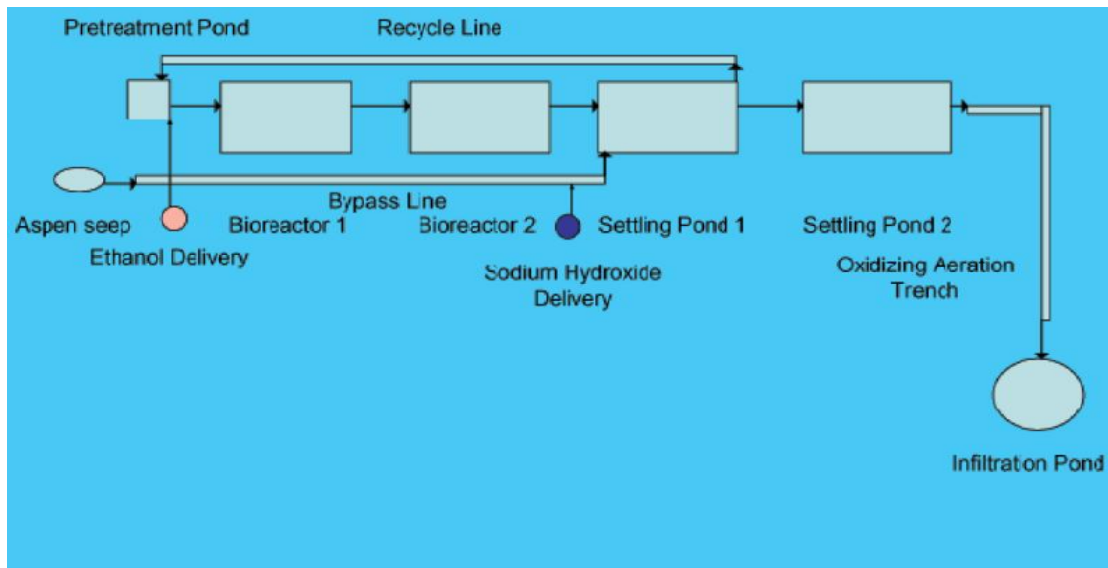
Υπάρχει και ένας δεύτερος τρόπος χρήσης της μεθόδου ο οποίος περιλαμβάνει την ανακύκλωση της απορροής σε κάποιο σημείο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται το εξής: Η λειτουργία των βιοαντιδραστήρων έχει σαν κύριο στόχο μόνο το να αποτελέσουν πηγή θείου και όχι να συνεισφέρουν στην αύξηση του pH ή στην καταβύθιση των μετάλλων. Αυτό καθίσταται εφικτό αφού η απορροή που εισέρχεται σε αυτούς έχει ήδη pH 7 (που το έχει αποκτήσει κατά την προεπεξεργασία της) ενώ η καταβύθιση των μετάλλων πραγματοποιείται στις λίμνες καθίζησης.

Σε αυτή την περίπτωση η ΟΑΜ οδηγείται κατευθείαν στο σημείο λίμνη καθίζησης όπου ανακατεύεται με το καυστικό νάτριο και μετά πηγαίνει στη δεύτερη λίμνη καθίζησης. Από εκεί φεύγει και μετά αναμιγνύεται με την αιθανόλη και το μίγμα αυτό οδηγείται στους βιοαντιδραστήρες.

Από το Νοέμβριο 2003 έως το Μαΐο του 2004 το σύστημα λειτούργησε σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο. Οι βιοαντιδραστήρες τροφοδοτούνταν κάθε δύο μήνες και τελικά απομακρύνονταν από αυτούς 15000 L στερεών. Καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας με αυτό τον τρόπο, μεταφέρθηκαν μια φορά 32000 L ιλύος από τη μία δεξαμενή καθίζησης στην άλλη.

Από το Μαΐο του 2004 έως το τέλος του 2005 η μέθοδος λειτούργησε κατά τον δεύτερο τρόπο δηλ. αξιοποίησε την ανακύκλωση υλικών. Οι βιοαντιδραστήρες τροφοδοτούνταν κάθε τρεις ή τέσσερις μήνες και κάθε φορά απομακρύνονταν 15000 L στερεών. Όπως αναμενόταν, η μεγαλύτερη καταβύθιση στερεών συνέβαινε στην πρώτη λίμνη καθίζησης.

Τέλος αποδείχθηκε ότι όταν το σύστημα χρησιμοποιούνταν με τη μέθοδο της ανακύκλωσης, τότε χρειαζόταν σημαντικά λιγότερο καυστικό νάτριο (κατά 50%) και λιγότερη (κατά 25%) αιθανόλη ανά λίτρο επεξεργαζόμενης ΟΑΜ.



Σχήμα 15<sup>[10]</sup>: Διάγραμμα ροής σε ένα Compost-Free Παθητικό σύστημα επεξεργασίας OAM που λειτούργησε με τη μέθοδο της επανατροφοδότησης και εφαρμόστηκε στο ορυχείο Leviathan που βρίσκεται κοντά στο Markleeville στην Καλιφόρνια (δίπλα στα βουνά της Sierra Nevada).

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Είναι αξιόπιστη. Δεν αναφέρονται αιτίες που θα μπορούσαν να θέσουν υπό αμφισβήτηση την αξιοπιστία της μεθόδου.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Η μέθοδος είναι πολύ αποδοτική. Επίσης αποτελεί το μοναδικό σύστημα που λειτούργησε ικανοποιητικά τους μήνες με μεγάλη χιονόπτωση καθώς τα άλλα συστήματα διέκοπταν την λειτουργία τους σε παρόμοια ακραίες καιρικές συνθήκες.

Πιο συγκεκριμένα, αποδείχθηκε (βλ. πίνακας 2 & πίνακας 3) ότι και με τους δύο τρόπους χρήσης της συγκεκριμένης μεθόδου επιτεύχθηκε η αποτελεσματική απομάκρυνση (κατά 95%) των περισσότερων μετάλλων (εκτός από τον σίδηρο που τον μείωσε λίγο και για να τον φθάσει στα επιθυμητά επίπεδα χρειάστηκε να προστεθεί επιπλέον ποσότητα βάσης). Το pH επίσης έφτασε το 7 (από 3 που ήταν αρχικά).

Όμως παρήχθησαν μεγάλες ποσότητες (5,5 τόνοι) ιλύος που δεν ήταν επικίνδυνη για το περιβάλλον αλλά χρειάστηκε η απομάκρυνσή της για να μην φράσουν και οι σωληνώσεις.

Πίνακας 2: Χημική ανάλυση εισερχόμενης και εξερχόμενης απορροής κατά την λειτουργία της μεθόδου στο ορυχείο Leviathan κοντά στο Markleeville στην Καλιφόρνια σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο λειτουργίας.<sup>[10]</sup>

Πρώτος τρόπος λειτουργίας (Μέθοδος βαρύτητας)			
Χημικό στοιχείο	Σύσταση απορροής προς επεξεργασία (Μέσος όρος)	Σύσταση απορροής προς διάθεση στο περιβάλλον (Μέσος όρος)	Όρια συγκέντρωσης ασφαλούς διάθεσης αποβλήτων (Μέσος όρος)
Al	37,467	0,103	2,000
As	0,002	0,005	0,150
Cu	0,691	0,005	0,016
Fe	117,167	4,885	1,000
Ni	0,487	0,066	0,094
Cd	0,0006	<0,00021	0,004
Cr	0,012	0,008	0,310
Pb	0,0036	0,0047	0,005
Se	0,014	0,011	0,005
Zn	0,715	0,016	0,210

Πίνακας 3: Χημική ανάλυση εισερχόμενης και εξερχόμενης απορροής κατά την λειτουργία της μεθόδου στο ορυχείο Leviathan κοντά στο Markleeville στην Καλιφόρνια σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο λειτουργίας.<sup>[10]</sup>

Δεύτερος τρόπος λειτουργίας (Μέθοδος ανακύκλωσης)			
Χημικό στοιχείο	Σύσταση απορροής προς επεξεργασία (Μέσος όρος)	Σύσταση απορροής προς διάθεση στο περιβάλλον (Μέσος όρος)	Όρια συγκέντρωσης ασφαλούς διάθεσης αποβλήτων (Μέσος όρος)
Al	40,029	0,053	2,000
As	0,007	0,007	0,150
Cu	0,795	0,005	0,016
Fe	115,785	2,704	1,000
Ni	0,529	0,070	0,094
Cd	0,0006	<0,00020	0,004
Cr	0,011	0,006	0,310
Pb	0,0042	0,0025	0,005
Se	0,012	0,008	0,005
Zn	0,776	0,009	0,210

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Al, As, Cd, Cu, Mn, Fe, Zn, Pb

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Υπάρχουν καθώς ακολούθησαν έρευνες που βρίσκονται ακόμα σε επίπεδο εργαστηριακής εφαρμογής και εμφανίζουν κάποια πρώτα ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Οι έρευνες αυτές εστιάζονται στην χρήση άλλων ενώσεων σαν αλκαλικά πρόσθετα που έχουν μικρότερο κόστος. Τέτοιες είναι π.χ.

παραπροϊόντα παραγωγής βιοντίζελ που θα περιέχουν μεθανόλη, τριγλυκερίδια, καυστικό κάλιο.

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Δεν υπάρχει πλήρης επάρκεια τεχνολογικής ωριμότητας. Πιο αναλυτικά, η μέθοδος έχει ορισμένες απλές αλλά πρωτότυπες σχεδιαστικές παρεμβάσεις που την καθιστούν μεν πολλή αποτελεσματική όμως ως καινοτομίες δεν έχουν εφαρμοστεί για μεγάλο χρονικό διάστημα και σε πλήθος άλλων εφαρμογών σε επίπεδο pilot scale. Συνεπώς απαιτείται περισσότερος χρόνος εφαρμογής της μεθόδου και σε ευρύτερη κλίμακα ώστε να διαθέτει πλήρη τεχνολογική ωριμότητα η μέθοδος.

Τέλος, αναφέρεται ότι ο μέσος όγκος του υλικού που επεξεργαζόταν το σύστημα ήταν 114 L/min.

## **2) Οικονομικά κριτήρια**

**Κριτήριο 2.1 (Σταθερό Κόστος):**

Κόστος κατασκευής : 1045750 δολ. (1080125 δολ για το μοντέλο με την ανακύκλωση)

**Κριτήριο 2.2 (Λειτουργικό Κόστος):** 24,31 δολ./ 3785,4 λίτρα επεξεργαζόμενης ΟΑΜ.

**Κριτήριο 2.3 (Κόστος συλλογής και αποθήκευσης επεξεργασμένων αποβλήτων):** Είναι μεγάλο λόγω της τεράστιας ποσότητας ιλύος που παράγεται και η οποία είναι απαραίτητο να απομακρύνεται και να αποθηκεύεται. Όμως δεν υπάρχουν επαρκή αριθμητικά στοιχεία.

**Κριτήριο 2.5 (Κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου):** Πιθανόν να είναι μεγάλο λόγω της τεράστιας ποσότητας ιλύος που παράγεται και η οποία πιθανόν να παραμένει εκτεθειμένη για κάποιο χρονικό διάστημα μέχρι να προλάβει να συλλεγεί και να αποθηκευτεί. Όμως δεν υπάρχουν αναλυτικά οικονομικά στοιχεία.

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Δεν υπάρχουν αναλυτικά στοιχεία όμως αναφέρεται ότι οι ενεργειακές απαιτήσεις δεν είναι πολύ υψηλές.

## **3) Περιβαλλοντικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Αποδείχθηκε ότι κατά τη χρήση αυτής της μεθόδου με κάθε έναν από τους δύο τρόπους προέκυπτε ιλύς που πληρούσε τα όρια ασφαλούς περιβαλλοντικής διάθεσης που είχε θέση η Ε.Ρ.Α.

**Κριτήριο 3.2 (Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου):** Δεν υπάρχουν συγκεκριμένες αναφορές όμως πρέπει να εξεταστεί αφού είναι δεδομένο ότι το τοπίο διαταράσσεται εξαιτίας των τόνων ιλύος που παράγονται.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Μίγμα από κόπρινα, αιθανόλη και καυστικό νάτριο. Οι χημικές πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται αποτελούν κίνδυνο για το περιβάλλον εάν δεν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα ασφαλείας κατά την αποθήκευσή τους.

**Κριτήριο 3.5 (Απαιτήσεις γης):**

Συνολικά απαιτούμενος όγκος: 3000 m<sup>3</sup>.

Συνολική έκταση γής: Σίγουρα είναι μεγάλη λόγω των αποθηκευτικών χώρων που απαιτούνται για την αποθήκευση των τόνων της ιλύος και των χημικών πρώτων υλών. Όμως δεν είναι διαθέσιμα αναλυτικά στοιχεία.

Στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 4, Πίνακας 5, Πίνακας 6) παρουσιάζονται συνοπτικά τα case studies που αναλύθηκαν παραπάνω και συγκρίνονται μεταξύ τους ως προς κάθε κατηγορία κριτηρίων (τεχνολογικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά).

**Πίνακας 4:** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο SRB

ΜΕΘΟΔΟΣ SRB								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη λειτουργίας	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργασόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
Wheal Jane Pilot Passive Treatment Plant <sup>[10]</sup>	2000-2002	Μικρή. Η αποδοτικότητα σε έναν αντιδραστήρα του συστήματος μειωνόταν σημαντικά με τον χρόνο και τελικά αυτός (αντιδραστήρας LF) τέθηκε εκτός λειτουργίας για 10 μήνες. Γινόταν εισροή νερού βροχής στις αερόβιες μονάδες	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Σχετική μείωση συγκέντρωσης για όλα τα μέταλλα (λιγότερο για τον σίδηρο)</li> <li>•Max pH= 6</li> <li>•Μη επαρκής πληθυσμός μικροβίων στους βιοαντιδραστήρες (λόγω πολύ χαμηλού pH εισερχόμενης απορροής)</li> </ul>	Μέσος όρος: 36 l/min  Max: 114 l/min	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Fe, Al, Zn, θειικά ιόντα	Υπάρχουν εάν γίνουν τα εξής: 1) Οι βιοαντιδραστήρες να βρίσκονται πάνω από το σύστημα των αερόβιων κελιών 2) Πρέπει να αποτρέπεται η εισροή νερού βροχής στο σύστημα 3) Απαιτείται περισσότερος χρόνος λειτουργίας των βιοαντιδραστήρων για ανάπτυξη επαρκούς πληθυσμών βακτηρίων	Δεν αναφέρεται κάτι πολύ εξειδικευμένο

**Πίνακας 4(συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο SRB

ΜΕΘΟΔΟΣ SRB								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη λειτουργίας	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργασόμενης OAM	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
Βιοαντιδραστήρας στο Doe Run West Fork ορυχείο <sup>[10]</sup>	1996-2004	Δεν αναφέρονται στοιχεία που να καταδεικνύουν αναξιπιστία	Η εξερχόμενη απορροή πληρεί τα περιβαλλοντικά κριτήρια ασφαλούς απόθεσης. Η μέθοδος είναι γενικά αποτελεσματική και ιδιαίτερα επιτυχής στην απομάκρυνση του Pb.	Μέσος όρος: 4540 l/min Max: 5680 l/min	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Pb, Zn, θειικά ιόντα	Υπάρχουν εάν λαμβάνεται μέριμνα ώστε να υπάρχει πρόσβαση στο οργανικό υπόστρωμα των αντιδραστήρων για να επιλύονται με απλό τρόπο μικρά προβλήματα	Δεν αναφέρεται κάτι πολύ εξειδικευμένο. Χρειάζονται μόνο μικρές βελτιώσεις
Επί τόπου βιοαντιδραστήρας στο ορυχείο Lilly Orphan Boy <sup>[10]</sup>	1994-2005	Σχετική διότι η σύσταση της εξερχόμενης απορροής μεταβαλλόταν σημαντικά κατά την διάρκεια του χρόνου και επειδή γινόταν ανάμιξη εντός του τούνελ επεξεργασμένων λημμάτων με την προς επεξεργασία OAM	1) Ικανοποιητική μείωση συγκέντρωσης για όλα σχεδόν τα μέταλλα. 2) Ικανοποιητικό pH απορροής (σχεδόν ουδέτερο) 3) Μείωση συγκέντρωσης μαγγανίου μόλις 20%	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Al, As, Cd, Mn, Fe, Cu, Zn, S	Έχει πολλές προοπτικές βελτίωσης με μικρές τροποποιήσεις (τοποθέτηση βαλβίδων στους αρμούς του βιοαντιδραστήρα ή δημιουργία μεγαλύτερων χώρων συλλογής νερού βροχής. Επίσης χρειάζεται εις βάθος γεωχημική μελέτη πριν τον σχεδιασμό εγκατάστασης για αναγνώριση επιπλέον πηγών οξύτητας.	Δεν αναφέρεται κάτι πολύ εξειδικευμένο. Χρειάζονται μόνο μικρές βελτιώσεις

**Πίνακας 4(συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο SRB

ΜΕΘΟΔΟΣ SRB								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη λειτουργίας	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργασζόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
Βιοαντιδραστήρας στο μεταλλείο Surething mine <sup>[10]</sup>	2001-2005	Σχετικά αξιόπιστη. Αιτία: οι σωληνώσεις χρειάζονταν κατά περιόδους καθαρισμό (για την απομάκρυνση του καταβυθιζόμενου Fe) και όταν αυτό δεν επαρκούσε τότε ήταν αναγκαία η τοποθέτηση καινούριων σωληνώσεων	Η μέθοδος είναι πολύ αποδοτική <ul style="list-style-type: none"> <li>•Απομάκρυνση μετάλλων κατά 92-99%</li> <li>•Max pH= 7</li> </ul> Προβλήματα λόγω: 1)Μειωμένη απόδοση πρώτου βιοαντιδραστήρα λόγω του πολύ χαμηλού pH της εισερχόμενης απορροής 2)Οι σωληνώσεις χρειάζονταν κατά περιόδους καθαρισμό.	Μέσος όρος: 7,6 l/min  Max: 38 l/min	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Al, As, Cd, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb, θειικά ιόντα	Έχει προοπτικές βελτίωσης με μικρές μόνο σχεδιαστικές παρεμβάσεις (π.χ. τοποθέτηση περισσότερων σωληνώσεων μεταφοράς απορροής)	Ο πρώτος βιοαντιδραστήρας δεν έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα και πιθανώς να χρειάζεται περαιτέρω σχεδιαστικές παρεμβάσεις



**Πίνακας 4 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο SRB

ΜΕΘΟΔΟΣ SRB								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη λειτουργίας	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
Free-compost βιοαντιδραστήρας στο ορυχείο Leviathan <sup>[10]</sup>	2003-2005	Δεν αναφέρονται αιτίες αναξιοπιστίας	<p>Η μέθοδος είναι πολύ αποδοτική.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Απομάκρυνση σχεδόν όλων των μετάλλων κατά 95%</li> <li>• Max pH=7</li> <li>• Είναι το μόνο σύστημα που λειτουργεί ικανοποιητικά ακόμα και τους μήνες μεγάλης χιονόπτωσης</li> <li>• Παράγονται μεγάλες ποσότητες ύλους (5,5 τόνοι)</li> </ul>	Μέσος όρος: 114 l/min	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Al, As, Cd, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb	Υπάρχουν. Οι έρευνες προσανατολίζονται προς την εξεύρεση αλκαλικών προσθέτων που θα έχουν μικρότερο κόστος (π.χ. υποπροϊόντα παραγωγής βιοντίζελ)	Δεν υπάρχει πλήρης επάρκεια τεχνολογικής ωριμότητας. Η μέθοδος έχει καινοτομίες που δεν έχουν εφαρμοστεί για μεγάλο χρονικό διάστημα και σε άλλων εφαρμογών σε επίπεδο pilot scale

**Πίνακας 5:** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα οικονομικά κριτήρια για τη μέθοδο SRB

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ SRB</b>						
<b>ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη λειτουργίας</b>	<b>Σταθερό Κόστος</b>	<b>Κόστος Λειτουργίας</b>	<b>Κόστος συλλογής &amp; αποθήκευσης επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Κόστος επεξεργασίας αποβλήτων</b>	<b>Κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>
Wheal Jane Pilot Passive Treatment Plant <sup>[10]</sup>	2000-2002	2,26 εκατομμύρια δολάρια (για μέσο όγκο επεξεργαζόμενου υλικού 36L/λεπτό)	332500 δολ./έτος (για μέσο όγκο επεξεργαζόμενου υλικού 36L/λεπτό)	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Ελάχιστο αφού δεν αναφέρεται αρνητική επίδραση στο φυσικό τοπίο
Βιοαντιδραστήρας στο Doe Run West Fork ορυχείο <sup>[10]</sup>	1996-2004	730000 δολάρια (για μέσο όγκο επεξεργαζόμενου υλικού 4540L/λεπτό)	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Ελάχιστο αφού δεν αναφέρεται αρνητική επίδραση στο φυσικό τοπίο
Επί τόπου βιοαντιδραστήρας στο ορυχείο Lilly Orphan Boy <sup>[10]</sup>	1994-2005	Χαμηλό (Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία)	Χαμηλό γιατί δεν απαιτείται συχνή παρακολούθηση (Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία)	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Ελάχιστο αφού δεν αναφέρεται αρνητική επίδραση στο φυσικό τοπίο
Βιοαντιδραστήρας στο μεταλλείο Surething mine <sup>[10]</sup>	2001-2005	325000 δολ. (για μέσο όγκο επεξεργαζόμενου υλικού 7,6L/λεπτό)	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Ελάχιστο αφού δεν αναφέρεται αρνητική επίδραση στο φυσικό τοπίο
Free-compost βιοαντιδραστήρας στο ορυχείο Leviathan <sup>[10]</sup>	2003-2005	1045750 δολ. (1080125 δολ για το μοντέλο με την ανακύκλωση)	24,31 δολ./ 3785,4 λίτρα επεξεργαζόμενης ΟΑΜ	Είναι μεγάλο (λόγω 5,5 τόνων παραγόμενης ύλης). Δεν υπάρχουν επαρκή αριθμητικά στοιχεία.	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Πιθανόν να είναι μεγάλο λόγω της τεράστιας ποσότητας ύλης. Δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία

**Πίνακας 6:** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο SRB

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ SRB</b>						
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη λειτουργίας</b>	<b>Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
Wheal Jane Pilot Passive Treatment Plant <sup>[10]</sup>	2000-2002	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν αναφέρεται αρνητική επίδραση στο φυσικό τοπίο	μίγμα από πριονίδια (95%) σανός (5%) κόπρανα αγελάδων χαλίκι Ακίνδυνα για το περιβάλλον	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν συγκεκριμένα στοιχεία όμως επειδή περιλαμβάνει τρία πολυκαναλικά υποσυστήματα αναμένεται να καταλαμβάνει πολύ χώρο
Βιοαντιδραστήρας στο Doe Run West Fork ορυχείο <sup>[10]</sup>	1996-2004	Η απορροή μπορεί να διατεθεί με ασφάλεια στο περιβάλλον	Δεν αναφέρεται αρνητική επίδραση στο φυσικό τοπίο	μίγμα από πριονίδια (67%) ασβεστόλιθος (19%) κόπρανα αγελάδων (12%)	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία όμως η μέθοδος αυτή δεν καταναλώνει πολλή ενέργεια γιατί η απαιτούμενη ενέργεια είναι μόνο αυτή στην αρχή για την άντληση της απορροής. Μετά γίνεται μεταφορά μέσω της βαρύτητας.	20000 m <sup>2</sup>
Επί τόπου βιοαντιδραστήρας στο ορυχείο Lilly Orphan Boy <sup>[10]</sup>	1994-2005	Χρειάζεται προσοχή πριν διατεθούν στο περιβάλλον λόγω υψηλής συγκέντρωσης του μαγγανίου	Δεν αναφέρονται αρνητικές επιπτώσεις στο φυσικό τοπίο	Μίγμα από κοπριά, σανό, ροκανίδια	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Έχει μικρές απαιτήσεις σε έκταση γής (δεν υπάρχουν αριθμητικά στοιχεία)

**Πίνακας 6 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο SRB

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ SRB</b>						
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη λειτουργίας</b>	<b>Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
Βιοαντιδραστήρας στο μεταλλείο Surething mine <sup>[10]</sup>	2001-2005	Τα απόβλητα μπορούν να διατεθούν με ασφάλεια στο περιβάλλον	Δεν αναφέρονται αρνητικές επιπτώσεις στο φυσικό τοπίο	Μίγμα από κόπρανα αγελάδος, καρυδιά, ασβεστόλιθος	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία όμως η μέθοδος αυτή δεν καταναλώνει πολλή ενέργεια γιατί η μεταφορά της απορροής γίνεται μέσω της βαρύτητας.	Συνολικά απαιτούμενος όγκος: 3000 m <sup>3</sup> . Έκταση απαιτούμενου χώρου προεπεξεργασίας της OAM: 28m <sup>2</sup> Έκταση τρίτου βιοαντιδραστήρα: 279 m <sup>2</sup> . Δεν υπάρχουν στοιχεία για την συνολική έκταση γης που απαιτείται.
Free-compost βιοαντιδραστήρας στο ορυχείο Leviathan <sup>[10]</sup>	2003-2005	Τα απόβλητα μπορούν να διατεθούν με ασφάλεια στο περιβάλλον. Το σοβαρότερο όμως θέμα είναι η αποθήκευση της τεράστιας τεράστια ποσότητά τους.	Είναι αναγκαίο να εξεταστεί η δυνατότητα αποκατάστασης του φυσικού τοπίου το οποίο σίγουρα διαταράσσεται λόγω των τεράστιων ποσοτήτων ιλύος που παράγονται. Δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία.	Μίγμα από κόπρανα, αιθανόλη και καυστικό νάτριο. Ανάγκη λήψης των κατάλληλων μέτρων ασφαλείας κατά την αποθήκευση και την χρήση τους.	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία. Αναφέρεται ότι οι ενεργειακές απαιτήσεις δεν είναι πολύ υψηλές	Συνολικά απαιτούμενος όγκος: 3000 m <sup>3</sup> . Συνολική έκταση γής: Σίγουρα είναι μεγάλη (ανάγκη αποθήκευσης τόνων ιλύος και των χημικών πρώτων υλών). Μη διαθέσιμα αναλυτικά στοιχεία.

## 5.2 Μέθοδος Ενεργών Διαπερατών Φραγμάτων (Permeable Reactive Barriers, PRB)

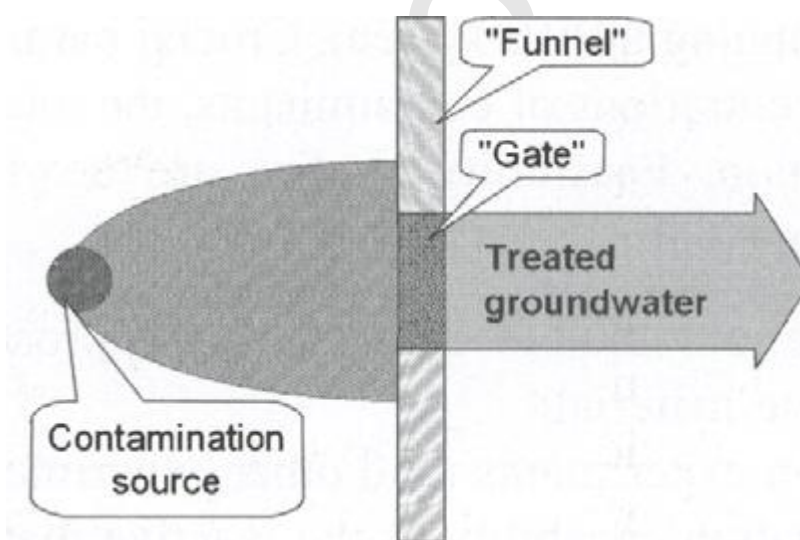
### Case study 1

#### PRB in Varokon on Funen Island, Denmark<sup>[11]</sup>

**Τόπος:** Varokon στο νησί Funen στη Δανία. Εκεί ήταν εγκατεστημένο από το 1976 έως το 1997 ένα πετροχημικό εργοστάσιο ανακύκλωσης διαλυτών και χρωμάτων το οποίο περιείχε CAHs (Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons π.χ. τετραχλωροαιθυλένιο [PCE], τριχλωροαιθυλένιο [TCE] κ.τ.λ.)

**Χρόνος:** 1999-2007

**Παρουσίαση του συστήματος:** Το ΕΔΦ (Ενεργό Διαπερατό Φράγμα ή PRB) που χρησιμοποιήθηκε ήταν του τύπου funnel – and- gate δηλ. όπως φαίνεται και στο σχήμα 16 αποτελούνταν από ένα αδιαπέρατο τείχος το οποίο οδηγούσε το πλούμιο σε κάποιο διαπερατό φράγμα όπου εκεί γινόταν οι κατάλληλες φυσικοχημικές διεργασίες.

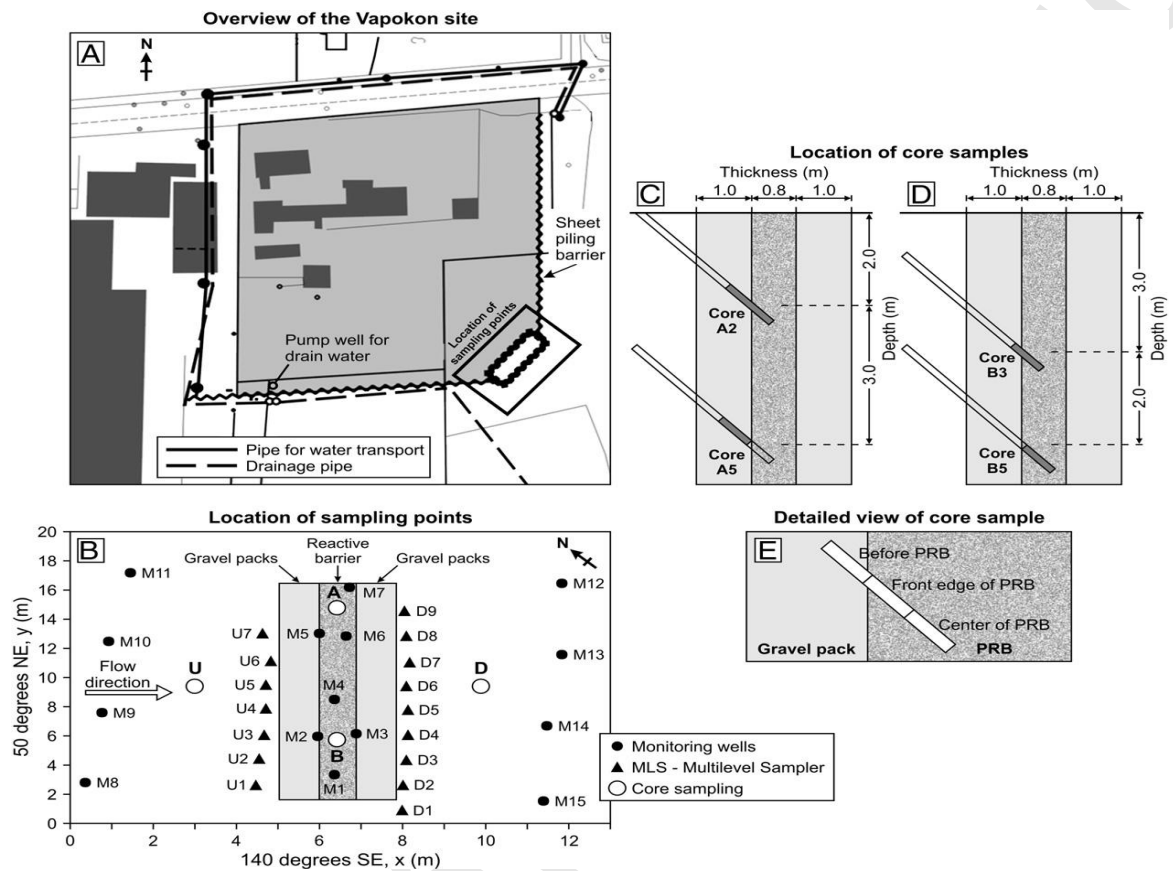


Σχήμα 16<sup>[12]</sup>: Ενεργό διαπερατό φράγμα τύπου «funnel-and-gate».

Το μήκος της τάφρου ήταν 110-130 μ και το άνω όριο της βρισκόταν 20,85 μ κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Επίσης στο άνω και κάτω μέρος της είχε τοποθετηθεί μία ζώνη πάχους 1 μ που αποτελούνταν από αμμοχάλικα. Το ενεργό διαπερατό πληρωτικό υλικό είχε διαστάσεις 14,5μ x 9μ x 0,8μ (πλάτος x βάθος x μήκος) και αποτελούνταν κατά 100% κόκκους στοιχειακού σιδήρου ( $Fe^0$ ).

Η χημική ανάλυση δειγμάτων που ελήφθησαν από διάφορα σημεία της περιοχής αυτής έδειξε ότι η προς επεξεργασία κηλίδα ρύπανσης παρουσίαζε ετερογένεια μεγάλου

βαθμού. Τα σημεία δειγματοληψίας μετά από 7 χρόνια λειτουργίας του Ε.Δ.Φ. παρουσιάζονται στο σχήμα 17.



Σχήμα 17<sup>[11]</sup>: Α. Διάγραμμα της περιοχής όπου εγκαταστάθηκε το ΕΔΦ. Β. Διάγραμμα των σημείων δειγματοληψίας. C & D. Πλάγια όψη των σημείων Α και Β της δειγματοληψίας που παρουσιάζονται στο διάγραμμα Β. Ε. Αναλυτική όψη των σημείων δειγματοληψίας εντός του ΕΔΦ. Ε. Αναλυτική όψη των σημείων δειγματοληψίας εντός του ΕΔΦ. ○ Σημεία δειγματοληψίας εντός του ΕΔΦ. ▲ Σημεία δειγματοληψίας γύρω από το ΕΔΦ σε διάφορα βάθη. ● Σημεία παρακολούθησης της ροής της κηλίδας ρύπανσης. Τα δείγματα που ελήφθησαν εξετάστηκαν ως προς την ορυκτολογική, χημική και μικροβιολογική τους σύσταση.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Η μέθοδος είναι σχετικά αξιόπιστη. Το σοβαρότερο θέμα που δημιουργεί κάποιους προβληματισμούς είναι η ετερογένεια που χαρακτηρίζει την

κηλίδα ρύπανσης η οποία φαίνεται ότι έχει αντίκτυπο και στη λειτουργία του ενεργού διαφράγματος. Αποδείχθηκε μάλιστα ότι μόνο το ¼ του φράγματος επεξεργαζόταν τη μεγαλύτερη ποσότητα ρυπαντών τύπου CAHs γεγονός που είναι πιθανό να οδηγήσει σε παθητικοποίηση μέρους του φράγματος και επομένως σε διαφοροποίηση της μακροβιότητας του φράγματος κατά το μήκος του.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Η μέθοδος παρέμενε ιδιαίτερος αποδοτική μετά από 7,5 χρόνια λειτουργίας του ΕΔΦ και μπορούσε επιτυχώς να απομακρύνει (ακόμα και κατά 99% τους κυριότερους ρυπαντές τύπου CAHs (χλωριωμένοι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες). Ωστόσο παρατηρήθηκαν συγκεντρώσεις TCE και cis-DCE (είναι δύο ενώσεις που ανήκουν στην κατηγορία των CAHs) που είναι υψηλότερες των υπαρχόντων ορίων ασφαλούς περιβαλλοντικής διάθεσης.

Επίσης πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο και συνέκριναν την δραστικότητα δειγμάτων που ελήφθησαν από το εγκατεστημένο ΕΔΦ και από δείγματα με στοιχειακό σίδηρο που δεν είχε ακόμη χρησιμοποιηθεί, έδειξαν ότι είχαν παρόμοιους ρυθμούς δράσης. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην παρουσία διαφόρων ειδών βακτηρίων.

Η ύπαρξη ιζημάτων θείου σιδήρου στα λαμβανόμενα δείγματα κατέδειξε ότι συνεχιζόταν ακόμα η μείωση της συγκέντρωσης του θείου. Επίσης η ορυκτολογική ανάλυση έδειξε ότι υπήρχε μεγάλη ορυκτολογική ετερογένεια, κάτι που πιθανώς οφείλεται στην ετερογένεια που είχε και η προς επεξεργασία απορροή.

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Διάφορες ενώσεις που ανήκουν στην κατηγορία των χλωριωμένων αλειφατικών υδρογονανθράκων (CAHs) καθώς και ανόργανα συστατικά όπως Mg, Na, K, Fe, Ca, S

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Υπάρχουν προοπτικές βελτίωσης. Πιο συγκεκριμένα, για να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα με τις ενώσεις TCE και cis-DCE που οι συγκεντρώσεις τους είναι εκτός ορίων προτείνεται η εγκατάσταση ενός άλλου ΕΔΦ με σχετικό πάχος που θα βρίσκεται στο κάτω μέρος της ροής της κηλίδας ρύπανσης και θα επεξεργάζεται μόνο το πολύ στενό πλούμιο που περιέχει τις προβληματικές ενώσεις. Μία άλλη λύση για το ίδιο πρόβλημα πιθανόν να είναι η ενίσχυση της ύπαρξης βακτηρίων του γένους *Dehalococcoides* τα οποία δρούν επιτυχάνουν μείωση της συγκέντρωσης του cis-DCE.

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Είναι ικανοποιητική αφού η τεχνολογία που χρησιμοποιείται είναι η πιο συχνά εφαρμοζόμενη πλέον σε πλήθος αντίστοιχων συστημάτων ΕΔΦ.

## 2) Οικονομικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Δεν απαιτείται κάποια άλλη ενέργεια εκτός από την βιοχημική που προέρχεται από την δράση των βακτηρίων και τις πραγματοποιούμενες αντιδράσεις αφού η ροή της κηλίδας ρύπανσης προς το ΕΔΦ γίνεται με τη βοήθεια της βαρύτητας και της φυσικής ροής του υπόγειου ύδατος.

## 3) Περιβαλλοντικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Το απορρυπασμένο υπόγειο νερό μπορεί να διατεθεί με σχετική ασφάλεια αφού η συντριπτική πλειοψηφία των περιεχόμενων ρυπαντών είναι εντός των προβλεπομένων ορίων.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Το ενεργό πληρωτικό υλικό είναι κόκκοι στοιχειακού σιδήρου και επίσης χρησιμοποιείται και ένα λεπτό στρώμα αμμοχάλικα, δηλ. υλικά που δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον.

## Case study 2

### PRB in Northumberland, UK<sup>[13]</sup>

**Τόπος:** Northumberland, Newcastle, UK

**Χρόνος:** Μάϊος 2003-Μάϊος 2005

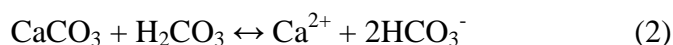
**Περιγραφή του συστήματος:** Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας συνδυασμός ΕΔΦ με έναν αερόβιο υγροβιότοπο ο οποίος προϋπήρχε και μία δεξαμενή καθίζησης που κατασκευάστηκε για καλύτερη καταβύθιση κυρίως του σιδήρου. Το ΕΔΦ που εγκαταστάθηκε είχε διαστάσεις 180μ x 3μ x 2μ (μήκος x βάθος x πλάτος) Το πληρωτικό υλικό του ΕΔΦ αποτελούνταν από ένα μίγμα πολύ καλά ομογενοποιημένων υλικών και το οποίο είχε την εξής σύσταση: 25% γεωργοκτηνοτροφικά απορρίμματα αλόγων και άχυρο, 25% συμπιεσμένα λιπάσματα και 50% ασβεστολιθικά χαλίκια ονομαστικού μεγέθους 25 mm. Το μίγμα αυτό επιλέχθηκε γιατί εξασφάλιζε ότι η άνω επιφάνεια αυτού του συμπιεσμένου μίγματος θα έπρεπε να είναι διαρκώς ψηλότερα από το ανώτερο σημείο του υδροφόρου ορίζοντα. Αυτό ήταν αναγκαίο ώστε να εξασφαλίζονται τα εξής:

- 1) Η ροή του ρυπασμένου υπόγειου ύδατος θα κατευθυνόταν πάντα προς το ΕΔΦ ανεξάρτητα από τις μεταβολές στο ύψος του υδροφόρου ορίζοντα λόγω βροχόπτωσης.
- 2) Επικράτηση συνεχώς ανοξικών συνθηκών εντός του διαπερατού φράγματος.
- 3) Επειδή με την πάροδο του χρόνου η διαπερατότητα του φράγματος μειώνεται λόγω των ιζημάτων που εναποτίθενται στους πόρους του φράγματος, έπρεπε να υπάρχει επαρκές επιπλέον υδραυλικό φορτίο ώστε το νερό να διαπερνά το φράγμα.



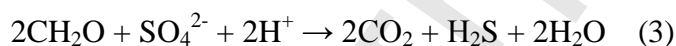
Το όλο σύστημα επεξεργασίας περιελάμβανε ακόμα και έναν αερόβιο υγρότοπο που προϋπήρχε και ο οποίος όταν λειτούργησε από μόνος του τα προηγούμενα έτη είχε φανεί αναποτελεσματικός και προστέθηκε ακόμα μία δεξαμενή καθίζησης. Ο υγρότοπος και η δεξαμενή καθίζησης χρειάζονταν για περαιτέρω καταβύθιση του σιδήρου καθώς η συγκέντρωσή του στα υπόγεια ύδατα μετά την επεξεργασία τους στο ΕΔΦ αναμενόταν να είναι υψηλή αφού και το προς επεξεργασία υγρό περιείχε σημαντικές ποσότητες σιδήρου.

Σκοπός της ύπαρξης αυτών των συστημάτων είναι η μείωση της οξύτητας και επομένως η αύξηση της αλκαλικότητας και του pH. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των πολύ υψηλών ρυθμών δράσης ορισμένων βακτηρίων τα οποία καταναλώνουν το οξυγόνο και οδηγούν με αυτό τον τρόπο στην επικράτηση ανοξικών συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα, οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι<sup>[13]</sup>:



Οι δύο παραπάνω αντιδράσεις είναι περισσότερο αποτελεσματικές όταν επικρατούν ανοξικές συνθήκες. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν υπάχει οξύτητα ο σίδηρος και το αλουμίνιο σχηματίζουν υδροξειδία που εναποτίθενται στην επιφάνεια του ασβεστολίθου και αυτό μειώνει τον ρυθμό των αντιδράσεων. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει όταν υπάρχουν ανοξικές συνθήκες και ο καλύτερος τρόπος για να διασφαλιστεί η ύπαρξη αυτών των συνθηκών είναι το χρησιμοποιούμενο μίγμα να είναι πολύ καλά ομογενοποιημένο.

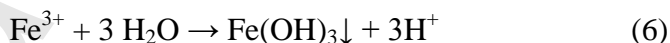
Με την παρουσία βακτηρίων πραγματοποιούνται οι επόμενες αντιδράσεις:



Όπου με  $\text{CH}_2\text{O}$  παριστάνεται η πηγή του άνθρακα και με  $\text{M}^{2+}$  παριστάνονται τα ιόντα δισθενών μετάλλων.

Στις αντιδράσεις 3, 4 και 5 φαίνεται ο πολύ σημαντικός ρόλος των βακτηρίων καθώς όταν αυτά υπάρχουν καταναλώνεται οξύτητα (αντίδραση 3), παράγεται αλκαλικότητα (αντίδραση 4) και τέλος τα μέταλλα καταβυθίζονται σαν θειούχες ενώσεις (αντίδραση 5).

Επίσης όπως προαναφέρθηκε στη δεξαμενή καθίζησης και στον αερόβιο υγρότοπο γίνεται επιπλέον καταβύθιση του τρισθενούς σιδήρου υπό τη μορφή υδροξειδίου μέσω της αντίδρασης 6:



Επειδή κατά την αντίδραση αυτή παράγεται πάλι οξύτητα, είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει περίσσεια αλκαλικότητας και αυτό συμβαίνει μόνο εάν πραγματοποιείται απρόσκοπτα η αντίδραση 2.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Η μέθοδος είναι σχετικά αξιόπιστη. Κατά τις χημικές αναλύσεις παρατηρήθηκαν μεγάλες διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις των μετάλλων αλλά και στο pH ιδίως έπειτα από ημέρες σημαντικής βροχόπτωσης διότι τότε γινόταν αραίωση του ύδατος που υπήρχε στον αερόβιο υγρότοπο.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Η επεξεργασία στο ΕΔΦ είναι αρκετά αποδοτική καθώς επιτυγχάνεται απομάκρυνση του σιδήρου κατά 50% και του θείου κατά 40%. Επίσης οι συγκεντρώσεις του σιδήρου και των θειϊκών ιόντων μειώνονται ακόμα περισσότερο όταν η απορροή περνάει μέσα από τον αερόβιο υγρότοπο που όπως προαναφέρθηκε είναι μέρος του όλου συστήματος. Έτσι, από την επεξεργασία σε όλο το παθητικό σύστημα, γίνεται απομάκρυνση του σιδήρου κατά 95%. Σύμφωνα με επιστημονικές έρευνες, ο σίδηρος καταβυθίζεται με τη μορφή οξυ-υδροξειδίου ή με τη μορφή του αντίστοιχου θειϊκού άλατος. Σημαντική επίσης απομάκρυνση (περίπου 87%) επιτυγχάνεται και για το αλουμίνιο το οποίο καταβυθίζεται μέσω της διαδικασίας της υδρόλυσης υπό τη μορφή υδροξειδίου ή αντίστοιχου θειϊκού άλατος του υδροξειδίου. Η υδρόλυση επιταχύνεται όταν το pH είναι μεγαλύτερο από 5.

Τέλος σε ότι αφορά το μαγγάνιο, όπως είναι αναμενόμενο δεν γίνεται επαρκής απομάκρυνσή του διότι για να συμβεί αυτό απαιτείται pH άνω του 8 ώστε να καταβυθιστεί υπό τη μορφή του πυρολουσίτη ( $MnO_2$ ). Όμως ακόμα και σε ορισμένα χρονικά διαστήματα που γίνεται κάποια αξιοσημείωτη μείωση της συγκέντρωσης του μαγγανίου δεν έχει ακόμα προσδιοριστεί ο ακριβής μηχανισμός που λαμβάνει χώρα. Αυτό που θεωρείται πιθανό είναι ότι πραγματοποιείται χημική καταβύθιση που όμως βοηθείται από την ταυτόχρονη δράση βακτηρίων.

Σχετικά με το pH, φαίνεται ότι αυξάνεται εντός του ΕΔΦ (σύμφωνα με τις προαναφερθείσες αντιδράσεις 1 και 3) όμως παραμένει σχεδόν σταθερό όταν ολοκληρώνεται η επεξεργασία σε όλο το σύστημα.

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση πολλών ρυπαντών κυρίως όμως του σιδήρου, του αλουμινίου και του μαγγανίου.

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Υπάρχουν δυνατότητες βελτίωσης του συστήματος οι οποίες σαν στόχο έχουν όχι μόνο την αποδοτικότερη επεξεργασία αλλά και την κατανόηση των χημικών και βιοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα. Πιο συγκεκριμένα, ως πιθανές βελτιώσεις προτείνονται:

- 1) Επέκταση του ΕΔΦ και προς το βορρά ώστε να επεξεργάζεται μεγαλύτερη ποσότητα λυμάτων.
- 2) Χρήση μπρικετών διττανθρακικού νατρίου για να επιτυγχάνεται βελτίωση του τελικού pH.
- 3) Εξέταση δυνατότητας ανακύκλωσης του άνθρακα και του θείου εντός του όλου παθητικού συστήματος ώστε να έχει μεγαλύτερο χρόνο ζωής το υπάρχον ΕΔΦ.

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερη καινοτομία και επομένως υπάρχει η αναγκαία τεχνογνωσία.

## 2) Οικονομικά κριτήρια<sup>3</sup>

**Κριτήριο 2.1 (Κόστος επένδυσης):** 94117,65 (δολ. Αμερικής)

**Κριτήριο 2.2 (Λειτουργικό Κόστος):** 7843,13 /έτος (δολ. Αμερικής)

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Ως παθητικό σύστημα επεξεργασίας δεν απαιτεί άλλη ενέργεια εκτός από τη βιοχημική που προέρχεται από την δράση των βακτηρίων. Επομένως ενεργειακά δεν επιβαρύνει το περιβάλλον.

## 3) Περιβαλλοντικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Το τελικό προϊόν εμφανίζει συγκεντρώσεις όλων των μετάλλων εντός των επιτρεπόμενων ορίων εκτός από το μαγγάνιο για το οποίο χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Πολύ καλά ομογενοποιημένο μίγμα με την εξής σύσταση: 25% κόπρανα αλόγων και άχυρο, 25% συμπιεσμένα λιπάσματα και 50% ασβεστολιθικά χαλίκια ονομαστικού μεγέθους 25 mm. Όλα είναι ακίνδυνα για το περιβάλλον.

## Case study 3

### PRB in Aznalcollar (Sw Spain)<sup>[14]</sup>

**Τόπος:** Aznalcollar, προάστιο της Σεβίλλης στην Ισπανία.

**Χρόνος παρακολούθησης:** 36 μήνες

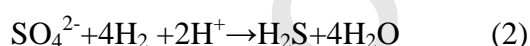
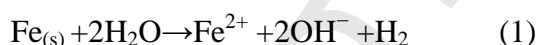
<sup>3</sup> Στα αναφερόμενα κόστη έχει γίνει αποπληθωρισμός

**Περιγραφή του συστήματος :** Το σύστημα εγκαταστάθηκε μετά από ένα πολύ σοβαρό ατύχημα που συνέβηκε το 1998 στο ορυχείο πυρίτη της περιοχής Aznalcollar. Τότε κατέρρευσε το τείχος ενός φράγματος και προκλήθηκε το σοβαρότερο περιβαλλοντικό ατύχημα που έχει γίνει ποτέ στην Ισπανία αφού απελευθερώθηκαν 4000000 m<sup>3</sup> ΟΑΜ και 2000000 m<sup>3</sup> τοξική λάσπη πλούσια σε βαρέα μέταλλα.

Το σύστημα σχεδιάστηκε ώστε να καλύπτει το εύρος όλου του ποταμού (110 μέτρα) που είχε ρυπανθεί. Μάλιστα τοποθετήθηκαν τρία διαφορετικά ΕΔΦ (κάθε ένα είχε μήκος 30 μέτρα κάθετα στη ροή του υπόγειου ύδατος, πάχος 1,4 μέτρα παράλληλα προς τη ροή των υπόγειων υδάτων και 6 μέτρα βάθος) και χωρίζονταν μεταξύ τους από μη ενεργές περιοχές βάθους 10 μέτρων οι οποίες είχαν πολύ μικρή υδραυλική αγωγιμότητα. Το πληρωτικό υλικό στα ΕΔΦ αποτελούνταν από ασβεστόλιθο και δύο διαφορετικά οργανικά υποστρώματα (π.χ. ομογενοποιημένα λαχανικά και ιλύ προερχόμενη από λύματα). Σε ένα από τα τρία ΕΔΦ προστέθηκε και στοιχειακός σίδηρος (Fe<sup>0</sup>) για τους εξής λόγους:

- 1) Για να επιτευχθούν καλύτερες αναγωγικές συνθήκες
- 2) Η οξειδωση του Fe<sup>0</sup> ενισχύει την αναγωγή των θειικών ιόντων παρέχοντας H<sub>2</sub> που το χρησιμοποιούν τα βακτήρια για να πάρουν ηλεκτρόνια (βλ. αντιδράσεις 2 και 3)
- 3) Για να σχηματιστούν οξυ-υδροξείδια του σιδήρου τα οποία έχουν εξαιρετικές απορροφητικές ιδιότητες και έτσι μπορούν να απομακρύνουν ποσότητες μετάλλων που βρίσκονται στη ρυπασμένη κηλίδα (βλ. αντίδραση 3)

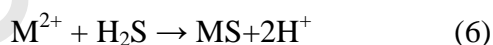
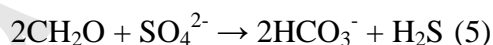
Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται εξαιτίας της παρουσίας του στοιχειακού σιδήρου είναι:



Ο ασβεστόλιθος χρησιμοποιήθηκε για να αυξηθεί το pH (βλ. αντίδραση 4), να καταβυθιστούν ορισμένα μέταλλα υπό τη μορφή οξυ-υδροξειδίων και να παρέχει τις κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη των θειοαναγωγικών βακτηρίων.



Τέλος το οργανικό υπόστρωμα προστέθηκε ώστε να παρέχει τα ηλεκτρόνια που θα διατηρήσουν την δράση των βακτηρίων (βλ. αντιδράσεις 5 και 6).



Συμπερασματικά, οι μηχανισμοί απομάκρυνσης βαρέων μετάλλων που ισχύουν σε αυτό το σύστημα έχουν άμεση σχέση με το pH. Τα μέταλλα καταβυθίζονται κυρίως υπό τη μορφή οξυ-υδροξειδίων και όχι τόσο με τη μορφή θειϊκών αλάτων. Ειδικά για τον Zn, αυτός εναποτίθεται και στην επιφάνεια των οξυ-υδροξειδίων του αλουμινίου και του σιδήρου. Ένας άλλος μηχανισμός που φαίνεται ότι ισχύει επίσης για την καταβύθιση του Zn και του Cu είναι η ρόφησή τους από την επιφάνεια του ομογενοποιημένου υλικού όταν οι συνθήκες δεν είναι κατάλληλες για την αναγωγή των θειϊκών αλάτων. Η ακριβής σύσταση κάθε ενός πληρωτικού υλικού παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα 7.

Πίνακας 7: Σύσταση ενεργού υλικού σε κάθε ΕΔΦ. <sup>[14]</sup>

ΠΛΗΡΩΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	ΕΔΦ 1	ΕΔΦ 2	ΕΔΦ 3
Ασβεστόλιθος	60%	60%	60%
Ίλς λυμάτων	5%	-	-
Ομογενοποιημένη βλάστηση	35%	35%	40%
Στοιχειακός σίδηρος (Fe <sub>(s)</sub> )	-	5%	-

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Προβληματική. Αποδείχθηκε τελικά ότι ο όλος σχεδιασμός και εγκατάσταση του συστήματος έγινε με βάση ένα απλοποιημένο υδρογεωλογικό μοντέλο ενώ στην πραγματικότητα το μοντέλο αυτό ήταν πολύ πιο πολύπλοκο. Αυτό οδήγησε σε μερική και όχι πλήρη αξιοποίηση όλου του βάθους του πληρωτικού υλικού ενώ προκάλεσε και μεταβολές της ροής με συνέπεια κάποιο μέρος του ρυπασμένου ύδατος να αλλάζει πορεία και να μην περνάει μέσα από το ΕΔΦ ενώ επίσης σημαντικές διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων παρατηρούνταν κατά τις περιόδους μεγάλης βροχόπτωσης.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Συνολικά, το σύστημα εμφάνισε πολλά προβλήματα και εν τέλει μειωμένη αποδοτικότητα λόγω κυρίως του λανθασμένου σχεδιασμού του.

Γενικά, η ποιότητα των επεξεργασμένων υδάτων ήταν συνάρτηση του βάθους εντός του ΕΔΦ στο οποίο είχαν υποστεί την επεξεργασία. Πιθανόν αυτό να οφείλεται στο ότι στις ανώτερες ζώνες είχε γίνει μη επαρκής ομογενοποίηση του υλικού με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν ζώνες καθαρού ασβεστίτη με υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα.

Συγκεκριμένα, υπήρχαν διαφοροποιήσεις της ταχύτητας των υδάτων κατά βάθος εντός του ΕΔΦ. Στο κατώτερο τμήμα του (όπου η ταχύτητα ήταν πιο χαμηλή) γινόταν ικανοποιητική αύξηση του pH και η απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων έφθανε το 80% για το Al, το 47% για τον Zn και 76% για τον Cu αλλά η απομάκρυνση των θειϊκών αλάτων ήταν περιορισμένη κυρίως λόγω του ότι ο χρόνος παραμονής και επεξεργασίας εντός του ΕΔΦ ήταν μη επαρκής επομένως δεν υπήρχε ο κατάλληλος χρόνος για την δράση των θειοαναγωγικών βακτηρίων.

Επίσης, το γεγονός ότι κατά τον σχεδιασμό και την εγκατάσταση και του ΕΔΦ ακολουθήθηκε ένα πολύ πιο απλοποιημένο υδρογεωλογικό μοντέλο σε σχέση με αυτό που ίσχυε πραγματικά, είχε ως αποτέλεσμα το ΕΔΦ να μην μπορέσει να επεξεργαστεί όλο τον όγκο του ρυπασμένου ύδατος καθώς ένα μέρος του ακολούθησε την ροή εκτός της περιοχής που ήταν εγκατεστημένο το πληρωτικό υλικό του φράγματος.

Διαπιστώθηκε ακόμα ότι το πρώτο ΕΔΦ (ΕΔΦ 1) είχε πολύ χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα πιθανώς λόγω του ότι το κοκκώδες υλικό της ιλύος των λυμάτων που είχε προστεθεί σε ποσοστό 5% προκάλεσε φραγή των πόρων του πληρωτικού υλικού.

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Η κηλίδα ρύπανσης περιείχε υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (κυρίως Zn, αλλά και Cu, Al, Pb, Co, Cd, Mn) καθώς θειϊκών αλάτων. Σε αντίθεση με άλλες απορροές που επεξεργάζονται συνήθως από ένα σύστημα ΕΔΦ, οι συγκεντρώσεις του σιδήρου και του αρσενικού δεν ήταν ανησυχητικές. Επίσης το pH ήταν περίπου 4.

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Απαιτούνται πολλές έρευνες ακόμα για να μπορέσει να επέλθει βελτίωση. Η μέθοδος παρουσίασε προβλήματα ως προς την αποδοτικότητά της κυρίως λόγω λανθασμένου αρχικού σχεδιασμού του συστήματος. Για να ξεπεραστούν τα προβλήματα αυτά είναι απαραίτητο να κατανοηθούν σε πολύ μεγαλύτερο βάθος οι βιογεωχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε ένα τέτοιο σύστημα αλλά και το ποιοι παράγοντες είναι αυτοί που επηρεάζουν την ροή της κηλίδας ρύπανσης (π.χ. χρόνος παραμονής, υδραυλική αγωγιμότητα, βροχόπτωση) και τι ακριβώς επιπτώσεις έχουν.

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Όταν εφαρμόστηκε αυτό το σύστημα στην Ισπανία (περίπου το 1999), ήταν μόλις το δεύτερο που είχε εγκατασταθεί σε επίπεδο

pilot-scale παγκοσμίως και επομένως δεν υπήρχε αρκετή τεχνογνωσία. Με τα σημερινά δεδομένα, η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε τότε δεν απαιτεί κάποια ιδιαίτερη τεχνογνωσία.

## **2) Οικονομικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Ως παθητικό σύστημα επεξεργασίας δεν απαιτεί άλλη ενέργεια εκτός από τη βιοχημική που προέρχεται από την δράση των βακτηρίων. Επομένως ενεργειακά δεν επιβαρύνει το περιβάλλον.

## **3) Περιβαλλοντικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Δεν μπορεί να γίνει ασφαλής διάθεση των αποβλήτων αφού αυτά δεν έχουν σταθερή σύσταση. Άλλο μέρος έχει επεξεργαστεί από το ΕΔΦ και ανάλογα με το σε ποιο βάθος βρισκόταν έχει ικανοποιητική σύσταση και άλλο δεν πέρασε καν από το σύστημα επεξεργασίας (λόγω αλλαγής της ροής του εξαιτίας διαφόρων υδρογεωλογικών συνθηκών) και επομένως περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ασβεστόλιθος, ομογενοποιημένη βλάστηση και στοιχειακός σίδηρος, δηλ. υλικά που δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον.

## **Case study 4**

### **PRB in Vancouver, Kanada**<sup>[15]</sup>

**Τόπος:** ΕΔΦ εγκατεστημένο κοντά σε μεταλλείο που βρίσκεται στο Βανκούβερ, Καναδάς.

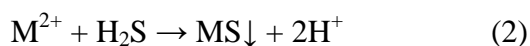
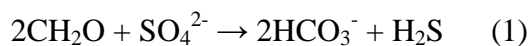
**Χρόνος εγκατάστασης:** Δεν αναφέρεται ακριβώς. Περίπου το 1998

**Χρόνος παρακολούθησης του συστήματος:** 21 μήνες

**Βασικές αρχές λειτουργίας του συστήματος:** Η κύρια αρχή στην οποία βασίζεται η λειτουργία του συστήματος είναι η δράση θειοαναγωγικών βακτηρίων (υπό τις κατάλληλες συνθήκες τις οποίες παρέχει το κύριο πληρωτικό υλικό του ΕΔΦ το οποίο είναι ένα οργανικό υπόστρωμα) μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η καταβύθιση των βαρέων μετάλλων υπό τη μορφή αδιάλυτων θειούχων ενώσεων. Η παρουσία του οργανικού υποστρώματος είναι επιθυμητή καθώς μέσω αυτού εξασφαλίζεται η επικράτηση των συνθηκών που είναι απαραίτητες για την αναγωγή των θειϊκών δηλ. όχι

μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές, όχι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (που επιδρούν αρνητικά στην δραστηριότητα των βακτηρίων) και διατήρηση του ρυθμού της ροής του πλουμίου και του χρόνου παραμονής εντός του ΕΔΦ.

Οι κύριες αντιδράσεις που πραγματοποιούνται εντός του πληρωτικού υλικού είναι:



Άλλοι δευτερεύοντες μηχανισμοί που οδηγούν στην απομάκρυνση των μετάλλων είναι η καταβύθισή τους με τη μορφή ανθρακικών αλάτων και η απευθείας απορρόφησή τους από το ενεργό υλικό.

**Περιγραφή του συστήματος :** Το ΕΔΦ εγκαταστάθηκε σε ένα σημείο όπου η ροή και στο άνω και στο κάτω μέρος του φράγματος περιείχε υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων. Οι διαστάσεις του συστήματος ήταν 2,5μ x 6,5μ x 10μ (πλάτος x βάθος x μήκος). Το ενεργό πληρωτικό υλικό ήταν ένα μίγμα που αποτελούνταν από φυτικό λίπασμα (15%), χαλίκια μπιζελιού οναμαστικής διαμέτρου 8,5 χιλιοστά (84%) και κόκκους ασβεστολίθου ονομαστικής διαμέτρου 4 χιλιοστά (1%).

Το χαλίκι μπιζελιού χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να προσδώσει την ελάχιστη απαιτούμενη υδραυλική διαπερατότητα (0,1 cm/sec) ώστε να διασφαλιστεί ότι όλη η ρυπασμένη κηλίδα θα διέλθει μέσω του πληρωτικού υλικού. Ο ασβεστόλιθος προστέθηκε ώστε να επικρατήσει το κατάλληλο pH και να διευκολυνθεί κατά αυτόν τον τρόπο η εγκατάσταση και μετέπειτα η αύξηση του πληθυσμού των θειοαναγωγικών βακτηρίων η παρουσία των οποίων είναι απαραίτητη για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος.

Η ταχύτητα του πλουμίου εντός του διαπερατού φράγματος είναι 40 cm/ημέρα και ο χρόνος παραμονής του εντός του ΕΔΦ είναι περίπου 6 ημέρες.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### **1) Τεχνολογικά κριτήρια**

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Η μέθοδος είναι αρκετά αξιόπιστη καθώς τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα αναμενόμενα σύμφωνα με τις εργαστηριακές μελέτες που είχαν προηγηθεί και με βάση τα όσα ανέφεραν οι θεωρητικές μελέτες προηγούμενων ερευνητών. Ωστόσο δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι υπάρχει σαφής διαφοροποίηση στην αποτελεσματικότητά της σε σχέση με το βάθος του ενεργού πληρωτικού υλικού.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Το σύστημα ήταν πολύ αποτελεσματικό στην απομάκρυνση των ρυπαντών κυρίως υπό τη μορφή θειούχων αδιάλυτων ενώσεων.



Χαμηλότεροι ρυθμοί απομάκρυνσης των μετάλλων παρατηρήθηκαν στο άνω μέρος του ΕΔΦ (αν θεωρήσουμε ότι το διαπερατό φράγμα χωρίζεται σε δύο μέρη, το άνω και το κάτω). Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 8) παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των κυριότερων ρυπαντών όπως μετρήθηκαν σε διάφορες χρονικές στιγμές σε δύο σημεία παρακολούθησης: στην είσοδο του ΕΔΦ (σημείο ML-2) και στην έξοδο του ΕΔΦ (σημείο ML-10) στο κατώτερο από τα δύο τμήματα του ΕΔΦ που ήταν και το περισσότερο αποδοτικό.

Πίνακας 8: Συγκεντρώσεις (σε  $\mu\text{g/L}$ ) Cd, Co, Cu, Ni, Zn σε διάφορες χρονικές στιγμές σε δύο σημεία παρακολούθησης: στην είσοδο (σημείο ML-2) και στην έξοδο (σημείο ML-10) στο κατώτερο από τα δύο τμήματα του ΕΔΦ. <sup>[15]</sup>

	Cd		Co		Cu		Ni		Zn	
	ML-2	ML-10	ML-2	ML-10	ML-2	ML-10	ML-2	ML-10	ML-2	ML-10
2 months	51.4	0.2	47.6	28.1	3960	48.6	250	68.3	10200	56.3
7 months	29.9	0.1	29.8	0.1	2630	7.3	176	1.0	6320	17.7
9 months	19.4	0.1	12.9	0.1	4030	5.7	146	1.0	3540	10.0
11 months	15.8	0.5	6.7	1.0	3510	2.0	176	2.7	2810	2.0
15 months	17.5	0.1	5.8	0.1	2340	1.6	170	1.3	2980	30.0
21 months	14.0	0.1	5.4	0.4	5580	2.9	158	2.7	2430	6.3

Η καλύτερη απόδοση του συστήματος στο κατώτερο μέρος του αποδίδεται στο ότι εκεί διατηρούνταν καλύτερα οι συνθήκες αναγωγής των θειϊκών επειδή εκεί η επίδραση της παλίρροιας και η διείσδυση του οξυγόνου ήταν περισσότερο περιορισμένες.

Ο Cu καταβυθίστηκε υπό τη μορφή αζουρίτη ( $\text{Cu}_3[\text{OH}]_2[\text{CO}_3]_2$ ) και μαλαχίτη ( $\text{Cu}_2[\text{OH}]_2[\text{CO}_3]$ ) και ο Zn καταβυθίστηκε κυρίως υπό τη μορφή σφαλερίτη ( $\text{ZnS}$ ).

Επίσης πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι η υδραυλική διαπερατότητα του πληρωτικού παρέμεινε σχεδόν σταθερή καθ' όλο το χρονικό διάστημα των 21 μηνών.

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Cu, Cd, Co, Ni, Zn, θειϊκά άλατα

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Αν και όταν εφαρμόστηκε αυτό το σύστημα (περίπου 1998) ήταν η πρώτη φορά που εγκαταστάθηκε ΕΔΦ έχοντας ως ενεργό υλικό οργανικό υπόστρωμα και επομένως δεν υπήρχε η απαιτούμενη ωριμότητα, το σύστημα ήταν πολύ αποδοτικό. Σήμερα είναι μία μέθοδος που εφαρμόζεται συχνά και επομένως υπάρχει πλέον η απαιτούμενη τεχνογνωσία.

## **2) Οικονομικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Για να λειτουργήσει το σύστημα η μόνη ενέργεια που απαιτείται είναι η βιοχημική που προέρχεται από την δράση των βακτηρίων και συνεπώς η μέθοδος δεν επιβαρύνει το περιβάλλον από ενεργειακή άποψη.

## **3 Περιβαλλοντικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Μπορεί να γίνει με ασφάλεια αφού η μέθοδος οδηγεί σε δραστική μείωση της συγκέντρωσης των ρυπαντών.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν φυτικό λίπασμα, χαλίκια μπιζελιού και κόκκοι ασβεστολίθου δηλ. υλικά φιλικά προς το περιβάλλον.

## **Case study 5**

### **PRB in Synthesia Pardubice in Bohemia, Τσεχία**<sup>[16]</sup>

**Τόπος:** ΕΔΦ εγκατεστημένο στο προάστιο Synthesia Pardubice στην ανατολική Βοημία, Τσεχία

**Χρόνος παρακολούθησης του συστήματος:** Ιανουάριος 2004-Ιανουάριος 2005

**Περιγραφή του συστήματος:** Πρόκειται για ένα σύστημα που ανήκει στην κατηγορία των ΕΔΦ και στηρίζεται στο φαινόμενο της βιοδιήθησης. Η ιδιαιτερότητα εδώ είναι ότι οι ρυπαντές δεν καταβυθίζονται μέσω κάποιων αντιδράσεων αλλά πρώτα προσροφώνται στο ενεργό πληρωτικό υλικό και εκεί διασπώνται από εξειδικευμένους μικροοργανισμούς. Κρίσιμη για την αποδοτική λειτουργία αυτού του συστήματος είναι η επιλογή του κατάλληλου βιοενεργού υλικού το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σαν πληρωτικό υλικό. Το υλικό αυτό πρέπει να πληροί ορισμένες προϋποθέσεις που ισχύουν και για τα κλασσικά συστήματα ΕΔΦ (π.χ. να είναι συμβατό με την σύσταση της ρυπασμένης κηλίδος, να έχει κατάλληλο μέγεθος κόκκων, να παρουσιάζει κατάλληλη διαπερατότητα, να έχει σταθερότητα και χαμηλό κόστος) αλλά όχι μόνο αυτά. Πρέπει να εξασφαλίζει τις βέλτιστες συνθήκες για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών (δεν πρέπει να αναστέλλει ή να επηρεάζει αρνητικά την μεταβολική δραστηριότητα των βακτηρίων και επίσης πρέπει να διασφαλίζει την δυνατότητα ανάπτυξής τους αλλά και την δημιουργία ενός ενεργού βιοφίλμ. Ακόμη είναι απαραίτητο να υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες για την

ανάπτυξη των μικροοργανισμών (δηλ. κατάλληλο pH και επαρκής ποσότητα θρεπτικών συστατικών)

Η αναγκαιότητα για την εξασφάλιση όλων αυτών των συνθηκών οδηγεί στην ανάπτυξη τεχνολογικών τροποποιήσεων σε σχέση με τον σχεδιασμό που ισχύει για τα κλασσικά ΕΔΦ. Όμως η προσπάθεια ελέγχου των συνθηκών που επικρατούν σε ένα τέτοιο σύστημα μερικές φορές γεννά κάποια προβλήματα. Ένα τέτοιο πρόβλημα είναι η υπερ-ανάπτυξη του βιοφίλμ, κάτι που οδηγεί σε μειωμένη διαπερατότητα του ενεργού υλικού και εκτός αυτού μπορεί να αλλάξει την ροή των υπόγειων υδάτων και να τα κατευθύνει σε περιοχή εκτός του ΕΔΦ.

Τα συστήματα ΕΔΦ χωρίζονται στις εξής τρεις κατηγορίες:

- 1) Συνεχές ΕΔΦ (Continual PRB)
- 2) Funnel-and-gate PRB
- 3) Trench-and-gate PRB

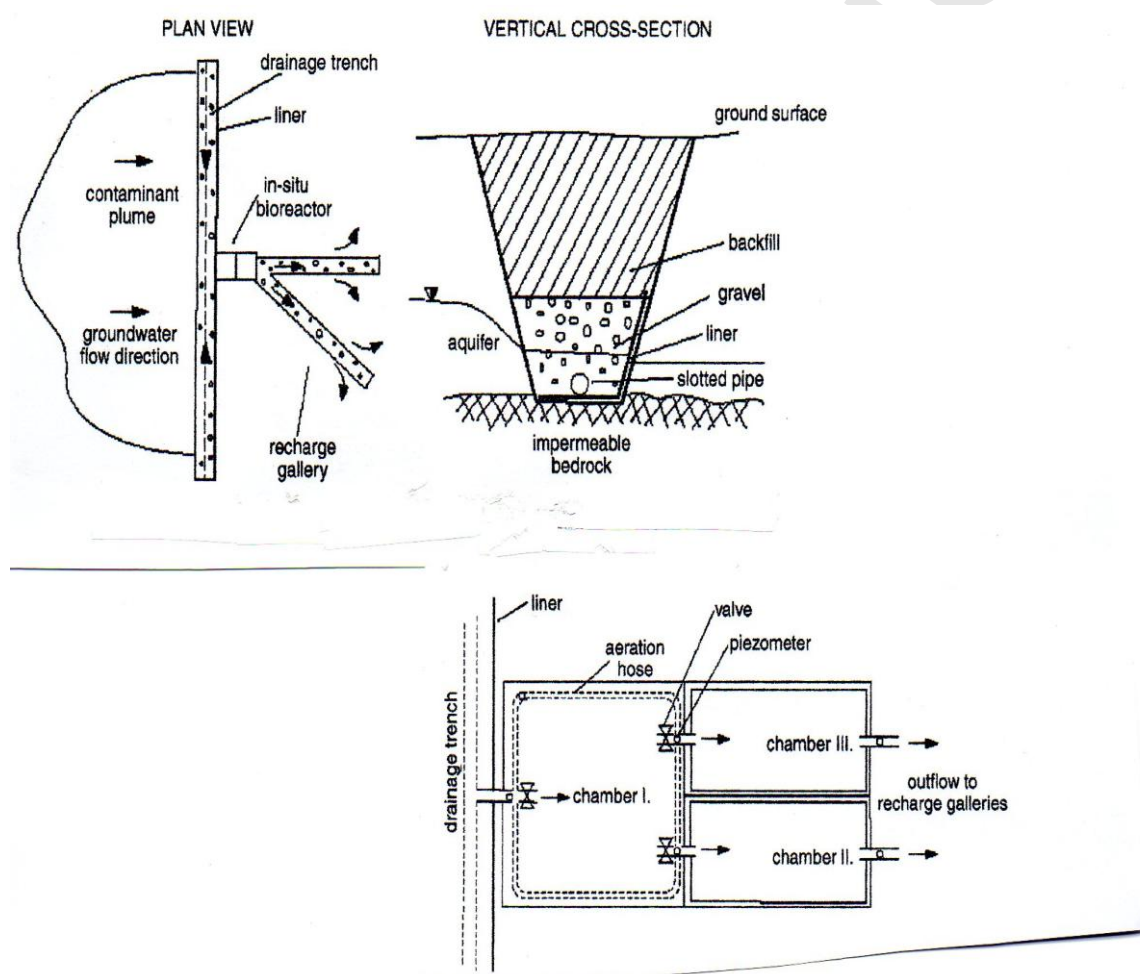
Το σύστημα που εφαρμόστηκε στην προκειμένη περίπτωση ανήκε στην τρίτη κατηγορία. Οι διαστάσεις του ΕΔΦ ήταν 1-1,5μ x 2,6-3μ x 13μ (πλάτος x βάθος x μήκος). Ο πάτος του καλυπτόταν από μία ζώνη πλαστικού υλικού που χρησιμοποιούνταν ως μονωτικό ενώ πάνω από αυτή τη ζώνη υπήρχε ένα διαπερατό στρώμα χαλικιού και χώματος. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 18, ένα μέρος του όλου συστήματος αποτελούσε ένα βιοαντιδραστήρας που ήταν χωρισμένος σε τρία τμήματα (θαλάμους). Ο βιοαντιδραστήρας αυτός είχε εξωτερικές διαστάσεις 2μ x 1,2μ x 4,8μ. Ο πρώτος θάλαμος που είχε ενεργό όγκο 3,28m<sup>3</sup> ήταν εφοδιασμένος με ένα τμήμα αερισμού στη βάση του. Οι δύο άλλοι θάλαμοι ήταν συνδεδεμένοι μεταξύ τους παράλληλα και ο καθένας περιείχε μία ζώνη με διαφορετικό βιολογικό υλικό που λειτουργούσε σαν βιολογικό φίλτρο (ο ένας είχε κόκκους κεραμικού υλικού αναμεμιγμένους με ασβεστόλιθο και χαλίκι και ο άλλος είχε κόκκους οξειδωμένου λιγνίτη που είχαν αναμιχθεί πάλι με ασβεστόλιθο και χαλίκι).

Οι μικροοργανισμοί που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν ήταν τα γένη *A. Xylooxidans* και *Rahnella sp.* Πρόκειται για βακτήρια που υπήρχαν ήδη στα υπόγεια ύδατα. Το σημαντικό είναι ότι τα γένη αυτά δεν εμβολιάστηκαν στα βιολογικά φίλτρα των θαλάμων του βιοαντιδραστήρα αλλά απλώς ενισχύθηκε η ανάπτυξη όσων ήδη υπήρχαν μέσω του αερισμού και της παροχής ικανής ποσότητας θρεπτικών συστατικών.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

## 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Ο χρόνος παρακολούθησης της λειτουργίας του συστήματος ήταν πολύ μικρός (μόλις 12 μήνες) και δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την αξιοπιστία του. Μία πρώτη εκτίμηση που θα μπορούσε να γίνει είναι ότι η μέθοδος ήταν αρκετά αξιόπιστη αφού δεν αναφέρονται αιτίες που να μας οδηγούν σε κάποιο άλλο συμπέρασμα και καθώς τα αποτελέσματά της είναι σύμφωνα με αυτά των εργαστηριακών πειραμάτων που είχαν προηγηθεί.



Σχήμα 18<sup>[16]</sup>: Σχηματική απεικόνιση τόσο του συνολικού συστήματος (επάνω) όσο και του βιοαντιδραστήρα που χωρίζεται σε τρεις θαλάμους (κάτω σχεδιάγραμμα).

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Το σύστημα στοχεύει κυρίως στην απομάκρυνση οργανικών ρυπαντών και αυτό το καταφέρνει σε ικανοποιητικό βαθμό. Βεβαίως σε κάθε θάλαμο διαφέρει το ποσοστό απομάκρυνσης που επιτυγχάνεται για κάθε οργανικό ρυπαντή όμως σαν γενικό συμπέρασμα μπορούμε να πούμε ότι σε κάθε θάλαμο τα ποσοστά αυτά κυμαίνονται από 20% έως 98%.

Αντίθετα, η μέθοδος δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην κατεργασία των ανόργανων ρυπαντών. Στον πρώτο θάλαμο η μέγιστη μείωση ήταν 22% και αφορούσε το  $\text{NH}_4^+$ . Στον δεύτερο θάλαμο η μεγαλύτερη απομάκρυνση που επιτεύχθηκε ήταν μόλις 10% και στον τρίτο θάλαμο ο ρυπαντής που απομακρύνθηκε πιο πολύ (κατά 28%) ήταν το  $\text{NO}_3^-$ .

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Εξετάστηκε η αποδοτικότητα του συστήματος τόσο σε ότι αφορά ανόργανους ρυπαντές ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) όσο (και αυτό είναι το ενδιαφέρον σε αυτή την εφαρμογή) και ως διάφορους οργανικούς διαλύτες π.χ. ολικούς υδρογονάνθρακες πετρελαίου (TPH), τριχλωροαιθυλένιο (TCE), φαινόλες, ναφθαλίνη, χλωριωμένες βενζίνες και BTEX

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Το σύστημα που εφαρμόστηκε ανήκε σε μια κατηγορία (Trench-and-gate) που δεν έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά συστήματα που βρίσκονται σε πιλοτική εφαρμογή. Επίσης ήταν πρωτοποριακό ως προς τον σχεδιασμό του βιοαντιδραστήρα (ιδιαίτερα ο χωρισμός του σε τρεις διαφορετικούς θαλάμους) αλλά και ως προς την επιλογή του οξειδωμένου γαληνίτη ως πληρωτικού υλικού στο ΕΔΦ. Επομένως δεν υπήρχε η απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα γιατί το σύστημα ήταν καινοτόμο και είχε λίγο χρόνο λειτουργίας (<12 μήνες).

## **2) Οικονομικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Ως παθητικό σύστημα επεξεργασίας δεν απαιτεί άλλη ενέργεια εκτός από τη βιοχημική που προέρχεται από την δράση των βακτηρίων. Επομένως ενεργειακά δεν επιβαρύνει το περιβάλλον.

## **3 Περιβαλλοντικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Η διάθεση των αποβλήτων είναι ασφαλής σε ότι αφορά τους οργανικούς ρυπαντές στην απομάκρυνση των οποίων στοχεύει κυρίως η μέθοδος.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κεραμικό υλικό, ασβεστόλιθο, χαλίκι, οξειδωμένο γαληνίτη, και μικροοργανισμοί που ανήκαν στα γένη *A. Xylosoxidans* και *Rahnella sp.* Από όλα αυτά τα υλικά, το μόνο που δεν είναι τόσο φιλικό προς το περιβάλλον είναι ο οξειδωμένος γαληνίτης ο οποίος ούτως ή άλλως υπάρχει αφού είναι απόβλητο των ανθρακορυχείων.

Στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 9, Πίνακας 10, Πίνακας 11) παρουσιάζονται συνοπτικά τα case studies που αναλύθηκαν παραπάνω και συγκρίνονται μεταξύ τους ως προς κάθε κατηγορία κριτηρίων (τεχνολογικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά).

Πίνακας 9: Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ΕΔΦ

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΔΦ								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη παρακολούθησης	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργασόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
PRB in Vapokon on Funen Island, Denmark <sup>[11]</sup>	1999-2007	Σχετικά αξιόπιστη. Πρόβλημα η ετερογένεια στην κηλίδα ρύπανσης που προκαλεί μερική και όχι πλήρη αξιοποίηση του φράγματος. Πιθανόν οδηγεί σε μερική παθητικοποίησή του.	Ιδιαίτερος αποδοτική. Απομακρύνει (ακόμα και κατά 99%) τους κυριότερους ρυπαντές τύπου CAHs. Συνεχιζόταν ακόμα η μείωση της συγκέντρωσης του θείου	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Απαιτείται τουλάχιστον μια δεκαετία λειτουργίας για σωστή πρόβλεψη της μακρόχρονης λειτουργικότητας της μεθόδου	Διάφορες ενώσεις της κατηγορίας των CAHs καθώς και Mg, Na, K, Fe, Ca, S	Υπάρχουν. Προτείνεται η εγκατάσταση ενός άλλου βοηθητικού ΕΔΦ στο κάτω μέρος της ροής της κηλίδας ρύπανσης ή η ενίσχυση της ύπαρξης βακτηρίων του γένους <i>Dehalococcoides</i>	Υπάρχει αφού η εφαρμοζόμενη τεχνολογία χρησιμοποιείται ευρύτατα σε συστήματα τέτοιου είδους.
PRB in Northumberland, UK <sup>[13]</sup>	2003-2005	Σχετική. Μεγάλες διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις των μετάλλων ιδίως έπειτα από ημέρες σημαντικής βροχόπτωσης	Πολύ καλή απομάκρυνση για το Fe (περίπου 95%) και το Al. Μικρή απομάκρυνση του Mn. Όχι σοβαρές μεταβολές στο pH που παραμένει εκτός ορίων.	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Απαιτείται τουλάχιστον μια δεκαετία λειτουργίας για σωστή πρόβλεψη της μακρόχρονης λειτουργικότητας της μεθόδου	Κυρίως Fe, Al, Mn	Υπάρχουν. Προτείνεται επέκταση του ΕΔΦ για επεξεργασία και άλλων λυμάτων και χρήση μπρικετών διττανθρακικού νατρίου. Επίσης εξετάζεται η ανακύκλωση C&S εντός της μονάδος.	Δεν απαιτείται καινοτόμος τεχνολογία.

**Πίνακας 9 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ΕΔΦ

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΔΦ								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη παρακολούθησης	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
PRB in Aznalcollar (Sw Spain) <sup>[14]</sup>	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία. Λίγο μετά το 1998 και παρακολούθηθηκε για 36 μήνες	Προβληματική λόγω λάθους αρχικού σχεδιασμού του συστήματος και μεγάλης διαφοροποίησης της τελικής σύστασης των αποβλήτων ανάλογα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες.	Μη σταθερή. Εξαρτάται από το βάθος στο οποίο βρίσκεται η κηλίδα ρύπανσης. Υπάρχουν αποδοτικές ζώνες εντός του ΕΔΦ και άλλα τμήματα του ΕΔΦ που είχαν χαμηλή αποδοτικότητα ή δεν αξιοποιήθηκαν καθόλου.	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Απαιτείται τουλάχιστον μια δεκαετία λειτουργίας για σωστή πρόβλεψη της μακρόχρονης λειτουργικότητας της μεθόδου	Κυρίως Zn, Al, Cu, θειικά άλατα.	Για να υπάρξουν προοπτικές βελτίωσης χρειάζεται πολλή έρευνα ακόμα για την εις βάθος κατανόηση των υδρογεωλογικών και βιοχημικών μηχανισμών που επηρεάζουν το σύστημα.	Τότε (1998 περίπου) δεν υπήρχε επαρκής τεχνογνωσία. Σήμερα, δεν δείχνει να χρησιμοποιεί κάποια πολύ ιδιαίτερη μέθοδο.

**Πίνακας 9 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ΕΔΦ

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΔΦ</b>								
<b>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>								
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Αξιοπιστία μεθόδου</b>	<b>Αποδοτικότητα μεθόδου</b>	<b>Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ</b>	<b>Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου</b>	<b>Πλήθος ρυπαντών</b>	<b>Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου</b>	<b>Ωριμότητα τεχνολογίας</b>
PRB in Vancouver, Kanada <sup>[15]</sup>	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία. Εγκαταστάθηκε το 1998 (περίπου) και παρακολούθηθηκε για 21 μήνες	Αρκετά αξιόπιστη καθώς επιβεβαιώνονται οι εργαστηριακές μελέτες και η υδραυλική διαπερατότητα διατηρείται σταθερή. Προσοχή χρειάζεται στη μεταβολή δραστηριότητας κατά μήκος του ΕΔΦ.	Πολύ αποδοτική. Απομακρύνει μεγάλες ποσότητες ρυπαντών και διατηρεί την υδραυλική διαπερατότητα του πληρωτικού υλικού. Ο βαθμός απόδοσης μεταβάλλεται κατά μήκος του ΕΔΦ.	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Απαιτείται τουλάχιστον μια δεκαετία λειτουργίας για σωστή πρόβλεψη της μακρόχρονης λειτουργικότητας της μεθόδου	Cu, Cd, Co, Ni, Zn, θειικά άλατα	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Τότε (1998) ήταν πρωτοποριακή μέθοδος. Σήμερα χρησιμοποιείται συχνά. Άρα υπάρχει τεχνολογική ωριμότητα.



**Πίνακας 9 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ΕΔΦ

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΔΦ								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη παρακολούθησης	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
PRB in Synthesia Pardubice in Bohemia, Τσεχία <sup>[16]</sup>	Εγκατάσταση: Ιανουάριος 2012 Χρόνος παρακολούθησης: 12 μήνες	Μη επαρκής χρόνος λειτουργίας για ασφαλή κρίση. Γενικά είναι αρκετά αξιόπιστη αφού επιβεβαιώνει τα εργαστηριακά πειράματα. Όμως δεν είναι επαρκής ο χρόνος λειτουργίας για ασφαλή κρίση.	Μικρή απομάκρυνση ανόργανων ρυπαντών. Το σύστημα λειτουργεί ικανοποιητικά στην κατεργασία οργανικών ρυπαντών.	Δεν υπάρχουν στοιχεία	12 μήνες λειτουργίας είναι λίγος χρόνος για ένα σύστημα ΕΔΦ. Απαιτείται τουλάχιστον μια δεκαετία λειτουργίας για σωστή πρόβλεψη της μακρόχρονης λειτουργικότητας της μεθόδου	Ανόργανους ρυπαντές (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Cl <sup>-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) και οργανικούς (TPH), (TCE), φαινόλες, ναφθαλίνη, χλωριωμένες βενζίνες και BTEX	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπήρχε επαρκής τεχνολογική ωριμότητα γιατί το σύστημα ήταν πρωτοποριακό ως προς τον σχεδιασμό αλλά και την χρήση οξειδωμένου γαληνίτη σαν πληρωτικού υλικού. Ακόμα είχε λίγο χρόνο λειτουργίας (μόλις 12 μήνες).

**Πίνακας 10:** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα οικονομικά κριτήρια για τη μέθοδο ΕΔΦ

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΔΦ</b>						
<b>ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Σταθερό Κόστος</b>	<b>Λειτουργικό Κόστος</b>	<b>Κόστος συλλογής &amp; αποθήκευσης επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Κόστος επεξεργασίας αποβλήτου</b>	<b>Κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>
PRB in Vapokon on Funen Island, Denmark <sup>[11]</sup>	1999-2007	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία
PRB in Northumberland, UK <sup>[13]</sup>	2003-2005	94117,65 (δολ. ΗΠΑ)	7843,13 /έτος (δολ. ΗΠΑ)	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία
PRB in Aznalcollar (Sw Spain) <sup>[14]</sup>	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία. Λίγο μετά το 1998 και παρακολούθηθηκε για 36 μήνες	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία
PRB in Vancouver, Kanada <sup>[15]</sup>	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία. Εγκαταστάθηκε το 1998 (περίπου) και παρακολούθηθηκε για 21 μήνες	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία
PRB in Synthesia Pardubice in Bohemia, Τσεχία <sup>[16]</sup>	Εγκατάσταση: Ιανουάριος 2012 Χρόνος παρακολούθησης: 12 μήνες	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία

**Πίνακας 11:** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο ΕΔΦ

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΔΦ</b>						
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
PRB in Vapokon on Funen Island, Denmark <sup>[11]</sup>	1999-2007	Μπορεί να γίνει με ασφάλεια για το μεγαλύτερο πλήθος ρυπαντών	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Πληρωτικό υλικό φράγματος: κόκκοι στοιχειακού σιδήρου. Υπάρχει ακόμα μία ζώνη αμμοχάλικα. Όλες οι πρώτες ύλες είναι φιλικές στο περιβάλλον.	Απαιτείται μόνο βιοχημική ενέργεια που προέρχεται από τα αναπτυσσόμενα βακτήρια και τις αντιδράσεις.	Δεν υπάρχουν στοιχεία
PRB in Northumberland, UK <sup>[13]</sup>	2003-2005	Συγκεντρώσεις όλων των μετάλλων εντός ορίων εκτός από Mn.	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Μίγμα από πολύ καλά συμπιεσμένα κόπρινα αλόγων και άχυρο, συμπιεσμένα λιπάσματα και ασβεστολιθικά χάλικα. Όλα ακίνδυνα για το περιβάλλον.	Απαιτείται μόνο βιοχημική ενέργεια που προέρχεται από τα αναπτυσσόμενα βακτήρια και τις αντιδράσεις.	Δεν υπάρχουν στοιχεία

**Πίνακας 11 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο ΕΔΦ

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΔΦ</b>						
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
PRB in Aznalcollar (Sw Spain) <sup>[14]</sup>	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία. Λίγο μετά το 1998 και παρακολούθηθηκε για 36 μήνες	Η διάθεση αποβλήτων είναι μη ασφαλής εξαιτίας της ισχυρά διαφοροποιημένης σύστασης τους που ποικίλλει από συγκεντρώσεις μετάλλων εντός ορίων έως και μη επεξεργασμένα απόβλητα.	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Μίγμα από ασβεστόλιθο, ομογενοποιημένη βλάστηση και στοιχειακό σίδηρο. Όλα είναι ακίνδυνα για το περιβάλλον.	Απαιτείται μόνο βιοχημική ενέργεια που προέρχεται από τα αναπτυσσόμενα βακτήρια και τις αντιδράσεις.	Δεν υπάρχουν στοιχεία
PRB in Vancouver, Kanada <sup>[15]</sup>	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία. Εγκαταστάθηκε το 1998 (περίπου) και παρακολούθηθηκε για 21 μήνες	Μπορεί να γίνει με ασφάλεια αφού η μέθοδος είναι πολύ αποτελεσματική.	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Μίγμα από φυτικό λίπασμα, χαλίκια μπιζελιού και κόκκοι ασβεστολίθου δηλ. υλικά φιλικά προς το περιβάλλον.	Η μέθοδος δεν επιβαρύνει το περιβάλλον από ενεργειακή άποψη. Απαιτείται μόνο βιοχημική ενέργεια προ τη δίνουν τα βακτήρια.	Δεν υπάρχουν στοιχεία

**Πίνακας 11 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο ΕΔΦ

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΔΦ</b>						
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
PRB in Synthesia Pardubice in Bohemia, Τσεχία <sup>[16]</sup>	Εγκατάσταση: Ιανουάριος 2012 Χρόνος παρακολούθησης: 12 μήνες	Ασφαλής σε ότι αφορά τους οργανικούς ρυπαντές στην απομάκρυνση των οποίων στοχεύει κυρίως η μέθοδος.	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Χρησιμοποιήθηκαν κεραμικό υλικό, ασβεστόλιθο, χαλίκι, οξειδωμένος γαληνίτης, Πρόβλημα δημιουργεί μόνο ο οξειδωμένος γαληνίτης ο οποίος ούτως ή άλλως υπάρχει αφού είναι απόβλητο των ανθρακωρυχείων.	Απαιτείται μόνο βιοχημική ενέργεια που προέρχεται από τα αναπτυσσόμενα βακτήρια και τις αντιδράσεις.	Δεν υπάρχουν στοιχεία

## 5.3 ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΙ ΥΓΡΟΤΟΠΟΙ (ANAEROBIC WETLANDS)

### Case study 1

#### ANAEROBIC WETLAND in Durham, UK<sup>[17]</sup>

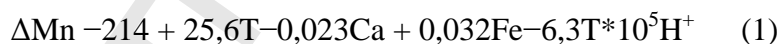
**Τόπος:** 12 χλμ νότια από το Durham που βρίσκεται στη βόρεια Αγγλία.

**Χρόνος παρακολούθησης του συστήματος:** Δεκέμβριος 2003-Μάιος 2009

**Περιγραφή του συστήματος:** Το σύστημα που εγκαταστάθηκε ανήκε στην κατηγορία των συστημάτων αναγωγής και παραγωγής αλκαλικότητας (RAPS). Το προς επεξεργασία υγρό περνά πρώτα με κάθετη ροή μέσα από ένα οργανικό στρώμα και έπειτα διέρχεται μέσα από ένα στρώμα ασβεστολίθου. Κατά τη διέλευσή του από το οργανικό στρώμα απομακρύνεται το οξυγόνο μέσω της δράσης αερόβιων μικροοργανισμών και έτσι εμποδίζεται η καταβύθιση του σιδήρου με τη μορφή οξειδίου ή υδροξειδίου. Η παρουσία αυτών των ενώσεων του σιδήρου είναι ανεπιθύμητη γιατί επικάθονται στους πόρους του ασβεστολιθικού υποστρώματος και τους φράσσουν.

Κύριοι μηχανισμοί απομάκρυνσης των ρυπαντών:

Ο ρυθμός απομάκρυνσης του S ως προς το Fe (S:Fe) δείχνει ότι υπάρχει ένα πλήθος χημικών διεργασιών που πραγματοποιούνται ταυτόχρονα και οδηγούν στην καταβύθιση σουλφιδίων (FeS, FeS<sub>2</sub>) και οξυ-υδροξειδίων του θείου αλλά και ότι το θείο μπορεί και καταβυθίζεται υπό τη μορφή και άλλων ενώσεων που δεν περιέχουν σίδηρο. Το Al απομακρύνεται κυρίως με τη μορφή υδροξειδίου αλλά και σαν ίζημα στην επιφάνεια οξυ-υδροξειδίων του σιδήρου. Η απομάκρυνση του Mn συμβαίνει στο ασβεστολιθικό υπόστρωμα και εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων (θερμοκρασία, απομάκρυνση σιδήρου, κινητοποίηση ασβεστίου, pH του προς επεξεργασία αποβλήτου) όπως φαίνεται στην εξίσωση 1<sup>[17]</sup>, με τον ρυθμό κινητοποίησης του Ca να έχει την σημαντικότερη επίδραση.



ΔMn: ρυθμός απομάκρυνσης μαγγανίου (mg/min), T: θερμοκρασία στο σημείο εισόδου σε °C, Ca: ρυθμός κινητοποίησης ασβεστίου (mg/min), Fe : ρυθμός απομάκρυνσης σιδήρου (mg/min).

Η απομάκρυνση είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνονται το pH και η θερμοκρασία και όσο καταβυθίζεται ο σίδηρος (πιθανώς λόγω συγκαταβύθισης με αυτόν) ενώ ακόμη δεν έχει εξηγηθεί πλήρως η αρνητική συσχέτιση του ρυθμού καταβύθισης του ασβεστίου με την καταβύθιση του μαγγανίου. Οι ορυκτολογικές αναλύσεις του υποστρώματος έδειξαν ότι

περισσότερο από το 50% του Mn που είχε απομακρυνθεί ήταν συνδεδεμένο με ανθρακικά ιόντα.

**Περιγραφή του συστήματος:** Το όλο σύστημα που λειτούργησε σε επίπεδο full-scale αποτελείται (βλ. σχήμα 17) από δύο διαφορετικά RAPS που είναι παράλληλα μεταξύ τους. Κάθε ένα RAPS συνδέεται με έναν αερόβιο υγρότοπο όπου εκεί ολοκληρώνεται η επεξεργασία. Πιο συγκεκριμένα, κάθε ένα σύστημα RAPS είχε τα εξής χαρακτηριστικά:

Διαστάσεις RAPS 1: 86,3m x 4,5-22,5m x 0,8m (μήκος x πλάτος x βάθος).

Επιφάνεια RAPS 1: 1511 m<sup>2</sup>

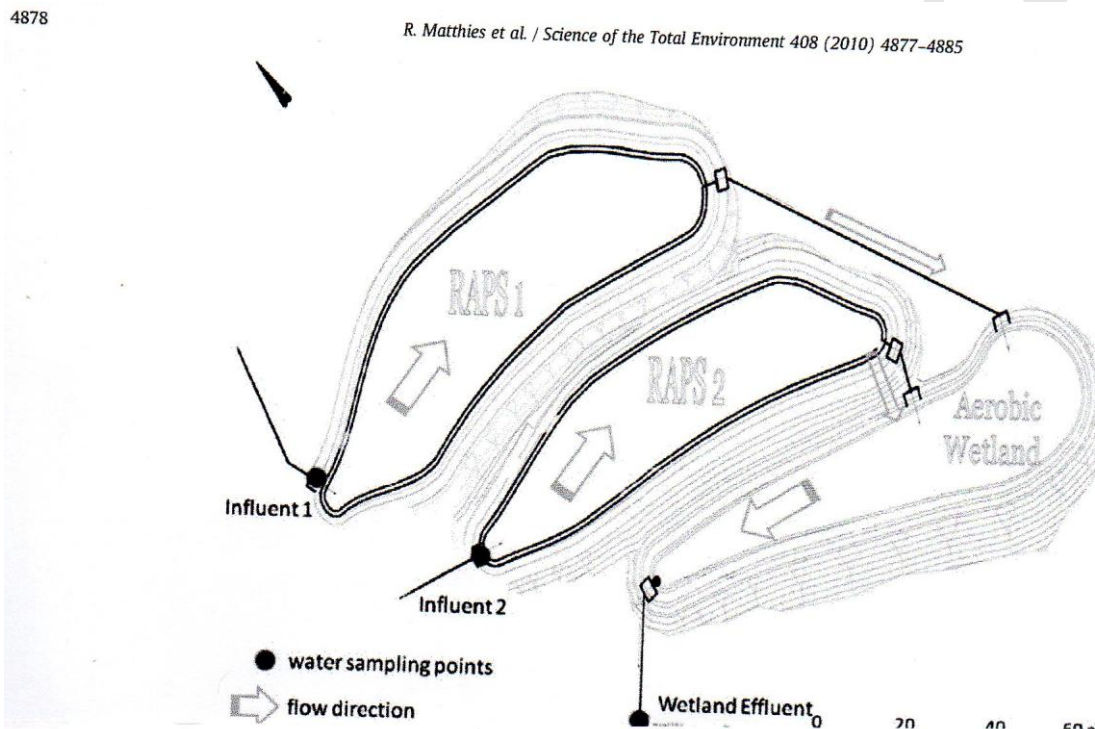
Διαστάσεις RAPS 2: 83,7m x 5-16,3m x 0,8m (μήκος x πλάτος x βάθος).

Επιφάνεια RAPS 2: 1124 m<sup>2</sup>

Το υλικό που περιείχαν τα συστήματα αυτά ήταν ένα μίγμα που αποτελούνταν από πολύ καλά αναμεμειγμένο ασβεστολιθικό χαλίκι, κόπραννα αγελάδων και συσσωματώματα άχυρου. Οι έξοδοι των συστημάτων αυτών αποτελούνταν από ένα σύστημα σωληνώσεων που είχαν πόρους και το οποίο βρισκόταν κάτω από το στρώμα του συσσωματωμένου ασβεστολίθου ώστε να αδειάζει το ήδη επεξεργασμένο υγρό. Υπήρχε ακόμα ένα άλλο σύστημα σωληνώσεων του οποίου ο ρόλος ήταν να προστατεύει το κάθε RAPS από πιθανή υπερχειλίση. Ο κίνδυνος αυτός ήταν ισχυρός κατά τις χρονικές περιόδους που συνέβαιναν πολλές βροχοπτώσεις. Οι σωληνώσεις αυτές φάνηκαν ιδιαίτερα χρήσιμες καθώς κατά τη λειτουργία των συστήματος πραγματοποιήθηκαν πολλά επεισόδια υπερχειλίσης και έτσι αρκετή ποσότητα ανεπεξέργαστων αποβλήτων πέρασε μέσω αυτών των σωληνώσεων κατευθείαν στο αερόβιο υγρότοπο.

Ο αερόβιος υγρότοπος είχε διαστάσεις 88,8m x 5,3-19,5m x 0,9-1m (μήκος x πλάτος x βάθος) και η έκτασή του ήταν 990 m<sup>2</sup>. Στο κατώτερο στρώμα του υπήρχε ένα σύστημα σωληνώσεων για να επιτυγχάνεται αερισμός του υπερκείμενου υγρού. Η παραμονή των αποβλήτων εκεί διαρκούσε 1 έως 2 ημέρες. Το παθητικό αυτό σύστημα (βλ. σχήμα 14) επεξεργάστηκε απόβλητα που προέρχονταν από τρία διαφορετικά μέρη. Τα δύο πρώτα μέρη βρίσκονταν σε ένα εγκαταλελειμμένο ανθρακωρυχείο και πήγαιναν στο σημείο εισόδου 1 στον πρώτο RAPS (βλ. σχήμα 20) όπου παρέμεναν για επεξεργασία από τα 4 έως 8 ημέρες ενώ το τρίτο μέρος βρίσκονταν σε μία περιοχή απόθεσης στείρων και τα απόβλητα από εκεί εισέρχονταν στο σημείο 2 στον δεύτερο RAPS (βλ. σχήμα 20) όπου επεξεργάζονταν για 4-6 ημέρες. Η ταχύτητα εισροής των προς επεξεργασία αποβλήτων και στα δύο σημεία ήταν περίπου 0,01m/h. Ο RAPS 2 επεξεργαζόταν απόβλητα που είχαν υψηλή οξύτητα (τετραπλάσια αυτής των αποβλήτων που εισέρχονταν στον RAPS 1 και οι συγκεντρώσεις των κυριότερων ρυπαντών (Fe, Al, Zn, Mn, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) ήταν τρεις έως

έξι φορές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στο σημείο εισόδου 1. Αντίθετα, η αλκαλικότητα των υγρών στο σημείο εισόδου 1 ήταν διπλάσια αυτής στο σημείο εισόδου 2 και προερχόταν πιθανώς από την διαλυτοποίηση των ανθρακικών αλάτων του Ca και του Mg.



Σχήμα 19<sup>[17]</sup>: Σχεδιάγραμμα του παθητικού συστήματος επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκε στο Durham.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### 1) Τεχνολογικά κριτήρια

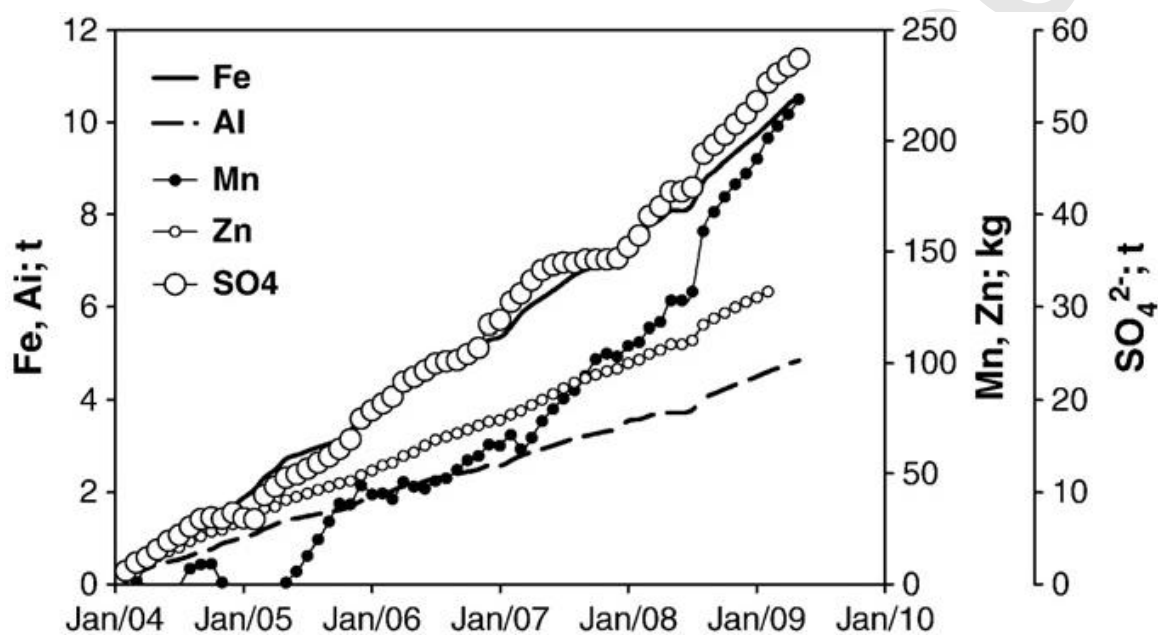
**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Η μέθοδος είναι αρκετά αξιόπιστη καθώς παρά τις μεταβολές των φυσικοχημικών παραμέτρων που παρατηρούνται ανάλογα με την εποχή, το σύστημα δείχνει να έχει σταθερή συμπεριφορά στον τρόπο λειτουργίας του και τα 5 χρόνια.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Το σύστημα ήταν πολύ αποδοτικό (βλ. σχήμα 21) σε ότι αφορά την απομάκρυνση του Fe, του Al, των θειικών ιόντων και της οξύτητας (σε σχέση με τη σύσταση των εισερχόμενων αποβλήτων) ενώ το pH και η αλκαλικότητα αυξανόταν συνεχώς. Όμως για τα στοιχεία Zn, Mn, η αποδοτικότητα δεν ήταν τόσο καλή αφού η απομάκρυνσή τους δεν ήταν συνεχής γιατί σε ορισμένες χρονικές στιγμές



συνέβαινε ακινητοποίησή τους. Έτσι τελικά, οι συγκεντρώσεις του Mn και των  $\text{SO}_4^{2-}$  ενώ είχαν μειωθεί πολύ σε σχέση με τις αρχικές, συνέχιζαν να παραμένουν εκτός των επιτρεπόμενων ορίων.

Η αποδοτικότητα του συστήματος ως προς την απομάκρυνση των κυριότερων ρυπαντών με σειρά φθίνουσας απομάκρυνσης είναι:  $\text{Al} > \text{Fe} > \text{οξύτητα} > \text{Zn} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mn}$ .



Σχήμα 20<sup>[17]</sup>: Καμπύλες συνολικής απομάκρυνσης των κυριότερων ρυπαντών κατά την διάρκεια των 5,5 χρόνων λειτουργίας του συστήματος.

Οι ρυθμοί απομάκρυνσης των ρυπαντών ήταν μικρότεροι από αυτούς που έχουν παρατηρηθεί σε παρόμοια συστήματα και παρόλο που μεταβάλλονταν σημαντικά ανάλογα με την εποχή, παρέμεναν σταθεροί (κατά μέσο όρο) στα 5 χρόνια λειτουργίας του συστήματος γεγονός πολύ ενθαρρυντικό γιατί δείχνει ότι το σύστημα ήταν μετά από πέντε χρόνια εξίσου αποδοτικό όπως στην αρχή. Το μόνο αρνητικό ήταν η σημαντική μείωση του ρυθμού κινητοποίησης του ασβεστίου και των διττανθρακικών ιόντων (που πιθανότατα οφείλεται στην φραγή των πόρων του ασβεστολιθικού υποστρώματος) το οποίο δηλώνει την πιθανότητα να χρειαστεί αναγέννηση του υποστρώματος στο άμεσο μέλλον γιατί διαφορετικά δεν επαρκεί για να χρησιμοποιηθεί ως θρεπτικό υλικό από τα θειοαναγωγικά βακτήρια.

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Fe, Al, Zn, Mn, θειϊκά ιόντα

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Είναι περιορισμένες καθώς απαιτείται αντιμετώπιση της μειωμένης (με την πάροδο του χρόνου) κινητοποίησης του

ασβεστίου και των διττανθρακικών. Οι διάφορες λύσεις που υπάρχουν για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος (π.χ. απομάκρυνση των καταβυθισμάτων) δεν δείχνουν να είναι τόσο αποδοτικές. Φαίνεται λοιπόν ότι δεν μπορεί να αποφευχθεί η αλλαγή του ασβεστολιθικού υποστρώματος του οποίου οι πόροι φράσσονται με το πέρασμα των χρόνων καθώς σε αυτούς εναποτίθενται διάφορες ενώσεις. Αυτό θα πρέπει να γίνει όταν πια δεν θα μπορεί να ρυθμιστεί το pH στα επιθυμητά επίπεδα. Η λύση αυτή είναι ακριβή διότι περιλαμβάνει και το κόστος διάθεσης του υποστρώματος στο περιβάλλον, όμως προς το παρόν είναι η μοναδική.

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το σύστημα δεν περιελάμβανε κάτι καινούριο ή κάποια πολύ δύσκολη σύνδεση μεταξύ των συστημάτων που αποτελούσαν το συνολικό παθητικό σύστημα. Επομένως υπήρχε η απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα.

Τέλος, αναφέρεται ότι σε ότι αφορά την παροχή του επεξεργαζόμενου υλικού η μέση παροχή στον RAPS 1 ήταν 33L/min, στον RAPS 2 ήταν 100L/min και στον αερόβιο υγρότοπο ήταν 124L/min.

## 2) Οικονομικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Το όλο σύστημα χρησιμοποιεί μόνο φυσικές πηγές ενέργειας και επομένως δεν επιβαρύνει το περιβάλλον

## 2) Περιβαλλοντικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Δεν είναι ασφαλής σε ότι αφορά το Mn και τα  $SO_4^{2-}$  οι συγκεντρώσεις των οποίων βρίσκονται εκτός ορίων ασφαλούς απόρριψης αποβλήτων.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Μίγμα που αποτελούνταν από πολύ καλά αναμειγμένο ασβεστολιθικό χαλίκι, κόπρανα αγελάδων και συσσωματώματα άχυρου. Όλα αυτά είναι φιλικά προς το περιβάλλον.

**Κριτήριο 3.5 (Απαιτήσεις γης):** Τουλάχιστον 3625 m<sup>2</sup>. Αυτό είναι το άθροισμα των επιφανειών των δύο συστημάτων RAPS και του αερόβιου υγρότοπου.

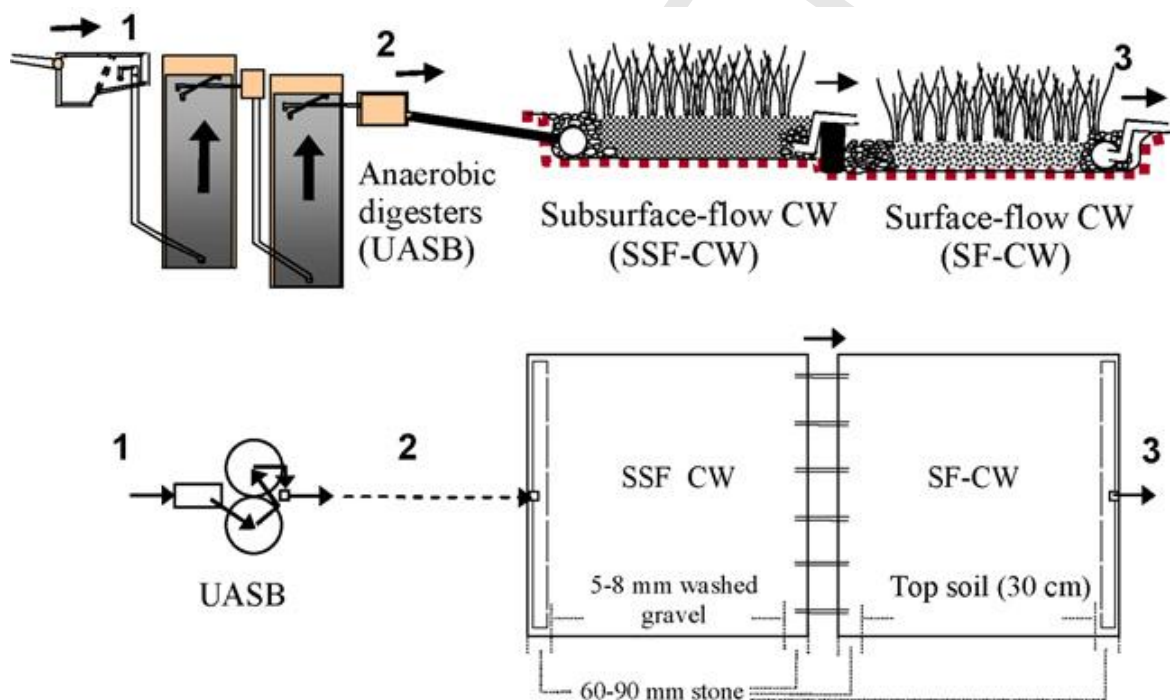
## Case study 2

### ANAEROBIC WETLAND in Galicia, Northwest Spain<sup>[18]</sup>

**Τόπος:** Το παθητικό σύστημα εγκαταστάθηκε σε ένα μικρό χωριό που βρίσκεται κοντά στην πόλη Galicia στην νοτιοδυτική Ισπανία με σκοπό να επεξεργάζεται τα απόβλητα των κατοίκων του (περίπου 20 άτομα).

**Χρόνος παρακολούθησης του συστήματος:** Σεπτέμβριος 2003-Αύγουστος 2005

**Περιγραφή του συστήματος:** Πρόκειται για ένα παθητικό σύστημα (βλ. σχήμα 22) που αποτελείται από δύο αναερόβιους αντιδραστήρες οι οποίοι συνδέονται με δύο υγρότοπους. Ο πρώτος υγρότοπος είναι υπόγειος και ο δεύτερος είναι επιφανειακός. Κάθε ένα από τα τέσσερα συστήματα συνδέεται με το άλλο σειριακά.



Σχήμα 21<sup>[18]</sup>: Σχηματικό διάγραμμα του παθητικού συστήματος. Το κάτω σχέδιο είναι η κάτοψη. Οι αριθμοί δείχνουν τα σημεία δειγματοληψίας.

Οι αναερόβιοι αντιδραστήρες χρησιμεύουν στην προεπεξεργασία των αποβλήτων και είναι εγκατεστημένοι υπόγεια σε τέτοιο βάθος ώστε να μην χρειάζονται αντλίες για την μεταφορά των αποβλήτων. Ο κάθε αντιδραστήρας έχει συνολικό ύψος 4 m καταλαμβάνει όγκο 3,6 m<sup>3</sup>. Κάθε υγρότοπος έχει διαστάσεις 6m x 6m (μήκος x πλάτος) και το νερό ρέει σε βάθος 0,5 m. Στον πυθμένα του πρώτου είναι τοποθετημένα χαλίκια σε στρώμα πάχους 0,6 mm και επίσης υπάρχουν 6 σωλήνες για να μεταφέρουν το

επεξεργασμένο υλικό στον επιφανειακό υγρότοπο που έχει όγκο  $6,5 \text{ m}^3$ . Στον πυθμένα του έχει τοποθετηθεί στρώμα φυτικής γης πάχους  $0,3 \text{ m}$  εκτός από τις ζώνες εισόδου και εξόδου όπου σε μήκος  $0,5 \text{ m}$  έχει τοποθετηθεί στρώμα πέτρας πάχους  $60-90 \text{ mm}$ . Για να επιτυγχάνεται φυσική ροή των αποβλήτων, οι υγρότοποι είχαν κατασκευαστεί σε περιοχή με φυσική κλίση  $10\%$  ενώ οι πυθμένες τους είχαν κατασκευαστεί με κλίση  $1-2\%$ . Τέλος, στην επιφάνεια και των δύο υγρότοπων είχαν φυτευτεί φυτά που υπήρχαν στην περιοχή. Η προεπεξεργασία των αποβλήτων που γίνεται στους αναερόβιους αντιδραστήρες έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της απαιτούμενης επιφάνειας των υγροτόπων κατά  $30\%$ .

Επισημαίνεται ότι η θερμοκρασία της περιοχής κυμαίνεται από  $5^{\circ}\text{C}$  έως  $21^{\circ}\text{C}$ . Τον χειμώνα η θερμοκρασία είναι περίπου  $7-9^{\circ}\text{C}$  ενώ τα καλοκαίρια επικρατεί θερμοκρασία  $15-18^{\circ}\text{C}$ .

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Η μέθοδος είναι σχετικά αξιόπιστη καθώς τα αποτελέσματα είναι μεν παρόμοια με τα θεωρητικά αναμενόμενα αλλά μεταβάλλονται με βάση διάφορους εξωγενείς παράγοντες (π.χ. βροχόπτωση, εποχή του έτους).

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Η αποδοτικότητα του συστήματος είναι υψηλή αφού επιτυγχάνεται απομάκρυνση τόσο των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) όσο και του συνολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (TCOD) καθώς και του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου ( $\text{BOD}_5$ ) σε ποσοστά που κυμαίνονται μεταξύ  $92$  και  $94\%$ , ενώ ο P απομακρύνεται κατά  $38\%$  και το  $\text{N}_2$  κατά  $52\%$ .

Στους αναερόβιους αντιδραστήρες υπάρχει περιορισμένη απομάκρυνση οργανικών ρυπαντών (ιδιαίτερα τους κρύους μήνες), όμως το ποσοστό απομάκρυνσης των TSS είναι υψηλό. Συγκεκριμένα, τα ποσοστά απομάκρυνσης είναι  $80-90\%$  για το TSS (και παραμένουν σταθερά για κάθε χρόνο λειτουργίας των αντιδραστήρων),  $65\%$  για το TCOD και  $40-50\%$  για το  $\text{BOD}_5$  (για το TCOD και το  $\text{BOD}_5$  η αποδοτικότητα των αντιδραστήρων είναι μειωμένη κατά τη διάρκεια του δεύτερου χρόνου λειτουργίας τους). Επίσης η προεπεξεργασία που γίνεται σε αυτούς έχει σαν αποτέλεσμα ότι η επιφάνεια που απαιτείται να έχουν οι αερόβιοι υγρότοποι που τους ακολουθούν είναι κατά  $30\%$  λιγότερη και συγχρόνως αποφεύγεται το φράξιμο των πόρων στους υγρότοπους. Όλα αυτά έχουν σαν αποτέλεσμα οι υγρότοποι να έχουν υψηλή απόδοση η οποία όμως είναι σαφώς μειωμένη τον δεύτερο χρόνο λειτουργίας του συστήματος.

Γενικά αυτό το παθητικό σύστημα είναι πολύ αποδοτικό, απαιτεί λίγη ενέργεια και έχει ελάχιστη παραγωγή ιλύος κάτι που αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα.

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Όλοι όσοι υπάρχουν σε οικιακά απόβλητα (εξετάζονται μέσω μετρήσεων σε TSS, TCOD, BOD<sub>5</sub>, P, N<sub>2</sub>)

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε δεν παρουσίαζε κάποια καινοτομία όμως ο υπολογισμός του μεγέθους των συστημάτων και η μεταξύ τους σύνδεση περιελάμβανε κάποιες τεχνικές ιδιαιτερότητες. Επομένως υπήρχε αρκετή τεχνολογική ωριμότητα όμως η εφαρμογή των λεπτομερειών ήταν αυτή που έκανε την διαφορά.

Σημειώνεται ότι η μέση ετήσια παροχή του υλικού ήταν 0,036 l/min.

## **2) Οικονομικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Το σύστημα έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνεται ροή του υλικού από τον ένα αντιδραστήρα στον άλλο αξιοποιώντας μόνο την βαρύτητα. Έτσι δεν χρησιμοποιούνται αντλίες. Επίσης χρησιμοποιείται βιοχημική ενέργεια που είναι και αυτή φυσική. Επομένως η μέθοδος είναι φιλική προς το περιβάλλον από ενεργειακή άποψη.

## **3) Περιβαλλοντικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Μπορούν να διατεθούν με ασφάλεια τα απόβλητα αφού το σύστημα είναι πολύ αποδοτικό.

**Κριτήριο 3.2 (Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου):** Αν και δεν υπάρχουν συγκεκριμένες αναφορές, πιθανότατα το σύστημα αυτό δεν επηρεάζει αρνητικά το φυσικό τοπίο αφού η ποσότητα της παραγόμενης ιλύος είναι ελάχιστη.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται είναι φυσικά υλικά (π.χ. φυτική γη, χαλίκια, φυτά της περιοχής).

**Κριτήριο 3.5 (Απαιτήσεις γης):** Δεν αναφέρεται η συνολική επιφάνεια που καταλαμβάνει το σύστημα. Αναφέρεται μόνο ότι η έκταση κάθε υγρότοπου είναι 36m<sup>2</sup> και ότι η έκταση αυτή είναι κατά 30% λιγότερη από αυτήν που θα απαιτούνταν αν δεν υπήρχαν οι δύο αναερόβιοι αντιδραστήρες.

Τέλος αναφέρεται μόνο ο όγκος κάθε αναερόβιου αντιδραστήρα που είναι 3,6m<sup>3</sup>.

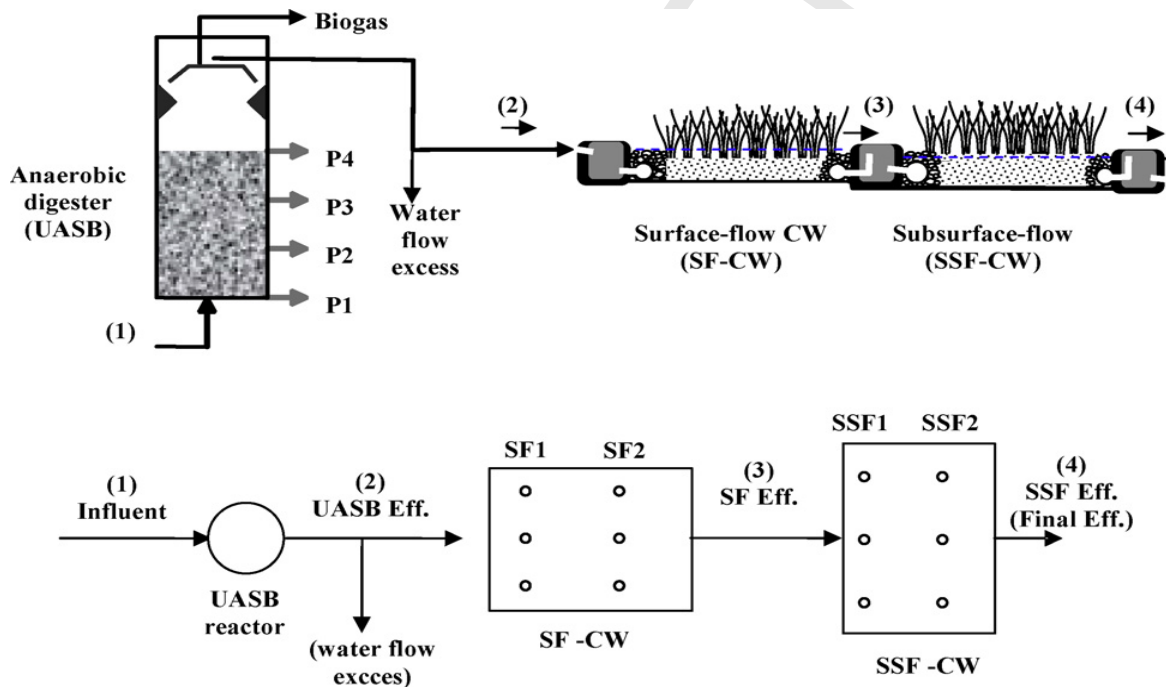
### Case study 3

#### ANAEROBIC WETLAND in Siantiago de Compostela, NW SPAIN<sup>[19]</sup>

**Τόπος:** Το σύστημα αυτό εγκαταστάθηκε στην περιοχή Siantiago de Compostela, στην νοτιοδυτική Ισπανία.

**Χρόνος παρακολούθησης του συστήματος:** 2005-2008

**Περιγραφή του συστήματος και βασικές αρχές λειτουργίας:** Το σύστημα που τοποθετήθηκε (βλ. σχήμα 23) ήταν ένα παθητικό σύστημα που αποτελούνταν από ένα αναερόβιο αντιδραστήρα χώνευσης ο οποίος ακολουθούνταν από ένα υγρότοπο επιφανειακής ροής και αυτός με τη σειρά του συνδέονταν με ένα δεύτερο υγρότοπο οριζόντιας υπόγειας ροής.



Σχήμα 22<sup>[19]</sup>: Σχηματικό διάγραμμα του παθητικού συστήματος (κάτω παρουσιάζεται η πλάγια όψη). Τα σημεία P1 έως P4 είναι τα σημεία δειγματοληψίας στον αντιδραστήρα ενώ με  $\circ$  παριστάνονται τα σημεία λήψης δειγμάτων στους δύο υγρότοπους.

Ο πρώτος λόγος που επιλέχθηκε η χρήση ενός επιφανειακού (και όχι ενός υπόγειου) υγρότοπου αμέσως μετά τον αντιδραστήρα ήταν ότι αυτός έχει μεγαλύτερη δυνατότητα αερισμού. Ο άλλος λόγος που χρησιμοποιήθηκαν οι υγρότοποι με αυτή τη σειρά ήταν ότι ο επιφανειακός υγρότοπος παρουσιάζει μικρότερο κίνδυνο φραγής των πόρων του υποστρώματος του από τα καταβυθίσματα (σε σχέση με τον υπόγειο υγρότοπο) και

επομένως μπορεί να επεξεργαστεί καλύτερα υψηλότερες παροχές εισερχόμενων αποβλήτων.

Ο αντιδραστήρας κατελάμβανε όγκο  $25,5\text{m}^3$  και χρησιμοποιούνταν σαν πρώτο στάδιο επεξεργασίας των αποβλήτων της περιοχής με στόχο να αποφευχθεί το φαινόμενο της εναπόθεσης ενώσεων στους πόρους του υποστρώματος των υγροτόπων. Όμως επειδή η εξερχόμενη απορροή από τον αντιδραστήρα είχε πολύ υψηλή ροή, μόνο ένα μέρος της κατευθυνόταν στον επιφανειακό υγρότοπο.

Οι κύριες παράμετροι που ελέγχθηκαν από τον αντιδραστήρα αυτόν ήταν:

HRT: Χρόνος υδραυλικής ροής (ήταν η σημαντικότερη παράμετρος)

SRT: Χρόνος παραμονής στερεών

$X_R$ : Συγκέντρωση της βιομάζας εντός του βιοαντιδραστήρα

$F_{ESP}$ : Ροή της περίσσειας ιλύος

Στον αντιδραστήρα αυτόν, η παραγωγή της περίσσειας ιλύος σχετίζεται κυρίως με τις συγκεντρώσεις του COD και του VSS καθώς και με τους ρυθμούς εισροής αυτών των δύο παραμέτρων στον αντιδραστήρα.

Ο επιφανειακός υγρότοπος είχε διαστάσεις  $7,5\text{m} \times 10\text{m}$  (πλάτος x μήκος) και το νερό βρισκόταν σε βάθος  $0,5\text{m}$ . Το στρώμα του χαλικιού είχε πάχος  $0,3\text{m}$ , δηλ. ο υγρότοπος είχε σχεδιαστεί ώστε να λειτουργεί με μία ζώνη νερού  $0,2\text{m}$  παρόλο που το πάχος αυτού του στρώματος διέφερε ανάλογα με την εποχή και έπαιρνε τιμές από  $0,1\text{m}$  μέχρι  $0,2\text{m}$ .

Ο δεύτερος υγρότοπος είχε διαστάσεις  $10\text{m} \times 7,5\text{m}$  (πλάτος x μήκος) και το νερό και έρεε ενώ το πάχος του στρώματος του χαλικιού ήταν  $0,5\text{m}$ .

Οι κόκκοι του χαλικιού που τοποθετήθηκαν και στους δύο υγρότοπους είχαν μέγεθος  $6-8\text{mm}$  και τέλος, τα φυτά που τοποθετήθηκαν και στους δύο ήταν του είδους *Juncus effuses*.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### **1) Τεχνολογικά κριτήρια**

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Η μέθοδος είναι αρκετά αξιόπιστη αλλά πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη ότι τα αποτελέσματα έχουν σαφή εξάρτηση από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Το σύστημα είχε πολύ καλή απόδοση. Ο αναερόβιος αντιδραστήρας πέτυχε απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών (TSS) κατά  $72\%$ , του TCOD κατά  $49,4\%$  και του BOD<sub>5</sub> κατά  $44,4\%$ . Τα αντίστοιχα ποσοστά απομάκρυνσης

που παρατηρήθηκαν στους δύο υγρότοπους ήταν (TSS) κατά 82,7% , του TCOD κατά 70,9% και του BOD<sub>5</sub> κατά 76.6%. Ο ρυθμός συσσώρευσης των στερεών στους υγρότοπους ήταν υψηλός μετά από 1,5 χρόνια λειτουργίας τους και έπειτα άρχισε να μειώνεται ενώ η πυκνότητα της επιφάνειας των στερεών έφτασε στο μέγιστο μετά από 2,5 χρόνια λειτουργίας. Συγκεκριμένα, μετά από 2,8 χρόνια υπήρχαν 3 kg TSS/m<sup>2</sup>, κάτι που ήταν χαμηλότερο από το αναμενόμενο σύμφωνα με την βιβλιογραφία.

Μεγάλη συμβολή στην καλή απόδοση του συστήματος διαδραμάτισε το γεγονός ότι μετά τον αντιδραστήρα ακολουθούσε ένας επιφανειακός και όχι ένας υπόγειος υγρότοπος. Φαίνεται ότι η κατασκευή των υγροτόπων με αυτή τη σειρά βοήθησε ώστε να επεξεργαστούν απόβλητα με μεγάλη παροχή χωρίς όμως να δημιουργηθούν φαινόμενα δυσλειτουργίας λόγω φραγής του υποστρώματος στους υγρότοπους.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι επιτεύχθηκε υψηλός ρυθμός υδρόλυσης των αιωρούμενων στερεών τόσο στον αναερόβιο αντιδραστήρα όσο και στους υγρότοπους (η υδρόλυση των στερεών έφτασε το 85% σε όλο το σύστημα). Επίσης είναι πολύ σημαντικό και το γεγονός ότι το σύστημα εμφάνισε υψηλή απομάκρυνση των ρυπαντών παρότι ο ρυθμός με τον οποίο εισέρχονταν η παροχή ήταν μεγάλος (συγκεκριμένα απομακρύνθηκαν από όλο το σύστημα το 95,5% των TSS, το 85,3% του TCOD και το 87,1% του BOD<sub>5</sub>.)

Επομένως μπορούμε να πούμε ότι γενικά πρόκειται για ένα αποδοτικό σύστημα που δεν είναι πολύπλοκο και έχει εξίσου καλά αποτελέσματα σε θερμοκρασιακό εύρος 13-19<sup>0</sup>C. Ο αναερόβιος αντιδραστήρας απομακρύνει επιτυχώς ένα μεγάλο μέρος των οργανικών ρυπαντών και αυτή η προεπεξεργασία εξασφαλίζει την απρόσκοπτη λειτουργία του επιφανειακού υγρότοπου με τον οποίο είναι συνδεδεμένος.

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Γενικά όλοι οι ρυπαντές που υπάρχουν σε οικιακά απόβλητα (κυρίως με τη μορφή TSS, TCOD, BOD<sub>5</sub>.)

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Προτείνεται η λειτουργία του αναερόβιου αντιδραστήρα με ρυθμό εισερχόμενου φορτίου μικρότερο από 0,6 kg TCOD /m<sup>3</sup>/day ώστε η ποσότητα της περίσσειας ιλύος να είναι ελάχιστη (αμελητέα).

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί και άλλες φορές απλώς με διαφορετική σειρά σύνδεσης των υγροτόπων. Έτσι δεν αντιμετωπίστηκαν τεχνολογικές δυσκολίες.

Τέλος αναφέρεται ότι η επεξεργαζόμενη OAM είχε ελάχιστη παροχή 42,36 L/min και μέγιστη 77,78 L/min.



## 2) Οικονομικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Χρησιμοποιούνται μόνο φυσικές πηγές ενέργειας (βαρυτική και βιοχημική).

## 3) Περιβαλλοντικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Η μέθοδος είναι πολύ αποδοτική, οι ρυπαντές απομακρύνονται σε υψηλά ποσοστά και επομένως τα τελικά απόβλητα μπορούν να διατεθούν με ασφάλεια στο περιβάλλον.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Χρησιμοποιήθηκαν μόνο φυσικά υλικά (π.χ. χαλίκι, φυτά).

**Κριτήριο 3.5 (Απαιτήσεις γης):** Η έκταση που καταλαμβάνουν και οι δύο υγρότοποι είναι 150m<sup>2</sup> συνολικά. Δεν αναφέρεται όμως η έκταση που καταλαμβάνει ολόκληρο το παθητικό σύστημα.

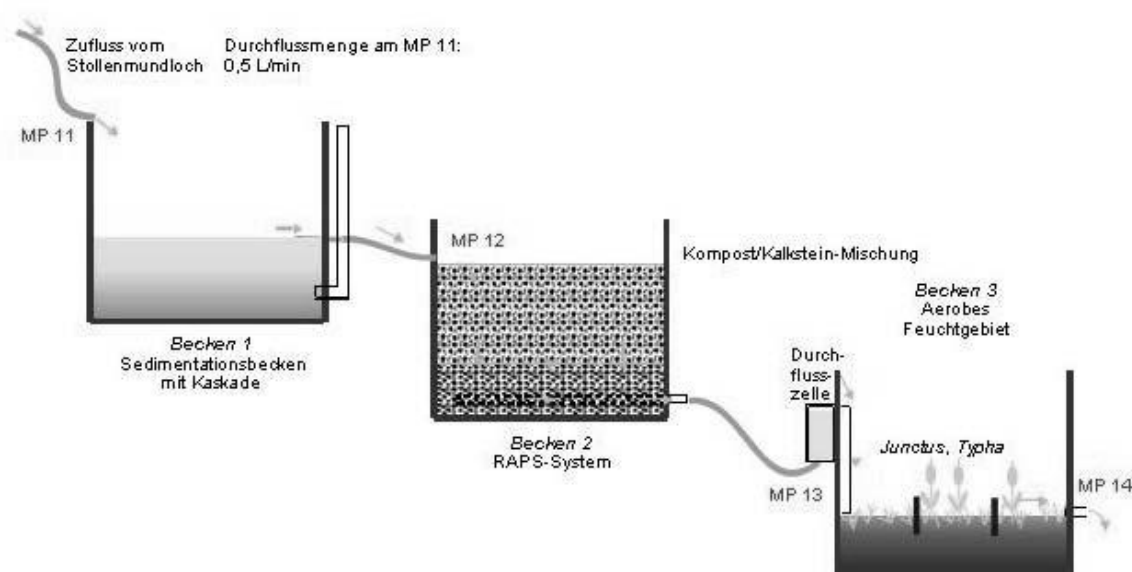
## Case study 4

### ANAEROBIC WETLAND in Hohe Warte, German<sup>[20]</sup>

**Τόπος:** Το παθητικό σύστημα εγκαταστάθηκε κοντά στο ορυχείο Hohe Warte που βρίσκεται 1,5km νοτιοδυτικά της πόλης Gernrode στην Γερμανία.

**Χρόνος παρακολούθησης του συστήματος:** Φεβρουάριος 2003-Οκτώβριος 2003

**Περιγραφή του συστήματος:** Το σύστημα (βλ. σχήμα 23) εγκαταστάθηκε για να επεξεργάζεται τα νερά που προέρχονταν από το μεταλλείο Hohe Warte. Τα νερά αυτά χαρακτηρίζονταν από pH κοντά στο 5,5 και από υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων και σουλφιδίων καθώς και Fe, Mn, As.



Σχήμα 23<sup>[20]</sup>: Σχηματικό διάγραμμα παθητικού συστήματος στο ορυχείο Hohe Warte.

Τα νερά του μεταλλείου (βλ εικόνα 6) πήγαιναν σε ένα κανάλι μήκους 15m και από εκεί σε ένα φυσικό κανάλι ύψους 6m και έκτασης 110m<sup>2</sup>, μέσω ενός σωλήνα μήκους 30m. Το κανάλι αυτό λειτουργούσε σαν μία δεξαμενή καταβύθισης.



Εικόνα 6<sup>[20]</sup>: Έξοδος των νερών από το μεταλλείο Hohe Warte.

Το παθητικό σύστημα αποτελούνταν (βλ. σχήμα 23) από μία δεξαμενή καθίζησης όπου τα νερά παρέμεναν για περίπου 14 ώρες. Έπειτα κατευθύνονταν σε μία δεξαμενή RAPS και από εκεί μεταφέρονταν σε έναν αερόβιο υγρότοπο. Κάθε υποσύστημα είχε τις εξής διαστάσεις: 1,12m μήκος, 0,96m πλάτος και 0,95m ύψος. Κύριος στόχος του ήταν να απομακρύνει τον Fe και το Mn από το νερό του μεταλλείου.

Η δεξαμενή καταβύθισης (settlement pont), κατάφερε να αυξήσει την συγκέντρωση του διαλελυμένου οξυγόνου επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο αρχικά τον σχηματισμό και έπειτα την καταβύθιση οξειδίων του σιδήρου. Η παροχή των εισερχόμενων νερών ήταν 0,5L/sec και ο χρόνος παραμονής τους στην δεξαμενή ήταν 14 ώρες.

Το σύστημα αναγωγής και ταυτόχρονης παραγωγής αλκαλικότητας (Reducing and Alkalinity Producing System, RAPS) περιείχε στον πυθμένα του ένα στρώμα πάχους 30cm που αποτελούνταν από ασβεστόλιθο σε μέγεθος χαλικιού. Πάνω από αυτό το στρώμα υπήρχε ένα μίγμα από ασβεστόλιθο και απορρίματα αλόγων το οποίο σκεπάζονταν από μία ζώνη που αποτελούνταν μόνο από απορρίματα αλόγων. Η λειτουργία αυτού του υποσυστήματος στηρίζεται στο διαλυτοποίηση του ασβεστολίθου σε τέτοιες συνθήκες οπότε επειδή το CO<sub>2</sub> που δημιουργείται δεν μπορεί να διαφύγει, παραμένει εγκλωβισμένο προσδίδοντας την απαραίτητη αλκαλικότητα. Τα απορρίματα των αλόγων δημιουργούν το κατάλληλο αναγωγικό περιβάλλον και έτσι ο δισθενής σίδηρος μετατρέπεται σε τρισθενή. Το υποσύστημα αυτό αποσκοπεί στο να αυξήσει το pH του νερού και να δημιουργήσει καθαρά αλκαλικά νερά.

Τέλος, ο πυθμένας του αερόβιου υγρότοπου καλύφθηκε με ένα στρώμα πάχους 10-30cm το οποίο αποτελούνταν από χώμα. Η επιφάνειά του είχε καλυφθεί από τα φυτά *Typha* και *Juncus*. Ο χρόνος παραμονής των νερών στον υγρότοπο ήταν μόλις 9 λεπτά λόγω της μικρής του επιφάνειας ( $1\text{m}^2$ ). Η λειτουργία του αποσκοπούσε στην οξείδωση των μετάλλων που είχε ως συνέπεια την υδρόλυσή τους και επομένως την καταβύθισή τους με τη μορφή υδροξειδίων.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Το χρονικό διάστημα εφαρμογής του συστήματος ήταν μικρό και επομένως δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα ως προς την αξιοπιστία της μεθόδου.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Το εξάμηνο εφαρμογής του συστήματος δεν επαρκεί για ασφαλή συμπεράσματα. Με τα δεδομένα που υπάρχουν φαίνεται ότι το σύστημα εμφάνισε καλή απόδοση. Μείωσε σημαντικά τον συνολικό Fe, τα νιτρικά άλατα και την οξύτητα, ενώ αύξησε το pH (από το 5,5 στο 7) και την αλκαλικότητα.

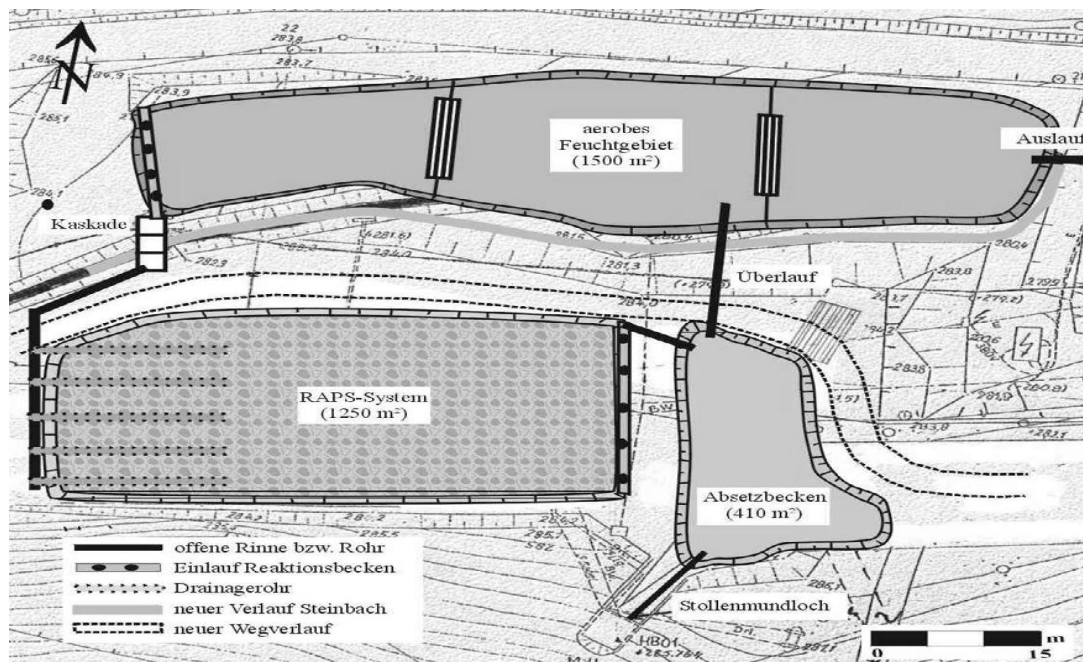
**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Οι κυριότεροι ρυπαντές που εξετάστηκαν ήταν Fe, Mn, Si,  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Αναφέρεται επίσης ότι η μέση παροχή των νερών στο σύστημα ήταν αρχικά 10L/min. Όμως αυτό οδηγούσε σε πολύ μικρούς χρόνους παραμονής και έτσι μειώθηκε σταδιακά φθάνοντας στο 0,5L/min όπου και παρέμεινε.

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Την περίοδο που εφαρμόστηκε το σύστημα (2003), τα συστήματα RAPS είχαν πρωτοεμφανιστεί. Σήμερα, είναι ευρέως διαδεδομένα και επομένως το παθητικό σύστημα που παρουσιάστηκε, θεωρείται ότι δεν παρουσιάζει πλέον κάποια καινοτομία και επομένως έχει την απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα.

### 2) Οικονομικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Χρησιμοποιούνται μόνο φυσικές πηγές ενέργειας (βαρυτική χημική και βιοχημική).



Σχήμα 24<sup>[20]</sup>: Σχηματική αναπαράσταση του προτεινόμενου παθητικού συστήματος για την κατεργασία των νερών από το μεταλλείο Hohe Warte.

### 3) Περιβαλλοντικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Η σύσταση των εξερχομένων νερών είχε βελτιωθεί σημαντικά όμως δεν αναφέρεται εάν τα επεξεργασμένα νερά πληρούν τις προϋποθέσεις ασφαλούς απόρριψης στο περιβάλλον.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Χρησιμοποιήθηκαν μόνο φυσικά υλικά (π.χ. ασβεστόλιθος, απορρίμματα αλόγων, φυτά).

**Κριτήριο 3.5 (Απαιτήσεις γης):** Αν και δεν γίνεται αναφορά στην συνολική έκταση του συστήματος που παρουσιάστηκε, οι ερευνητές υπολόγισαν την έκταση που πρέπει να έχει κάθε υποσύστημα για να επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα (βλ. σχήμα 24). Έτσι υπολογίστηκε ότι η δεξαμενή καταβύθισης πρέπει να έχει έκταση  $1500\text{m}^2$ , το σύστημα RAPS πρέπει να καταλαμβάνει έκταση  $1250\text{m}^2$  και η επιφάνεια του αερόβιου υγρότοπου υπολογίστηκε σε  $410\text{m}^2$ . Αν αθροιστούν οι εκτάσεις των τριών υποσυστημάτων προκύπτει ότι το σύστημα πρέπει να καταλαμβάνει συνολική επιφάνεια  $3160\text{m}^2$ .

Στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 12, Πίνακας 13, Πίνακας 14) παρουσιάζονται συνοπτικά τα case studies που αναλύθηκαν παραπάνω και συγκρίνονται μεταξύ τους ως προς κάθε κατηγορία κριτηρίων (τεχνολογικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά).

**Πίνακας 12:** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΝΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ

ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΥ ΥΓΡΟΤΟΠΟΥ								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη παρακολούθησης	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
ANAEROBIC WETLAND IN Durham, UK <sup>[17]</sup>	2003-2009	Αρκετά αξιόπιστη. Παρά τις εποχιακές μεταβολές φυσικοχημικών παραμέτρων το σύστημα έχει σταθερή συμπεριφορά κατά τα 5 χρόνια λειτουργίας του.	Σημαντική μείωση συγκέντρωσης ρυπαντών σε σχέση με τα εισερχόμενα απόβλητα. Ωστόσο Mn και SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> παραμένουν εκτός ορίων διάθεσης. Συνεχίζουν (μετά από 5 χρόνια) να αυξάνονται το pH και η αλκαλικότητα.	Μέση στον RAPS 1: 33L/min Μέση στον RAPS 2: 100L/min Μέση στον αερόβιο υγρότοπο: 124L/min  Μεγάλες μεταβολές της ροής ανάλογα με την εποχή	Δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία	Fe, Al, Zn, Mn, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Περιορισμένες. Μοναδική και ακριβή λύση η αλλαγή του ασβεστολιθικού υποστρώματος όταν πια δεν ρυθμίζει ικανοποιητικά το pH.	Υπήρχε η απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα. Τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ήδη ευρέως διαδεδομένα.

**Πίνακας 12 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΝΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ

ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΥ ΥΓΡΟΤΟΠΟΥ								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη παρακολούθησης	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
ANAEROBIC WETLAND in Galicia, Northwest Spain <sup>[18]</sup>	2003-2005	Σχετικά αξιόπιστη Τα αποτελέσματα είναι μεν παρόμοια με τα θεωρητικά αναμενόμενα αλλά εξαρτώνται από διάφορους εξωγενείς παράγοντες (π.χ. βροχόπτωση, εποχή του έτους).	Πολύ αποδοτικό. Συνολική απομάκρυνση TSS, TCOD, BOD <sub>5</sub> κατά 92-94%. Απομάκρυνση P, N <sub>2</sub> 38-52%. Ελάχιστη παραγωγή ιλύος.	Μέση παροχή ετησίως: 0,036 l/min.	Δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία	Όλοι όσοι υπάρχουν σε οικιακά απόβλητα (TSS, TCOD, BOD <sub>5</sub> , P, N <sub>2</sub> )	Δεν υπάρχουν σχετικές αναφορές.	Η μέθοδος είναι αρκετά ώριμη ωστόσο έχει ιδιαιτερότητες σε λεπτομέρειες σχετικές με τον υπολογισμό του μεγέθους των αντιδραστήρων και με τους τρόπους που αυτοί συνδέονται μεταξύ τους.

**Πίνακας 12 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΝΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ

ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΥ ΥΓΡΟΤΟΠΟΥ								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη παρακολούθησης	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
ANAEROBIC WETLAND in Santiago de Compostela, NW SPAIN <sup>[19]</sup>	2005-2008	Αρκετά αξιόπιστη αλλά πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη ότι τα αποτελέσματα έχουν σαφή εξάρτηση από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες.	Πολύ καλή απόδοση. Επεξεργάστηκαν απόβλητα με υψηλούς ρυθμούς παροχής. Απομακρύνθηκαν από όλο το σύστημα το 95,5% των TSS, το 85,3% του TCOD και το 87,1% του BOD <sub>5</sub> . Μικρή παραγωγή περίσσειας ιλύος, απρόσκοπτη λειτουργία των υγρότοπων	Ελάχιστη παροχή: 42,36 L/min Μέγιστη παροχή: 77,78 L/min	Δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία	Όλοι οι ρυπαντές που υπάρχουν σε οικιακά απόβλητα (κυρίως με τη μορφή TSS, TCOD, BOD <sub>5</sub> .)	Προτείνεται η λειτουργία του αναερόβιου αντιδραστήρα με ρυθμό εισερχόμενου φορτίου < από 0,6 kg TCOD /m <sup>3</sup> /day ώστε η ποσότητα της περίσσειας ιλύος να είναι ελάχιστη.	Υπάρχει τεχνολογική ωριμότητα αφού τα υποσυστήματα που χρησιμοποιούνται είναι ευρέως διαδεδομένα.

**Πίνακας 12 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΝΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ

ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΥ ΥΓΡΟΤΟΠΟΥ								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη παρακολούθησης	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
ANAEROBIC WETLAND in Hohe Warte, German <sup>[20]</sup>	Φεβρουάριος 2003- Οκτώβριος 2003	Μικρό χρονικό διάστημα εφαρμογής του συστήματος. Επομένως δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα ως προς την αξιοπιστία της μεθόδου.	Το εξάμηνο εφαρμογής του συστήματος δεν επαρκεί για ασφαλή συμπεράσματα. Με τα δεδομένα που διατίθενται, επιτεύχθηκε καλή απόδοση. Μειώθηκαν σημαντικά ο συνολικός Fe, τα νιτρικά άλατα και η οξύτητα, ενώ αυξήθηκε το pH (από το 5,5 στο 7) και η αλκαλικότητα.	Η μέση παροχή των νερών στο σύστημα ήταν 0,5L/min όπου και παρέμεινε.	Αν και δεν υπάρχουν σχετικές αναφορές, η εφαρμογή του συστήματος για ένα εξάμηνο μόνο δεν επαρκεί για ασφαλή συμπεράσματα.	Εξετάστηκαν κυρίως Fe, Mn, Si, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> .	Δεν γίνεται καμία σχετική αναφορά.	Το 2003, τα συστήματα RAPS είχαν πρωτοεμφανιστεί. Σήμερα, είναι ευρέως διαδεδομένα και επομένως το παθητικό σύστημα που παρουσιάστηκε έχει την απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα.



**Πίνακας 13:** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα οικονομικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΝΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΥ ΥΓΡΟΤΟΠΟΥ</b>						
<b>ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Κόστος Επένδυσης</b>	<b>Κόστος Λειτουργίας &amp; Συντήρησης</b>	<b>Κόστος συλλογής &amp; αποθήκευσης τελικού προϊόντος</b>	<b>Κόστος επεξεργασίας τελικού προϊόντος</b>	<b>Κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>
ANAEROBIC WETLAND in Durham, UK <sup>[17]</sup>	2003-2009	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία
ANAEROBIC WETLAND in Galicia, Northwest Spain <sup>[18]</sup>	2003-2005	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία
ANAEROBIC WETLAND in Siantiago de Compostela, NW SPAIN <sup>[19]</sup>	2005-2008	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία
ANAEROBIC WETLAND in Hohe Warte, German <sup>[20]</sup>	Φεβρουάριος 2003-Οκτώβριος 2003	Είναι χαμηλό αλλά δεν αναφέρονται συγκεκριμένα οικονομικά στοιχεία.	Είναι χαμηλό αλλά δεν αναφέρονται συγκεκριμένα οικονομικά στοιχεία.	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία

**Πίνακας 14:** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΝΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΥ ΥΓΡΟΤΟΠΟΥ</b>						
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Διάθεση αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
ANAEROBIC WETLAND in Durham, UK <sup>[17]</sup>	2003-2009	Δεν είναι ασφαλής σε ότι αφορά το Mn και τα SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (εκτός ορίων)	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Μίγμα από ασβεστολιθικό χαλίκι, κόπρανα αγελάδων και συσσωματώματα άχυρου. Όλα είναι φιλικά προς το περιβάλλον.	Χρησιμοποιεί μόνο φυσικές πηγές ενέργειας και επομένως δεν επιβαρύνει το περιβάλλον.	Απαιτεί μεγάλες εκτάσεις. Τουλάχιστον 3625 m <sup>2</sup> . (RAPS 1+RAPS 2 + αερόβιος υγρότοπος).
ANAEROBIC WETLAND in Galicia, Northwest Spain <sup>[18]</sup>	2003-2005	Μπορούν να διατεθούν με ασφάλεια τα απόβλητα αφού το σύστημα απομακρύνει σε μεγάλο βαθμό τους ρυπαντές.	Δεν υπάρχουν συγκεκριμένες αναφορές. Το σύστημα όμως δεν επηρεάζει αρνητικά το φυσικό τοπίο αφού η ποσότητα της παραγόμενης ιλύος είναι ελάχιστη.	Χρησιμοποιούνται μόνο φυσικά υλικά (π.χ. φυτική γη, χαλίκια, φυτά της περιοχής).	Χρησιμοποιούνται μόνο φυσικές πηγές ενέργειας (βαρυτική, βιοχημική).	Δεν αναφέρεται η συνολική έκταση του συστήματος. Αναφέρονται μόνο: Επιφάνεια των δύο υγροτόπων: 72m <sup>2</sup> . Όγκος κάθε αναερόβιου αντιδραστήρα: 3,6m <sup>3</sup> .

**Πίνακας 14 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΝΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΥ ΥΓΡΟΤΟΠΟΥ</b>						
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Διάθεση αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
ANAEROBIC WETLAND in Siantiago de Compostela, NW SPAIN <sup>[19]</sup>	2005-2008	Οι ρυπαντές απομακρύνονται σε υψηλά ποσοστά και επομένως τα τελικά απόβλητα μπορούν να διατεθούν με ασφάλεια στο περιβάλλον.	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Χρησιμοποιήθηκαν μόνο φυσικά υλικά (π.χ. χαλίκι, φυτά).	Χρησιμοποιούνται μόνο φυσικές πηγές ενέργειας (βαρυτική και βιοχημική).	Η συνολική έκταση και των δύο υγροτόπων είναι 150m <sup>2</sup> . Δεν αναφέρεται όμως η έκταση που καταλαμβάνει ολόκληρο το παθητικό σύστημα.
ANAEROBIC WETLAND in Hohe Warte, German <sup>[20]</sup>	Φεβρουάριος 2003- Οκτώβριος 2003	Δεν αναφέρεται εάν τα επεξεργασμένα νερά πληρούν τις προϋποθέσεις ασφαλούς απόρριψης στο περιβάλλον	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Χρησιμοποιήθηκαν μόνο φυσικά υλικά (π.χ. ασβεστόλιθος, απορρίμματα αλόγων, φυτά).	Χρησιμοποιούνται μόνο φυσικές πηγές ενέργειας (βαρυτική χημική και βιοχημική).	Δεν γίνεται αναφορά στην συνολική έκταση του συστήματος. Υπολογίστηκαν τα εξής: Η δεξαμενή καταβύθισης πρέπει να έχει έκταση 1500m <sup>2</sup> , το σύστημα RAPS πρέπει να καταλαμβάνει 1250 m <sup>2</sup> και ο αερόβιος υγρότοπος 410 m <sup>2</sup> . Αν αθροιστούν αυτές οι εκτάσεις προκύπτει ότι το σύστημα πρέπει να καταλαμβάνει 3160 m <sup>2</sup> .

## 5.4 ΑΕΡΟΒΙΟΙ ΥΓΡΟΤΟΠΟΙ (AEROBIC WETLANDS)

### Case study 1

#### AEROBIC WETLAND in Bitterfed/Wolfen, Germany<sup>[21]</sup>

**Τόπος:** Το παθητικό σύστημα εγκαταστάθηκε στην περιοχή Bitterfed, στην πόλη Wolfen της Γερμανίας

**Χρόνος εγκατάστασης:** Μάρτιος 2003

**Χρόνος παρακολούθησης του συστήματος:** Μάιος 2006-Οκτώβριος 2009

#### Περιγραφή του συστήματος και βασικές αρχές λειτουργίας του:

Το σύστημα αυτό εγκαταστάθηκε προκειμένου να επεξεργαστούν οικιακά απόβλητα που χαρακτηρίζονταν από μεγάλες συγκεντρώσεις θειικών και οι οργανικοί ρυπαντές ανήκαν κυρίως στις κατηγορίες PCE (υπερ-χλωρο-αιθυλένιο) και MCB(μονο-χλωρο βενζίνη).

Ο στόχος ήταν να εξεταστεί η επίδραση της βλάστησης στην αποτελεσματική επεξεργασία αυτών των αποβλήτων. Για τον λόγο αυτό κατασκευάστηκαν δύο διαφορετικοί υγρότοποι οριζόντιας υπόγειας ροής, ένας με βλάστηση (φυτεύτηκαν καλάμια) και ο άλλος χωρίς ώστε να συγκρίνονται τα αποτελέσματά τους. Οι διαστάσεις των υγροτόπων ήταν 6m μήκος και 1m πλάτος. Το πληρωτικό υλικό ήταν μίγμα από χαλίκι (25-47%), άμμο (50-67%) και ιλύς/πηλός (2-8%). Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος αποφασίστηκε (το 2008) να προστεθεί αμμωνία (περίπου 30g/L) ώστε να αναπτυχθούν καλύτερα τα φυτά και η ποσότητα αυτή έφτασε τα 50g/L το 2009.

Οι διεργασίες που διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο στην απομάκρυνση (με τη χρήση υγροτόπων) των χλωριωμένων υδρογονανθράκων που περιέχονται στα οικιακά απόβλητα προέρχονται από τη δράση των βακτηρίων (αποχλωρίωση, οξειδωση, μεταβολισμός, αποδόμηση των φυτών). Η παρουσία των φυτών βοηθάει αφού απελευθερώνεται από τις ρίζες τους οξυγόνο και άνθρακας και έτσι υποστηρίζεται ο πολλαπλασιασμός και η δράση τόσο αερόβιων όσο και αναερόβιων μικροοργανισμών. Με αυτόν τον μηχανισμό (δηλ. της χρήσης του οξυγόνου που απελευθερώνεται από τις ρίζες των φυτών) επιτυγχάνεται η σημαντική απομάκρυνση των MCB ρυπαντών.

Πιο συγκεκριμένα, η απομάκρυνση των ρυπαντών των κατηγοριών PCE και MCB λαμβάνει χώρα μέσω βιοαποικοδόμησης (η κάθε κατηγορία βέβαια επεξεργάζεται από διαφορετικό γένος βακτηρίων). Έτσι, το PCE μετατρέπεται υπό αναερόβιες συνθήκες σε TCE, αυτό με τη σειρά του γίνεται πρώτα διχλωροαιθάνιο (υπό την μορφή διαφόρων ενώσεων π.χ. cis-1,2-DCE, trans-1,2-DCE) και έπειτα αιθένιο υπό αναερόβιες συνθήκες.

Σε ότι αφορά την απομάκρυνση των θειϊκών ρυπαντών, αποδεικνύεται από την εφαρμογή αυτής της μεθόδου ότι η παρουσία φυτών οδηγεί σε πολύ μεγάλη απομάκρυνση τους υπό τη μορφή θειούχων ενώσεων.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Η μέθοδος είναι αρκετά αξιόπιστη καθώς δεν υπάρχουν αναφορές που να οδηγούν σε αντίθετα συμπεράσματα.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Η φύτευση του υγρότοπου είχε μεγάλη επίδραση στην απομάκρυνση των ρυπαντών τύπου MCB (χλωροβενζίνη) ενώ επηρέασε ελάχιστα την απομάκρυνση ρυπαντών τύπου PCE (υπερχλωροαιθυλένιο) γιατί αυτοί απαιτούσαν ένα προηγούμενο στάδιο αναερόβιας επεξεργασίας ώστε να δράσουν τα κατάλληλα βακτήρια και να καταβυθιστούν. Επίσης στην περίπτωση που τα κατεργαζόμενα απόβλητα έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε θειϊκά και σχετικά χαμηλή συγκέντρωση οργανικών ρυπαντών, η ύπαρξη βλάστησης στον υγρότοπο οδήγησε σε εμπλουτισμό του θείου εξαιτίας της αναγωγής των θειϊκών αλάτων που συνέβαινε λόγω της δράσης των βακτηρίων που αναπτύσσονταν και τα οποία χρησιμοποιούσαν κυρίως τον οργανικό άνθρακα που προέρχονταν από την βλάστηση. Όμως η διαδικασία αυτή επέφερε μια μικρή μείωση στην απομάκρυνση των MCB ρυπαντών

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Η μέθοδος εφαρμόστηκε κυρίως για την αντιμετώπιση των οργανικών ρυπαντών που υπάρχουν σε οικιακά απόβλητα με κύριο ρυπαντή τον MCB (χλωροβενζίνη)

Άλλοι ρυπαντές που εξετάστηκαν είναι:

PCE, TCE, cis-1,2-DCE, trans-1,2-DCE, VC, Ethene, MCB, 1,2-Dichlorobenzene, 1,4-Dichlorobenzene, 2-Chlorotoluene, Benzene,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Cl<sup>-</sup>.

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Πρέπει να προσεχθεί η χρήση της μεθόδου όταν επεξεργάζεται απόβλητα με υψηλές συγκεντρώσεις θειϊκών γιατί τότε είναι κάπως μειωμένη η απομάκρυνση των οργανικών ρυπαντών τύπου MCB. Ωστόσο δεν αναφέρονται συγκεκριμένες προτάσεις βελτίωσης.

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε ήταν ευρέως διαδεδομένη, δεν υπήρχε κάποια καινοτομία και επομένως η μέθοδος είχε την απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα.

Σημειώνεται ακόμα ότι η μέση παροχή αποβλήτων ήταν περίπου 0,078L/min.

## 2) Περιβαλλοντικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Οι κυριότεροι οργανικοί ρυπαντές (τύπου MCB) απομακρύνονται επιτυχώς και επομένως τα απόβλητα είναι σχετικά ασφαλή για την απόθεσή τους στο περιβάλλον. Ωστόσο εφιστάται η προσοχή γιατί τα περιβαλλοντικά όρια δεν καλύπτονται για ορισμένους δευτερευούσης σημασίας οργανικούς ρυπαντές.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Το πληρωτικό υλικό των υγρότοπων ήταν μίγμα από χαλίκι (25-47%), άμμο (50-67%) και ιλύς/πηλός (2-8%) και τα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν καλάμια. Όλα είναι φυσικά υλικά.

## Case study 2

### **AEROBIC WETLAND in Safira, Germany<sup>[22]</sup>**

**Τόπος:** Το σύστημα εγκαταστάθηκε στην περιοχή Safira που βρίσκεται στην πόλη Bitterfeld στην Γερμανία.

**Χρόνος παρακολούθησης του συστήματος:** 2005-2011

#### **Περιγραφή του συστήματος και βασικές αρχές λειτουργίας του:**

Ο υγρότοπος εγκαταστάθηκε προκειμένου να επεξεργαστεί οικιακά απόβλητα που περιείχαν υψηλές συγκεντρώσεις θειϊκών και φωσφορικών αλάτων καθώς και πολύ ασβέστιο ενώ από τους οργανικούς ρυπαντές ο κυριότερος ανήκε στην κατηγορία MCB(μονο-χλωρο βενζίνη).

Ο στόχος ήταν να εξεταστεί η επίδραση της βλάστησης στην αποτελεσματική επεξεργασία αυτών των αποβλήτων. Για τον λόγο αυτό κατασκευάστηκαν δύο διαφορετικοί υγρότοποι οριζόντιας υπόγειας ροής, ένας με βλάστηση (φυτεύτηκαν καλάμια) και ο άλλος χωρίς ώστε να συγκρίνονται τα αποτελέσματά τους. Κάθε υγρότοπος χωριζόταν σε δύο λεκάνες που η κάθε μία είχε διαστάσεις 6m μήκος και 1m πλάτος. Το πληρωτικό υλικό πάχους 0,5m ήταν μίγμα από αμμώδη μαρμαρυγία (περίπου 25%), και χαλίκι (περίπου 67%).

Τα απόβλητα που βρίσκονταν σε βάθος 22m οδηγούνταν μέσω μιας αντλίας στους υγροτόπους με ρυθμό 0,078-0,083 L/min. Η στάθμη των αποβλήτων παρέμενε (με τη χρήση μιας βαλβίδας) περίπου 0,1 m κάτω από την επιφάνεια των υγροτόπων και ο μέσος χρόνος παραμονής των αποβλήτων για επεξεργασία ήταν σχεδόν 6 ημέρες.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

## 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Η μέθοδος είναι αρκετά αξιόπιστη ωστόσο χρειάζεται να δοθεί η δέουσα σημασία στο γεγονός ότι τα αποτελέσματα είχαν άμεση εξάρτηση από τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Η ύπαρξη βλάστησης στον υγρότοπο οδήγησε σε μείωση της συγκέντρωσης των θειικών και του  $Fe^{2+}$  ενώ η συγκέντρωση των θειούχων βαθμιαία αυξήθηκε. Επίσης παρατηρήθηκε αυξημένη οξείδωση του αμμωνίου ( $NH_4^+$ ). Όμως το σύστημα δεν είχε καλή απόδοση ως προς τα φωσφορικά αφού η ικανότητά του να τα απομακρύνει μειώθηκε κατά τη διάρκεια παρακολούθησης του συστήματος από το 91% μόλις στο 10%. Είναι πολύ ενθαρρυντικό ότι τα φυτά επέδειξαν μεγάλη αντοχή στην τοξική επίδραση των θειικών κάτι που πιθανόν να οφείλεται στο οξυγόνο που απελευθερωνόταν από τις ρίζες τους. Κατά το τελευταίο έτος παρακολούθησης του συστήματος υπήρξε μειωμένη απομάκρυνση του αμμωνίου (από το 75% στο 42%) γεγονός που συνδέεται άμεσα με την αυξημένη συγκέντρωση των θειούχων ενώσεων.

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Εξετάστηκαν κυρίως οι ανόργανοι ρυπαντές που υπάρχουν στα οικιακά απόβλητα και κυρίως οι εξής:  $SO_4^{2-}$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $S^{2-}$ ,  $NH_4^+$

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Για να βελτιωθεί η μέθοδος πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη σε επόμενες εφαρμογές ότι η χρήση ενός υποστρώματος πλούσιου σε σίδηρο είχε στα πρώτα χρόνια εφαρμογής της μεθόδου το θετικό αποτέλεσμα της μειωμένης τοξικότητας των θειικών αλάτων αλλά ταυτόχρονα προκάλεσε και την ακινητοποίηση των φωσφορικών. Δεν προτείνεται όμως κάποια συγκεκριμένη λύση αυτού του προβλήματος.

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε ήταν ευρέως διαδεδομένη, δεν υπήρχε κάποια καινοτομία και επομένως η μέθοδος είχε την απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα.

Αναφέρεται επίσης ότι η μέση παροχή αποβλήτων ήταν 0,078-0,083 L/min.

## 2) Οικονομικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Το σύστημα χρησιμοποιούσε κυρίως βιοχημική ενέργεια ενώ το μόνο είδος ενέργειας που δεν προέρχονταν από φυσική πηγή ήταν η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιούσαν οι περισταλτικές αντλίες για να μεταφέρουν τα απόβλητα από το βάθος των 22 μέτρων που βρίσκονταν προς το ύψος του πληρωτικού υλικού των υγροτόπων για να υπάρχει οριζόντια ροή.

## **2) Περιβαλλοντικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Ο υγρότοπος που είχε τα φυτά λειτούργησε σαφώς καλύτερα από αυτόν που δεν είχε βλάστηση αφού κατάφερε να απομακρύνει σε σημαντικό ποσοστό (μεταξύ 31-55%) κύριους ανόργανους ρυπαντές όπως τα θειικά. Όμως δεν γίνεται σαφής αναφορά εάν η σύσταση των εξερχόμενων αποβλήτων ικανοποιεί τα περιβαλλοντικά κριτήρια ασφαλούς διάθεσης.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Το πληρωτικό υλικό στους υγροτόπους ήταν μίγμα από αμμώδη μαρμαρυγία (περίπου 25%), και χαλίκι (περίπου 67%) ενώ για τη φύτευση χρησιμοποιήθηκαν καλάμια. Επομένως οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν δεν επιβάρυναν το περιβάλλον.

## **Case study 3**

### **AEROBIC WETLAND in Amfilochia, Western Greece<sup>[23]</sup>**

**Τόπος:** Το παθητικό αυτό σύστημα κατασκευάστηκε για να επεξεργαστεί τα απόβλητα ενός ελαιοτριβείου (που είχαν ήδη υποστεί ένα στάδιο προεπεξεργασίας σε κάποιο μικρό διωλιστήριο) που βρίσκεται στην πόλη της Αμφιλοχίας, στην Δυτική Ελλάδα.

**Χρόνος παρακολούθησης του συστήματος:** Οκτώβριος 2009-Μάϊος 2010.

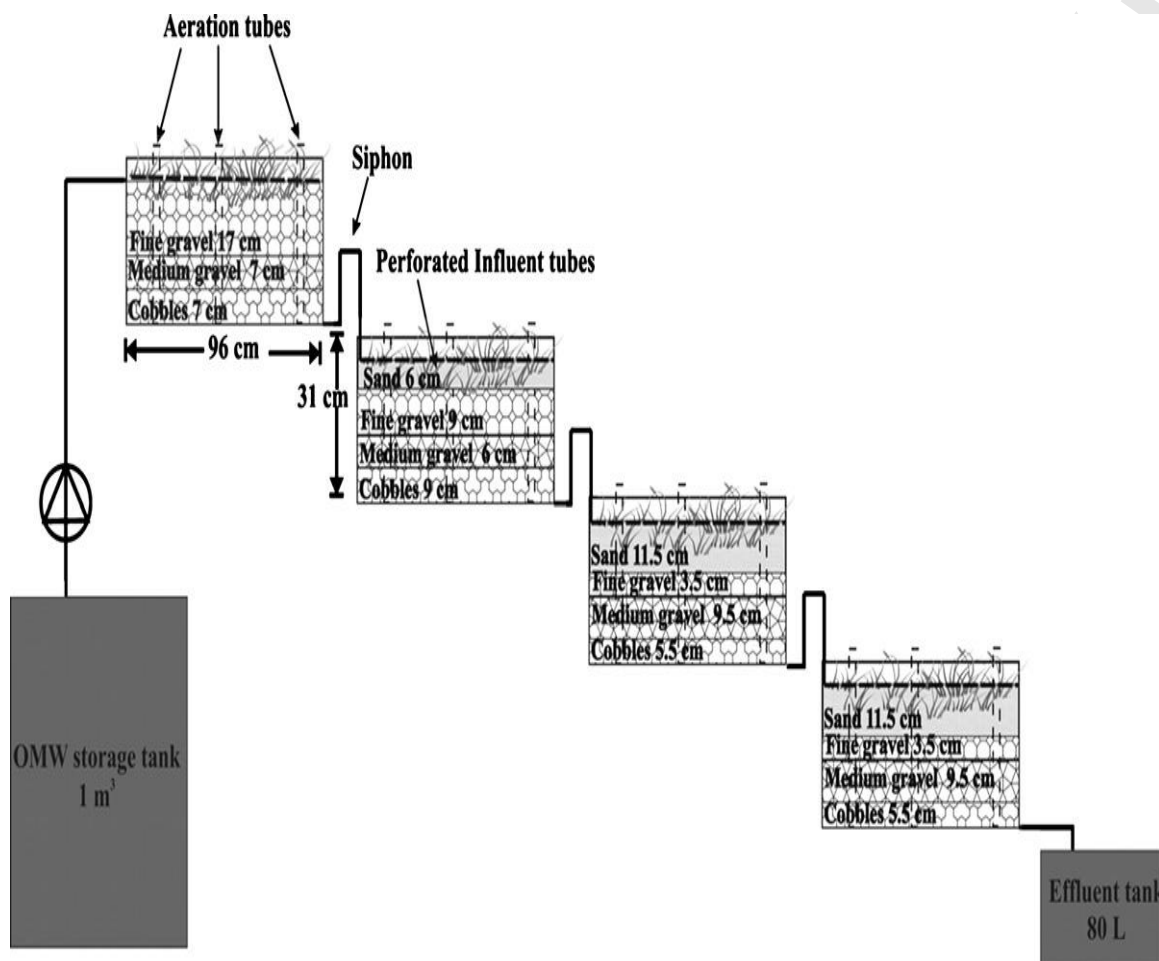
#### **Περιγραφή του συστήματος και βασικές αρχές λειτουργίας του:**

Το σχεδιάγραμμα του όλου παθητικού συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 25. Ήταν η πρώτη φορά στην Ελλάδα που επεξεργάστηκαν απόβλητα ελαιοτριβείου που είχαν τόσο μεγάλες συγκεντρώσεις ρυπαντών με ένα σύστημα που αποτελούνταν από υγρότοπους μόνο κάθετης ροής και κανέναν οριζόντιο. Το σύστημα λοιπόν αποτελούνταν από 3 μονάδες που κάθε μία είχε 4 υγρότοπους κάθετης ροής (συνολικά εγκαταστάθηκαν 12 υγρότοποι). Στις δύο μονάδες (δηλ. στους 8 υγρότοπους) είχαν φυτευτεί καλάμια και στην τρίτη μονάδα δεν είχε φυτευτεί τίποτα (μονάδα αναφοράς).

Κάθε υγρότοπος είχε διαστάσεις 0,96m x 0,385m x 0,31m (μήκος x πλάτος x βάθος). Κάθε τετράδα υγρότοπων ήταν τοποθετημένη σε διαφορετικό ύψος έτσι ώστε τα απόβλητα που έβγαιναν από τον τελευταίο υγρότοπο κάθε μονάδας να πηγαίνουν μέσω ενός σιφωνιού στον πρώτο υγρότοπο της επόμενης μονάδας. Σε κάθε υγρότοπο είχαν τοποθετηθεί 6 κάθετοι πλαστικοί σωλήνες ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής αερισμός του υποστρώματος. Επίσης υπήρχαν και άλλοι σωλήνες που είχαν τοποθετηθεί κατά μήκος και κατά πλάτος κάθε υγροτόπου ώστε τα εισερχόμενα απόβλητα να κατανέμονται



ομοίωμορφα στην επιφάνεια του. Κάθε τετράδα υγροτόπων αποτελούνταν από τρεις διαφορετικούς τύπους υγρότοπου.



Σχήμα 25<sup>[23]</sup>: Σχεδιάγραμμα του παθητικού συστήματος στην Αμφιλοχία.

Ο πρώτος τύπος είχε σε βάθος 7cm μία ζώνη αποστράγγισης που αποτελούνταν από λίθους ονομαστικής διαμέτρου 50mm. Πάνω από αυτήν υπήρχε μία άλλη ζώνη πάχους 7cm από χαλίκι ονομαστικής διαμέτρου 24,4mm και από πάνω της ήταν μία άλλη ζώνη πάχους 17cm από λεπτό χαλίκι ονομαστικής διαμέτρου 6mm.

Ο δεύτερος τύπος είχε σε βάθος 9cm μία ζώνη αποστράγγισης που αποτελούνταν από λίθους ονομαστικής διαμέτρου 50mm. Πάνω από αυτήν υπήρχε μία άλλη ζώνη πάχους 6cm από χαλίκι ονομαστικής διαμέτρου 24,4mm και από πάνω της ήταν μία άλλη ζώνη πάχους 9cm από λεπτό χαλίκι ονομαστικής διαμέτρου 6mm που καλύπτονταν από άμμο με διάμετρο 0,5 mm σε πάχος 6 cm.

Ο τρίτος τύπος είχε σε βάθος 5,5cm μία ζώνη αποστράγγισης που αποτελούνταν από λίθους ονομαστικής διαμέτρου 50mm. Πάνω από αυτήν υπήρχε μία άλλη ζώνη πάχους 9,5cm από χαλίκι ονομαστικής διαμέτρου 24,4mm και από πάνω της ήταν μία άλλη ζώνη

πάχους 3,5cm από λεπτό χαλίκι ονομαστικής διαμέτρου 6mm που καλύπτονταν από άμμο με διάμετρο 0,5 mm σε πάχος 11,5 cm.

Έτσι, η διαστρωμάτωση σε κάθε τύπο υγροτόπου ήταν τέτοια ώστε τα υλικά μεγαλύτερου πορώδους να είναι χαμηλά και να συγκρατούν τα αιωρούμενα στερεά ενώ οι άλλες ζώνες είχαν υλικό με πιο μικρότερο μέγεθος για να αυξάνουν το χρόνο παραμονής των αποβλήτων μέσα στον υγρότοπο.

Σε ότι αφορά την απομάκρυνση των κύριων ρυπαντών, όσο αυξάνεται το φορτίο τόσο αυξάνεται και η συγκέντρωση του COD στην τελική απορροή. Αυτό συμβαίνει γιατί τα βακτήρια δεν μπορούν να αποδομήσουν οργανικό φορτίο που βρίσκεται σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις και ταυτόχρονα οι ρίζες των φυτών δεν μπορούν να παρέχουν την ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για να αποικοδομηθεί όλο το οργανικό φορτίο.

Σχετικά με τις φαινόλες, το ποσοστό απομάκρυνσής τους διαφέρει σημαντικά μόνο μεταξύ των υγροτόπων που φέρουν βλάστηση και αυτών που δεν έχουν φυτά. Αυτό δείχνει ότι οι μικροοργανισμοί που είναι υπεύθυνοι για την απομάκρυνσή τους, είναι αερόβιοι αφού εκεί που υπάρχει βλάστηση υπάρχουν και υψηλότερες συγκεντρώσεις οξυγόνου.

Για την αμμωνία, παρατηρείται ότι η συγκέντρωσή της είναι αυξημένη στην πρώτη από τις τέσσερις ομάδες υγροτόπων. Κατά την επεξεργασία στην πρώτη ομάδα υγροτόπων όπου απομακρύνεται ένα πολύ μεγάλο ποσοστό από το COD και τις φαινόλες, σχεδόν όλο το οργανικής προέλευσης άζωτο μετατρέπεται σε αμμωνία. Έπειτα, ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης της αμμωνίας είναι η αζωτοποίησή της κάτι που λαμβάνει χώρα στα επόμενα τρία στάδια της επεξεργασίας καθώς αυτό απαιτεί μεγαλύτερους χρόνους παραμονής. Οι κύριοι μηχανισμοί απομάκρυνσης του αζώτου είναι ο μεταβολισμός των βακτηρίων και η οξειδωση.

Τέλος σχετικά με τον φώσφορο, ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσής του είναι η προσρόφησή του στους πόρους του υποστρώματος και αυτός πραγματοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό στην πρώτη μονάδα των υγροτόπων.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### **1) Τεχνολογικά κριτήρια**

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Δεν μπορούν να υπάρξουν σαφή συμπεράσματα για την αξιοπιστία της μεθόδου λόγω του μικρού χρονικού διαστήματος εφαρμογής της. Με τα μέχρι στιγμής δεδομένα φαίνεται ότι η μέθοδος ήταν σχετικά αξιόπιστη αφού τα

αποτελέσματά της παρουσίαζαν σαφή εξάρτηση από τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Το σύστημα πέτυχε καλά αποτελέσματα παρόλο που το πορώδες των χρησιμοποιούμενων υποστρωμάτων ήταν μικρότερο από αυτό που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

Έτσι λοιπόν, παρόλο που οι συγκεντρώσεις των ρυπαντών ήταν υψηλές, επιτεύχθηκε απομάκρυνσή τους κατά 70% για το COD, 70% για τις φαινόλες, 75% για το TKN και 87% για τα ορθο-φωσφορικά. Η απομάκρυνση του COD, του TKN και των φαινολών ήταν υψηλότερη στους υγροτόπους με βλάστηση ενώ η απομάκρυνση των ορθο-φωσφορικών δεν φαίνεται να είχε διαφορά ήταν περίπου η ίδια σε όλους τους υγροτόπους (με ή χωρίς βλάστηση).

Επίσης παρατηρήθηκε ότι η απόδοση στην κατακράτηση των ρυπαντών εμφάνιζε εξάρτηση από την θερμοκρασία (καλύτερη απόδοση σε υψηλότερη θερμοκρασία). Ένας άλλος παράγοντας που διαδραμάτιζε καθοριστικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος ήταν το επιφανειακό φορτίο, το οποίο σε αυτό το σύστημα ήταν αισθητά μεγαλύτερο (κατά δύο ή τρεις τάξεις μεγέθους) σε σχέση με τα φορτία που έχουν εφαρμοστεί σε άλλες παρόμοιες μελέτες.

Τελικά όμως, παρότι οι ρυπαντές απομακρύνθηκαν κατά μεγάλο ποσοστό, η σύσταση της τελικής απορροής δεν πληροί τα κριτήρια ασφαλούς περιβαλλοντικής διάθεσης.

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Οι κύριοι ρυπαντές που εξετάστηκαν ήταν οι εξής: COD, φαινόλες, ορθο-φωσφορικά,  $\text{NH}_3$ , TKN

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Προκειμένου να μειωθεί η περιεκτικότητα των ρυπαντών στην τελική απορροή προτείνεται η είσοδος των αποβλήτων στο σύστημα με μικρότερο επιφανειακό φορτίο. Ως εναλλακτική λύση προτείνεται η αντικατάσταση του τρίτου τύπου υγρότοπου με επιφανειακό υγρότοπο ή με ανακύκλωση της τελικής απορροής ώστε να αυξηθεί ο χρόνος παραμονής στο σύστημα.

Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι τα ελαιοτριβεία λειτουργούν ορισμένους μήνες του χρόνου και επομένως δεν παράγονται τέτοια απόβλητα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Προκειμένου λοιπόν να μην μένει αναξιοποίητο το σύστημα τους μήνες που δεν λειτουργούν τα ελαιοτριβεία, προτείνεται η χρήση του για την επεξεργασία άλλων αποβλήτων που έχουν υψηλές συγκεντρώσεις ρυπαντών.

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Τα επιμέρους υποσυστήματα που αποτελούσαν το συνολικό παθητικό σύστημα ήταν ευρέως διαδεδομένα, είχαν χρησιμοποιηθεί πολλές φορές και δεν παρουσιάζαν κάποια ιδιαιτερότητα. Όμως πρώτη φορά επεξεργάστηκαν

απόβλητα ελαιοτριβείου που χαρακτηρίζονταν από τόσο υψηλές συγκεντρώσεις ρυπαντών από ένα τέτοιο σύστημα. Επομένως η μέθοδος ήταν τεχνολογικά ώριμη (χρησιμοποιούσε πολύ απλά υποσυστήματα) αλλά μόνο ως ένα βαθμό (δεν ήταν γνωστή η συμπεριφορά των υποστρωμάτων σε τόσο υψηλά φορτία ρυπαντών).

## 2) Οικονομικά κριτήρια

**Κριτήριο 2.1 (Σταθερό Κόστος):** Αναφέρεται ότι είναι εξαιρετικά χαμηλό αλλά δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία.

**Κριτήριο 2.2 (Λειτουργικό κόστος):** Αναφέρεται ότι είναι εξαιρετικά χαμηλό αλλά δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία.

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Το σύστημα κατανάλωνε κυρίως βιοχημική ενέργεια ενώ το μόνο είδος ενέργειας που δεν προέρχονταν από φυσική πηγή ήταν η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιούσε η αντλία για να μεταφέρει τα απόβλητα από το σημείο προεπεξεργασίας στον πρώτο υγρότοπο.

## 3) Περιβαλλοντικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Παρότι οι ρυπαντές απομακρύνθηκαν κατά μεγάλο ποσοστό, η σύσταση της τελικής απορροής δεν πληροί τα κριτήρια ασφαλούς περιβαλλοντικής διάθεσης.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Το υπόστρωμα των υγροτόπων αποτελούνταν από μίγμα χαλικιού και άμμου. Για τη φύτευση χρησιμοποιήθηκαν καλάμια. Επομένως χρησιμοποιήθηκαν μόνο φυσικά υλικά.

**Κριτήριο 3.5 (Απαιτήσεις γης):** Αναφέρεται ο μαθηματικός τρόπος για να υπολογιστεί η απαιτούμενη επιφάνεια (δηλ. να διαιρεθεί το επιφανειακό φορτίο με την ικανότητα απομάκρυνσης των ρυπαντών). Όμως ενώ δίνεται η μέση ικανότητα απομάκρυνσης για κάθε ρυπαντή ( $4900\text{g/d}\cdot\text{m}^2$  για το COD,  $130\text{g/d}\cdot\text{m}^2$  για το TKN,  $15\text{g/d}\cdot\text{m}^2$  για το OP και  $750\text{g/d}\cdot\text{m}^2$  για τις φαινόλες), το επιφανειακό φορτίο αλλάζει ανάλογα με την εποχή και για αυτό δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί η επιφάνεια της γης που απαιτείται. Δυστυχώς δεν αναφέρονται ακριβή αριθμητικά στοιχεία για την επιφάνεια που κατέλαβε όλο το σύστημα.

## Case study 4

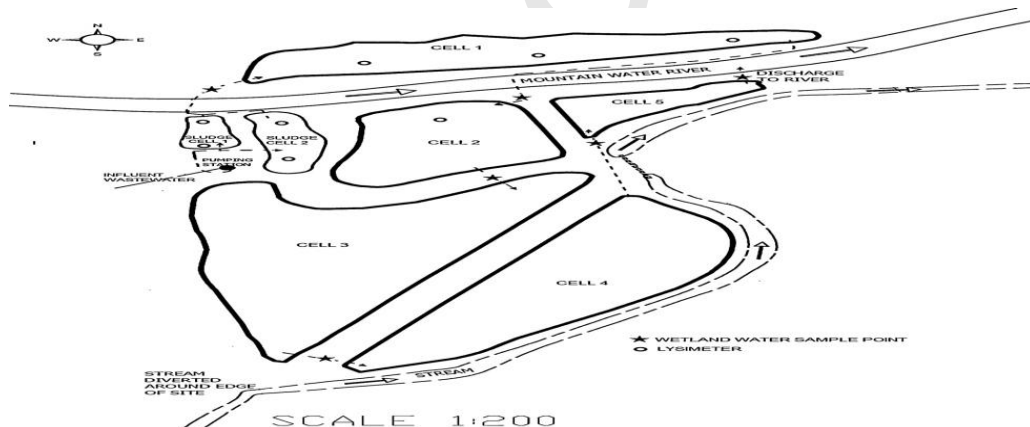
### AEROBIC WETLAND in Glaslough, Monaghan, Ireland<sup>[24]</sup>

**Τόπος:** Το παθητικό σύστημα έχει εγκατασταθεί στο χωριό Glaslough, στην περιοχή Monaghan που βρίσκεται στην Ιρλανδία

**Χρόνος παρακολούθησης του συστήματος:** Νοέμβριος 2009-Μάιος 2011 (18 μήνες)

#### Παρουσίαση του συστήματος και βασικές αρχές λειτουργίας του:

Το σύστημα εγκαταστάθηκε προκειμένου να επεξεργάζεται τα οικιακά απόβλητα της περιοχής. Αποτελείται από δύο δεξαμενές ιλύος (όπου πάνε στην αρχή τα απόβλητα) που λειτουργούν εναλλάξ ώστε η μία να μπορεί να αδειάζει χωρίς να διακόπτεται η λειτουργία του όλου συστήματος. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η συσσώρευση ιλύος στους υγρότοπους η οποία θα μείωνε την αποτελεσματικότητά τους. Από εκεί, τα απόβλητα κατευθύνονται (με την αξιοποίηση της βαρύτητας) σε 5 τεχνητούς υγρότοπους (βλ.σχήμα 26) και αφού υποστούν επεξεργασία και στον τελευταίο υγρότοπο, τότε διατίθενται στον ποταμό που διαρρέει το χωριό.



Σχήμα 26<sup>[24]</sup>: Σχηματικό διάγραμμα εγκατεστημένου παθητικού συστήματος στο χωριό Glaslough που βρίσκεται στην Ιρλανδία.

Το πληρωτικό υλικό των υγροτόπων ήταν υπέδαφος της περιοχής και είχε πάχος 0,5m ενώ τα είδη βλάστησης που χρησιμοποιήθηκαν για να φυτευτούν οι υγρότοποι ήταν διάφορα όπως *Carex riparia* Curtis, *Phragmites australis*, *Typha latifolia*., *Iris pseudacorus* L., και *Glyceria maxima*.

Το βάθος της δεξαμενής ιλύος ήταν 0,45m ενώ το βάθος των υγροτόπων 1 και 2 ήταν 0,42m και 0,38m αντίστοιχα.

Σκοπός της παρούσης έρευνας ήταν να υπολογιστεί ο ρυθμός διείσδυσης και το φορτίο των ρυπαντών που υπήρχαν στο υγρό που διηθούνταν στο υπόστρωμα των υγροτόπων και των δεξαμενών ιλύος. Οι ρυπαντές που εξετάστηκαν κυρίως ήταν οι COD, NH<sub>3</sub> και NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Για να εξεταστούν αυτές οι παράμετροι ελήφθησαν δείγματα από το υγρό που διηθούνταν στο υπόστρωμα των δεξαμενών ιλύος και των δύο πρώτων υγροτόπων.

Ο ρυθμός διείσδυσης υπολογίστηκε μέσω του τύπου  $v = Q/A$  όπου  $v$  είναι ο μέσος όρος ταχύτητας ροής (σε m/d),  $Q$  είναι ο ρυθμός ογκομετρικής ροής (σε m<sup>3</sup>/d) και  $A$  είναι η επιφάνεια του λυσιμέτρου που τοποθετείται κάθετα στο δείγμα (υπολογίστηκε σε 0,64 m<sup>2</sup>).

Ο ρυθμός με τον οποίο το φορτίο των ρυπαντών διηθείται στο υπόστρωμα υπολογίζεται μέσω του τύπου  $(Q_f \times C_f)/A_1$  όπου

$Q_f$  = ημερήσιος όγκος νερού που διηθείται από το υπόστρωμα του υγροτόπου (σε m<sup>3</sup>/d)

$C_f$  = συγκέντρωση του ρυπαντή στο υγρό διήθησης (σε g/m<sup>3</sup>)

$A_1$  = η επιφάνεια του λυσιμέτρου (σε m<sup>2</sup>).

Γενικά παρατηρήθηκε ότι ο ρυθμός διείσδυσης ήταν μεγαλύτερος στον πιο απομακρυσμένο υγρότοπο (νούμερο 2) και επίσης το φορτίο των ρυπαντών που υπήρχε στο υπόστρωμα των υγροτόπων ήταν περισσότερο όσο πιο απομακρυσμένος ήταν ο υγρότοπος από την πηγή των αποβλήτων παρότι αυτός δεχόταν και το καλύτερα επεξεργασμένο απόβλητο. Αυτό καταδεικνύει ότι κάθε υγρότοπος έχει την δυνατότητα να επιδρά με διαφορετικό τρόπο στο υποκείμενο υγρό.

Σε ότι αφορά την επίδραση των καιρικών συνθηκών, στους υγρότοπους 1 και 2 ο ρυθμός διείσδυσης βρέθηκε ελαφρά μεγαλύτερο το χειμώνα από τις άλλες εποχές ενώ το αντίθετο συνέβαινε στη δεξαμενή ιλύος.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### 3) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Τα παρατηρούμενα αποτελέσματα κατά την εφαρμογή της μεθόδου εξαρτώνται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες και συνεπώς η μέθοδος είναι σχετικά αξιόπιστη.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Οι μέσοι ρυθμοί διείσδυσης στις τρεις πρώτες δεξαμενές (ιλύος και δύο πρώτοι υγρότοποι) του συστήματος ήταν  $4,9 \cdot 10^{-9}$  m/s,  $3,7 \cdot 10^{-9}$  m/s και  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s. Η δεξαμενή ιλύος και ο πρώτος υγρότοπος, που ελάμβαναν τα

απόβλητα με το μεγαλύτερο οργανικό περιεχόμενο παρουσίασαν παρόμοιους ρυθμούς διείσδυσης οι οποίοι ήταν σαφώς χαμηλότεροι από τον αντίστοιχο ρυθμό στον δεύτερο κατά σειρά υγρότοπο. Αυτό συνέβηκε γιατί η οργανική ιλύς που βρίσκεται στον πυθμένα του υγρότοπου μειώνει την ροή διαμέσου των στρωμάτων του εδάφους. Η υδραυλική αγωγιμότητα που υπολογίστηκε για την δεξαμενή ιλύος και τους δύο πρώτους υγροτόπους ήταν  $3,8 \cdot 10^{-9}$  m/s,  $3,5 \cdot 10^{-9}$  m/s και  $9,8 \cdot 10^{-9}$  m/s αντίστοιχα.

Η ποσότητα των ρυπαντών που χάθηκε επειδή πέρασε στο υπόστρωμα μέσω της διείσδυσης ήταν πολύ μικρή (μόλις 0,5% για την δεξαμενή ιλύος και τον πρώτο υγρότοπο και 2% για τον τρίτο).

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Οι κύριοι ρυπαντές ως προς τους οποίους εξετάστηκε η ποιότητα των δειγμάτων ήταν οι εξής: COD, NH<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Προτείνεται να διερευνηθεί και η χρήση διαφορετικών φυσικών υλικών ως υποστρωμάτων και κυρίως να εξετασθεί αν και πότε θα φραγούν οι πόροι αυτών των υποστρωμάτων.

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Τα επιμέρους υποσυστήματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν απλά και είχαν εφαρμοστεί σε πολλές πιλοτικές δοκιμές. Συνεπώς υπήρχε η απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα.

Αναφέρεται επίσης ότι στη δεξαμενή ιλύος η μέγιστη ροή ήταν 646L/min και η μέση ροή ήταν 78,4L/min. Τα αντίστοιχα μεγέθη για τον υγρότοπο 1 έχουν ως εξής: Μέγιστη ροή: 425,8L/min και μέση ροή 67,3L/min, ενώ στον υγρότοπο 2 η μέγιστη ροή 292,4L/min ήταν και η μέση ροή ήταν 71,5L/min.

## 2) Οικονομικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Χρησιμοποιούνται μόνο η βαρυτική και η βιοχημική ενέργεια.

## 3) Περιβαλλοντικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Χρησιμοποιήθηκε υπέδαφος της περιοχής και διάφορα φυτά, όλα φυσικά υλικά.

**Κριτήριο 3.5 (Απαιτήσεις γης):** Δεν αναφέρεται η συνολική έκταση που καταλαμβάνει το παθητικό σύστημα. Αναφέρονται μόνο τα εξής στοιχεία:

Επιφάνεια δεξαμενής ιλύος: 285m<sup>2</sup>

Επιφάνεια υγρότοπου 1: 4664m<sup>2</sup>

Επιφάνεια υγρότοπου 2: 4500m<sup>2</sup>

### **Case study 5**

#### **AEROBIC WETLAND in Polk Country, Central Florida<sup>[25]</sup>**

**Τόπος:** Το παθητικό σύστημα εγκαταστάθηκε σε ένα εγκαταλελειμμένο ορυχείο φωσφορικών που βρίσκεται στην περιοχή Polk, στην πολιτεία Φλόριντα των ΗΠΑ.

**Χρόνος παρακολούθησης του συστήματος:** Απρίλιος 2006-Οκτώβριος 2007

**Περιγραφή του συστήματος και βασικά φαινόμενα που παρατηρήθηκαν:** Το σύστημα αυτό (βλ. σχήμα 27) αποτελούνταν από μία δεξαμενή ψύξης (Cooling Pond) από όπου τα απόβλητα μέσω μιας αντλίας κατευθύνονταν προς τον υγρότοπο έκτασης 12250m<sup>2</sup>. Έπειτα τα απόβλητα, πήγαιναν πάλι μέσω μιας αντλίας προς την αμμώδη επιφάνεια ενός φίλτρου λεκάνης το οποίο είχε έκταση 6000m<sup>2</sup>. Εκεί συλλεγόταν σε ένα δίκτυο σωλήνων που βρίσκονταν στον πυθμένα του φίλτρου και μετά έφευγαν από εκεί και πήγαιναν στον τελικό τους προορισμό.

Ο υγρότοπος κατασκευάστηκε σε σχήμα U και είχε διαστάσεις 1500m μήκος, 10m πλάτος και το βάθος του κυμαίνονταν από 0,5 έως 2m. Το υπόστρωμα του αποτελούνταν από ένα μίγμα πηλού με αποσυντεθιμένη οργανική ύλη. Τα φυτά που είχαν τοποθετηθεί ήταν άλλα φυσικά και άλλα ήταν τεχνητά π.χ. υπήρχαν φυτά που ανήκαν στα είδη *Pistia stratiotes*, *Salix caroliniana*, *Schinus terebinthifolius*, *Salvinia*, *Micranthemum umbrosum*, *Typha spp.*, *Salix spp.* και *Lemna minor*.

Οι διεργασίες που πραγματοποιούνταν σε αυτό τον υγρότοπο περιελάμβαναν συσσώρευση μετάλλων στην βλάστηση, απορρόφηση ανιόντων και κατιόντων στα σωματίδια του υποστρώματος καθώς και καταβύθιση ή συγκαταβύθιση που προκαλούνταν από την δράση των βακτηρίων.

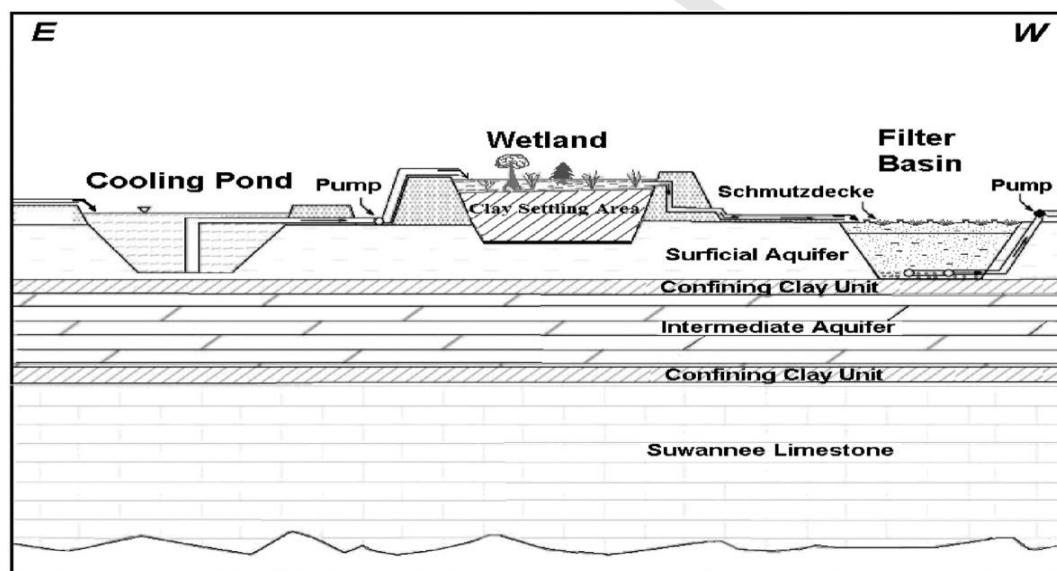
Η λεκάνη που λειτουργούσε σαν φίλτρο χρησιμοποιούνταν για να βελτιώσει την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία του συστήματος. Η κύρια χρησιμότητά της ήταν ότι αναπτυσσόταν στην επιφάνειά της ένα βιολογικά ενεργό στρώμα πάχους 0,5-2cm το οποίο αποτελούσε 1) ένα εξαιρετικό φίλτρο για τα στερεά σωματίδια και 2) μία ζώνη βιολογικά ενεργής περιοχής που βοηθά στην αποδόμηση των διαλελυμένων οργανικών



συστατικών και ταυτόχρονα οδηγεί στη μείωση των παθογενών μικροβίων συνεπώς ελαττώνει τις δυσάρεστες οσμές και τους ανεπιθύμητους χρωματισμούς.

Τονίζεται ότι τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων που έλαβαν χώρα έδειξαν γενικά διαφοροποίηση στη σύσταση των επεξεργασμένων αποβλήτων ανάλογα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες (θερμοκρασία, ύψος βροχόπτωσης). Έτσι η λειτουργία του συστήματος χωρίστηκε στις περιόδους υγρασίας (Απρίλιος 2007-Οκτώβριος 2007) και στις περιόδους ξηρασίας (Νοέμβριος 2006-Απρίλιος 2007).

Γενικά φάνηκε ότι κατά την περίοδο ξηρασίας οι συγκεντρώσεις των κατιόντων ήταν παρόμοιες τόσο στην δεξαμενή ψύξης όσο και στον υγρότοπο, ενώ οι συγκεντρώσεις των ανιόντων μειώνονταν στον υγρότοπο. Αντίθετα, κατά τις περιόδους των μεγάλων βροχοπτώσεων οι συγκεντρώσεις τόσο των ανιόντων όσο και των κατιόντων ήταν περίπου μιάμιση φορά μικρότερες από ότι στην δεξαμενή ψύξης.



Σχήμα 27<sup>[25]</sup>: Σχηματικό διάγραμμα του παθητικού συστήματος στην περιοχή Polk, στην πολιτεία Φλόριντα των ΗΠΑ.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Η μέθοδος ήταν αξιόπιστη σε σημαντικό βαθμό αφού παρότι παρατηρήθηκε σημαντική εξάρτηση της αποδοτικότητάς της από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες, αποδείχθηκε ότι η χημική και μικροβιολογική σύσταση των επεξεργασμένων αποβλήτων παρέμενε σχετικά σταθερή.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Το σύστημα είχε πάρα πολύ καλή απόδοση αφού κατόρθωσε να βελτιώσει κατά πολύ την σύσταση (χημική/βιοχημική) των αποβλήτων που επεξεργάστηκε και επίσης προσέδωσε στα επεξεργασμένα απόβλητα σχετικά σταθερή σύσταση παρά τις μεγάλες μεταβολές που παρατηρήθηκαν στην θερμοκρασία, την υγρασία και την βροχόπτωση. Συγκεκριμένα, η λειτουργία του υγρότοπου επέφερε σημαντική μείωση στα εξής: 1) στο pH (από το 9 στο 6,5-7), 2) στις συγκεντρώσεις των  $\text{SO}_4^{2-}$ , F, Cl,  $\text{NO}_3^-$ , Br, Na, K, Ca, Mg, 3) στη συγκέντρωση του As (κάτι που δεν είχε επιτευχθεί από πολλά άλλα παθητικά συστήματα, 4) στη συγκέντρωση των παθογόνων μικροοργανισμών.

Επίσης το σύστημα κατόρθωσε να αυξήσει σημαντικά τη συγκέντρωση του  $\text{H}_2\text{S}$  και εμφάνιζε συνεχώς αρνητικό δυναμικό οξειδοαναγωγής, γεγονός που επιβεβαίωσε την αναγωγική του δράση.

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Οι κυριότεροι ρυπαντές που μελετήθηκαν ήταν As,  $\text{SO}_4^{2-}$ , F, Cl,  $\text{NO}_3^-$ , Br, Na, K, Ca, Mg, Mn, Si,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  και Fe.

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Υπήρχε η αναγκαία τεχνολογική ωριμότητα εφόσον τα επιμέρους υποσυστήματα είχαν χρησιμοποιηθεί ήδη σε πολλές άλλες εφαρμογές.

## **2) Οικονομικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Χρησιμοποιήθηκαν χημική και βιοχημική ενέργεια, ενώ η μόνη ενέργεια που προέρχονταν από μη φυσική πηγή ήταν η ηλεκτρική που χρειάζονταν οι αντλίες για τη μεταφορά του αποβλήτου από την δεξαμενή ψύξης στον υγρότοπο και από εκεί στη λεκάνη που λειτουργούσε σαν φίλτρο. Όμως σίγουρα οι ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια δεν ήταν πολύ μεγάλες και επομένως η μέθοδος δεν επιβάρυνε από ενεργειακής πλευράς το περιβάλλον.

## **2) Περιβαλλοντικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οργανική ύλη και πηλός για το υπόστρωμα του υγρότοπου και φυτά για την επιφάνειά του. Επομένως η μέθοδος ήταν φιλική προς το περιβάλλον.

**Κριτήριο 3.5 (Απαιτήσεις γης):** Η έκταση του υγρότοπου (και όχι όλου του παθητικού συστήματος) ήταν περίπου  $12250\text{m}^2$ , ενώ η έκταση της λεκάνης που λειτουργούσε σαν φίλτρο ήταν  $6000\text{m}^2$ .

Στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 15, Πίνακας 16, Πίνακας 17) παρουσιάζονται συνοπτικά τα case studies που αναλύθηκαν παραπάνω και συγκρίνονται μεταξύ τους ως προς κάθε κατηγορία κριτηρίων (τεχνολογικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά).

**Πίνακας 15:** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΙΩΝ

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΕΡΟΒΙΟΥ ΥΓΡΟΤΟΠΙΟΥ</b>								
<b>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>								
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Αξιοπιστία μεθόδου</b>	<b>Αποδοτικότητα μεθόδου</b>	<b>Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ</b>	<b>Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου</b>	<b>Πλήθος ρυπαντών</b>	<b>Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου</b>	<b>Ωριμότητα τεχνολογίας</b>
AEROBIC WETLAND in Bitterfed/Wolfen, Germany <sup>[21]</sup>	Μάιος 2006-Οκτώβριος 2009	Είναι αρκετά αξιόπιστη	Αποδοτική μέθοδος για απόβλητα με υψηλές συγκεντρώσεις θειϊκών και χαμηλή συγκέντρωση οργανικών ρυπαντών. Η φύτευση του υγρότοπου βοήθησε στην αναγωγή των θειϊκών και είχε μεγάλη επίδραση στην απομάκρυνση των ρυπαντών τύπου MCB ενώ επηρέασε ελάχιστα τους ρυπαντές τύπου PCE.	Μέση παροχή αποβλήτων: 0,078L/min	Δεν υπάρχουν σχετικές αναφορές.	Η μέθοδος εφαρμόστηκε κυρίως για την αντιμετώπιση των οργανικών ρυπαντών που υπάρχουν σε οικιακά απόβλητα με κύριο ρυπαντή τον MCB (χλωροβενζίνη) και δευτερευόντως το PCE	Δεν αναφέρονται συγκεκριμένες προτάσεις αντιμετώπισης της μειωμένης απομάκρυνσης MCB όταν τα απόβλητα έχουν υψηλές συγκεντρώσεις θειϊκών.	Η μέθοδος είχε την απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα(Δεν υπήρχαν καινοτομίες, είχε χρησιμοποιηθεί ευρέως).

**Πίνακας 15 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ

ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΕΡΟΒΙΟΥ ΥΓΡΟΤΟΠΟΥ								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη παρακολούθησης	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
AEROBIC WETLAND in Safira, Germany <sup>[22]</sup>	2005-2011	Είναι αρκετά αξιόπιστη Προσοχή χρειάζεται γιατί τα αποτελέσματα είχαν άμεση εξάρτηση από τις μεταβολές της θερμοκρασίας.	Το σύστημα ήταν πολύ αποδοτικό ως προς την απομάκρυνση των θεϊκών, του Fe <sup>2+</sup> και του αμμωνίου. Με την πάροδο του χρόνου παρατηρήθηκε ακινητοποίηση των φωσφορικών. Τα φυτά ανέπτυξαν αντοχή ως προς την τοξική επίδραση των θεϊκών.	Μέση παροχή αποβλήτων: 0,078-0,083 L/min.	Δεν υπάρχουν σχετικές αναφορές	Κυρίως ανόργανοι ρυπαντές όπως: SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , Fe <sup>2+</sup> , S <sup>2-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Για να βελτιωθεί η μέθοδος πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη η ακινητοποίηση των φωσφορικών που παρατηρήθηκε τον πρώτο καιρό. Δεν προτείνεται όμως κάποια συγκεκριμένη λύση.	Η μέθοδος είχε την απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα (Δεν υπήρχαν καινοτομίες, η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία ήταν ευρέως διαδεμένη).

**Πίνακας 15 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ

ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΕΡΟΒΙΟΥ ΥΓΡΟΤΟΠΟΥ								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη παρακολούθησης	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
AEROBIC WETLAND in Amfilochia, Western Greece <sup>[23]</sup>	Οκτώβριος 2009-Μάϊος 2010.	Όχι σαφή συμπεράσματα λόγω του μικρού χρονικού διαστήματος εφαρμογής της. Με τα μέχρι στιγμής δεδομένα φαίνεται ότι η μέθοδος ήταν σχετικά αξιόπιστη αφού τα αποτελέσματά της	Το σύστημα πέτυχε καλά αποτελέσματα (70% για το COD, 70% για τις φαινόλες, 75% για το TKN και 87% για τα ορθο-φωσφορικά.), χωρίς όμως να πληροί τη τελική απορροή τα όρια ασφαλούς διάθεσης στο περιβάλλον.	Δεν υπάρχουν συγκεκριμένα αριθμητικά στοιχεία	Δεν υπάρχουν συγκεκριμένες αναφορές σίγουρα όμως οι 8 μήνες παρακολούθησης του συστήματος δεν επαρκούν για αξιόπιστα συμπεράσματα.	Οι κύριοι ρυπαντές που εξετάστηκαν ήταν οι εξής: COD, φαινόλες, ορθο-φωσφορικά, NH <sub>3</sub> , TKN	Προτείνεται 1) Είσοδος των αποβλήτων στο σύστημα με μικρότερο επιφανειακό φορτίο ή 2) Αντικατάσταση του τρίτου τύπου υγρότοπου με επιφανειακό υγρότοπο ή 3) Ανακύκλωση της τελικής	Πρώτη φορά επεξεργάστηκαν απόβλητα ελαιοτριβείου με τόσο υψηλές συγκεντρώσεις ρυπαντών από ένα τέτοιο σύστημα. Επομένως η μέθοδος ήταν τεχνολογικά ώριμη (χρησιμοποιούσε πολύ απλά υποσυστήματα) αλλά μόνο ως ένα βαθμό (δεν ήταν γνωστή η συμπεριφορά των υποστρωμάτων σε τόσο υψηλά φορτία ρυπαντών).

		<p>παρουσίαζαν σαφή εξάρτηση από τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες.</p>					<p>απορροής ώστε να αυξηθεί ο χρόνος παραμονής στο σύστημα.</p> <p>4) Προτείνεται η χρήση του συστήματος για την επεξεργασία άλλων αποβλήτων που έχουν υψηλές συγκεντρώσεις ρυπαντών (όταν δεν λειτουργούν τα ελαιοτριβεία).</p>	
--	--	--	--	--	--	--	--	--

**Πίνακας 15 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ

ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΕΡΟΒΙΟΥ ΥΓΡΟΤΟΠΟΥ								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη παρακολούθησης	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
AEROBIC WETLAND in Glaslough, Monaghan, Ireland <sup>[24]</sup>	Νοέμβριος 2009-Μάιος 2011 (18 μήνες)	Τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες και συνεπώς η μέθοδος είναι σχετικά αξιόπιστη.	Οι μέσοι ρυθμοί διείσδυσης στις τρεις πρώτες δεξαμενές (ιλύος και δύο πρώτοι υγρότοποι) ήταν πολύ μικροί. Η ποσότητα των ρυπαντών πέρασε στο υπόστρωμα μέσω της διείσδυσης ήταν πολύ μικρή (μόλις 0,5% για την δεξαμενή ιλύος και τον πρώτο υγρότοπο και 2% για τον τρίτο).	<p><u>Στην δεξαμενή ιλύος:</u> Μέγιστη ροή: 646L/min Μέση ροή: 78,4L/min</p> <p><u>Στον υγρότοπο 1</u> Μέγιστη ροή: 425,8L/min Μέση ροή: 67,3L/min</p> <p><u>Στον υγρότοπο 2</u> Μέγιστη ροή: 292,4L/min Μέση ροή: 71,5L/min</p>	Δεν υπάρχουν σχετικές αναφορές	Οι κύριοι ρυπαντές που εξετάστηκαν ήταν οι εξής: COD, NH <sub>3</sub> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Προτείνεται η διερεύνηση της χρήσης διαφορετικών φυσικών υλικών ως υποστρωμάτων και κυρίως να εξετασθεί αν και τότε θα φραγούν οι πόροι αυτών των υποστρωμάτων.	Υπήρχε η απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα (Απλή σύνδεση ευρέως διαδεδομένων τεχνητών υγροτόπων).

**ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΕΡΟΒΙΟΥ ΥΓΡΟΤΟΠΟΥ**

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ**

Case study	Ετη παρακολούθησης	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
AEROBIC WETLAND in Polk County, Central Florida <sup>[25]</sup>	Απρίλιος 2006-Οκτώβριος 2007	Η μέθοδος ήταν αξιόπιστη σε σημαντικό βαθμό.	Το σύστημα είχε πάρα πολύ καλή απόδοση. Παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στα εξής: 1) στο pH 2)στις συγκεντρώσεις των κυριότερων ρυπαντών 3)στη συγκέντρωση του As 4) στη συγκέντρωση των παθογόνων μικροοργανισμών. Αυξήθηκε σημαντικά η συγκέντρωση του H <sub>2</sub> S και εμφάνιζε συνεχώς αρνητικό δυναμικό οξειδοαναγωγής.	Δεν αναφέρονται συγκεκριμένα στοιχεία. Η παροχή μεταβάλλονταν ανάλογα με την εποχή (δηλ. ανάλογα με το αν υπήρχε μεγάλη ή ελάχιστη βροχόπτωση).	Δεν υπάρχουν συγκεκριμένες αναφορές σίγουρα όμως οι 18 μήνες παρακολούθησης του συστήματος επαρκούν για αξιόπιστα συμπεράσματα.	Μελετήθηκαν κυρίως As, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , F, Cl, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Br, Na, K, Ca, Mg, Mn, Si, H <sub>2</sub> S, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> και Fe.	Δεν αναφέρεται κάτι συγκεκριμένο.	Υπήρχε η αναγκαία τεχνολογική ωριμότητα εφόσον τα επιμέρους υποσυστήματα είχαν χρησιμοποιηθεί ήδη σε πολλές άλλες εφαρμογές.



**Πίνακας 16:** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα οικονομικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΕΡΟΒΙΟΥ ΥΓΡΟΤΟΠΟΥ</b>						
<b>ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Σταθερό Κόστος</b>	<b>Κόστος Λειτουργίας</b>	<b>Κόστος συλλογής &amp; αποθήκευσης επεξεργασμένου αποβλήτου</b>	<b>Κόστος επεξεργασίας αποβλήτου</b>	<b>Κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>
AEROBIC WETLAND in Bitterfed/Wolfen, Germany <sup>[21]</sup>	Μάιος 2006-Οκτώβριος 2009	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία
AEROBIC WETLAND in Safira, Germany <sup>[22]</sup>	2005-2011	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία
AEROBIC WETLAND in Amfilochia, Western Greece <sup>[23]</sup>	Οκτώβριος 2009-Μάιος 2010.	Αναφέρεται ότι είναι εξαιρετικά χαμηλό αλλά δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Αναφέρεται ότι είναι εξαιρετικά χαμηλό αλλά δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία
AEROBIC WETLAND in Glaslough, Monaghan, Ireland <sup>[24]</sup>	Νοέμβριος 2009-Μάιος 2011 (18 μήνες)	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία
AEROBIC WETLAND in Polk Country, Central Florida <sup>[25]</sup>	Απρίλιος 2006-Οκτώβριος 2007	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία

**Πίνακας 17:** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΕΡΟΒΙΟΥ ΥΓΡΟΤΟΠΟΥ</b>						
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
AEROBIC WETLAND in Bitterfed/Wolfen, Germany <sup>[21]</sup>	Μάιος 2006- Οκτώβριος 2009	Οι κυριότεροι οργανικοί ρυπαντές (τύπου MCB) απομακρύνονται επιτυχώς και επομένως τα απόβλητα είναι σχετικά ασφαλή για την απόθεσή τους στο περιβάλλον. Ωστόσο επιστάται η προσοχή γιατί τα περιβαλλοντικά όρια δεν καλύπτονται για ορισμένους δευτερευούσης σημασίας οργανικούς ρυπαντές.	Δεν υπάρχουν συγκεκριμένες αναφορές.	Το πληρωτικό υλικό των υγρότοπων ήταν μίγμα από χαλίκι (25-47%), άμμο (50-67%) και ύψ/πηλός (2-8%) και τα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν καλάμια	Το σύστημα χρησιμοποιούσε μόνο βιοχημική και βαρυτική ενέργεια.	Δεν αναφέρονται ακριβή στοιχεία.

**Πίνακας 17(συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΕΡΟΒΙΟΥ ΥΓΡΟΤΟΠΟΥ</b>						
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
AEROBIC WETLAND in Safira, Germany <sup>[22]</sup>	2005-2011	Δεν γίνεται σαφής αναφορά εάν η σύσταση των εξερχόμενων αποβλήτων ικανοποιεί τα περιβαλλοντικά κριτήρια ασφαλούς διάθεσης αν και είναι φανερό ότι ο υγρότοπος με την βλάστηση έχει επιτύχει σημαντικά ποσοστά απομάκρυνσης ανόργανων ρυπαντών όπως είναι τα θειικά ιόντα.	Δεν υπάρχουν συγκεκριμένες αναφορές.	Το πληρωτικό υλικό στους υγροτόπους ήταν μίγμα από αμμώδη μαρμαρυγία και χαλίκι ενώ για τη φύτευση χρησιμοποιήθηκαν καλάμια. Επομένως οι πρώτες ύλες δεν επιβάρυναν το περιβάλλον.	Χρησιμοποιούνταν κυρίως βιοχημική ενέργεια. Το μόνο είδος ενέργειας που δεν προέρχονταν από φυσική πηγή ήταν η ηλεκτρική ενέργεια των περισταλτικών αντλιών.	Δεν αναφέρονται ακριβή στοιχεία.
AEROBIC WETLAND in Amfilochia, Western Greece <sup>[23]</sup>	Οκτώβριος 2009-Μάϊος 2010.	Παρότι οι ρυπαντές απομακρύνθηκαν κατά μεγάλο ποσοστό, η σύσταση της τελικής απορροής δεν πληροί τα κριτήρια ασφαλούς περιβαλλοντικής διάθεσης.	Δεν υπάρχουν συγκεκριμένες αναφορές.	Το υπόστρωμα των υγροτόπων αποτελούνταν από μίγμα από χαλίκι και άμμο. Για τη φύτευση χρησιμοποιήθηκαν καλάμια. Όλα είναι φυσικά υλικά.	Καταναλωνόταν κυρίως βιοχημική ενέργεια ενώ το μόνο είδος ενέργειας που δεν προέρχονταν από φυσική πηγή ήταν η ηλεκτρική που χρησιμοποιούσε η αντλία για να μεταφέρει τα απόβλητα από το σημείο προεπεξεργασίας στον πρώτο υγρότοπο.	Δυστυχώς δεν αναφέρονται ακριβή αριθμητικά στοιχεία για την επιφάνεια που κατέλαβε όλο το σύστημα.

**Πίνακας 17(συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο ΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΕΡΟΒΙΟΥ ΥΓΡΟΤΟΠΟΥ</b>						
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
AEROBIC WETLAND in Glaslough, Monaghan, Ireland <sup>[24]</sup>	Νοέμβριος 2009-Μάιος 2011 (18 μήνες)	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Χρησιμοποιήθηκε υπέδαφος της περιοχής και διάφορα φυτά, όλα φυσικά υλικά.	Χρησιμοποιούνται μόνο η βαρυτική και η βιοχημική ενέργεια.	Δεν αναφέρεται η συνολική έκταση Αναφέρονται μόνο τα εξής: Επιφάνεια δεξαμενής ιλύος: 285m <sup>2</sup> Επιφάνεια υγρότοπου 1: 4664m <sup>2</sup> Επιφάνεια υγρότοπου 2: 4500m <sup>2</sup>
AEROBIC WETLAND in Polk Country, Central Florida <sup>[25]</sup>	Απρίλιος 2006-Οκτώβριος 2007	Τα επεξεργασμένα απόβλητα έχουν κατά πολύ βελτιωμένη χημική και μικροβιολογική σύσταση. Όμως, δεν αναφέρεται αν τελικά καλύπτονται τα όρια ασφαλούς περιβαλλοντικής διάθεσης	Δεν υπάρχουν συγκεκριμένες αναφορές.	Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οργανική ύλη και πηλός για το υπόστρωμα του υγρότοπου και φυτά για την επιφάνειά του.	Χρησιμοποιήθηκαν κυρίως χημική και βιοχημική ενέργεια καθώς και ελάχιστη ηλεκτρική που χρειαζόνταν οι αντλίες για τη μεταφορά του αποβλήτου. Η μέθοδος δεν επιβάρυνε από ενεργειακής πλευράς το περιβάλλον.	Η έκταση του υγρότοπου ήταν περίπου 12250m <sup>2</sup> και η έκταση της λεκάνης που λειτουργούσε σαν φίλτρο ήταν 6000 m <sup>2</sup> . Η συνολική έκταση του συστήματος δεν αναφέρεται.

## 5.5 ΑΝΟΞΙΚΕΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΕΣ ΤΑΦΡΟΙ (Anoxic Limestone Drains, ALD)

### CASE STUDY 1

#### ALD in Mina Esperanza (SW Spain)<sup>[26]</sup>

**Τόπος:** Το παθητικό σύστημα εγκαταστάθηκε κοντά στον ποταμό Odiel στην περιοχή Esperanza που βρίσκεται στη νοτιοδυτική Ισπανία.

**Χρόνος παρακολούθησης του συστήματος:** Μάρτιος 2007-Οκτώβριος 2008 (20 μήνες)

**Περιγραφή του συστήματος και βασικά φαινόμενα που παρατηρήθηκαν κατά την λειτουργία του:** Το σύστημα εγκαταστάθηκε προκειμένου να επεξεργαστεί την απορροή που προερχόταν από ένα μεταλλείο πυρίτη που είχε τεράστιες ποσότητες χαλκοπυρίτη. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα ανοιχτό κανάλι (βλ. σχήμα 28Α) που χτίστηκε προκειμένου να οδηγεί άμεσα την ΟΑΜ προς τον κύριο αντιδραστήρα (DAS reactive tank). Για να επιτευχθεί όμως καλύτερη οξυγόνωση της ΟΑΜ δημιουργήθηκαν διαφορετικά κανάλια από τα οποία περνούσε πριν φτάσει στην στον κύριο αντιδραστήρα.

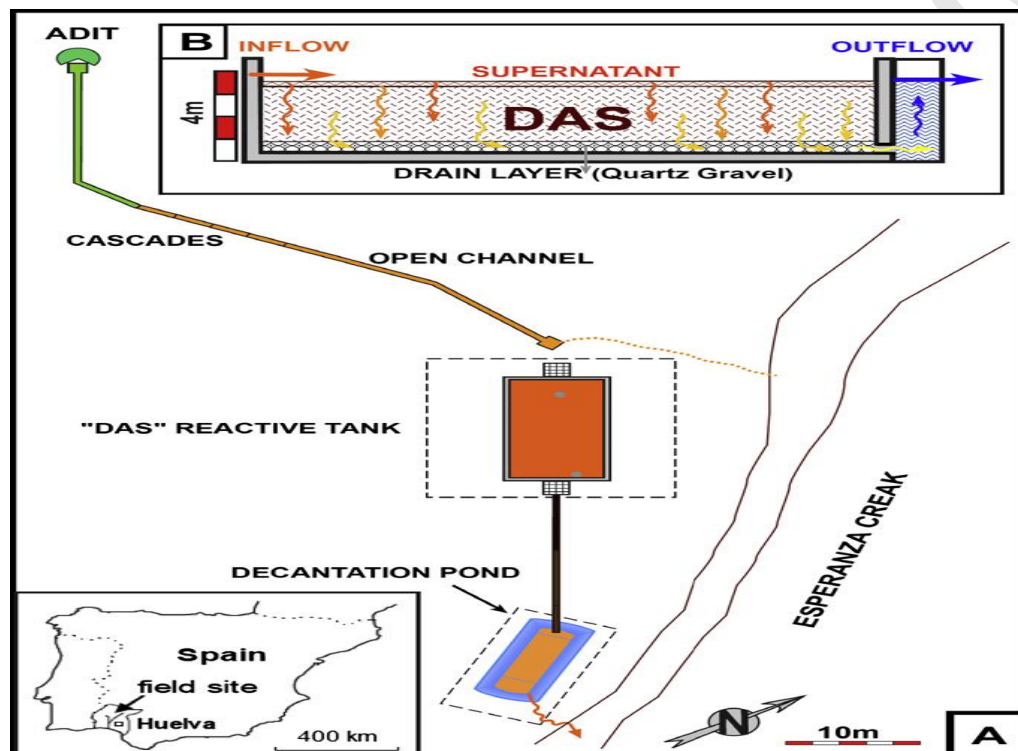
Ο κύριος αντιδραστήρας περιείχε ενεργό μίγμα σε μία ζώνη 2,5m που αποτελούνταν από 80% διεσπαρμένο ασβεστόλιθο (Disperse Alkaline Substrate-DAS) και 20% ασβεστολιθική άμμο. Το μίγμα αυτό είχε υψηλή διαπερατότητα (50%), γεγονός που εξασφάλιζε την σταθερότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας και συγχρόνως μείωνε στο ελάχιστο την δημιουργία συσσωματωμάτων στους πόρους του ενεργού υλικού. Στον πυθμένα του αντιδραστήρα είχε τοποθετηθεί ένα στρώμα πάχους 0,5cm από χοντρό χαλίκι χαλαζία ( βλ. σχήμα 17 Β). Ο χρόνος παραμονής της ΟΑΜ στον αντιδραστήρα ήταν 2,5-5 ημέρες για συνήθεις ροές που κυμαίνονταν από 1 L/s-0,5 L/s αντίστοιχα.

Το τρίτο και τελευταίο μέρος του παθητικού συστήματος ήταν μία δεξαμενή καταβύθισης όγκου 90 m<sup>3</sup> η οποία συνδέονταν με τον αντιδραστήρα μέσω ενός ανοιχτού καναλιού όπου ο αερισμός της απορροής γινόταν σε τρία στάδια (βλ. σχήμα 28Α).

Τα δείγματα για τις αναλύσεις ελήφθησαν από 6 διαφορετικά σημεία: Εισροή ΟΑΜ (Adit), είσοδος αντιδραστήρα (T-in), χώρος υπερκείμενου υγρού αντιδραστήρα (T-sup), έξοδος αντιδραστήρα (T-out), είσοδος στη δεξαμενή καθίζησης (D-in), έξοδος στη δεξαμενή καθίζησης (D-out).

Η σύγκριση των αναλύσεων που έγιναν στο σημείο εξόδου από τον αντιδραστήρα και στην είσοδο της δεξαμενής καταβύθισης έδειξε ότι ελάμβανε χώρα σημαντική απομάκρυνση του σιδήρου αλλά και καταβύθιση του τρισθενούς σιδήρου, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι γινόταν σημαντική παραγωγή τρισθενούς σιδήρου κατά την

μεταφορά από τον αντιδραστήρα στη δεξαμενή καταβύθισης. Αυτό συνέβαινε χάρη στην αβιοτική οξείδωση του σιδήρου που πραγματοποιούνταν σε σχεδόν ουδέτερες τιμές pH που επικρατούσαν κατά την έξοδο από τον αντιδραστήρα.



Σχήμα 28<sup>[26]</sup>: Σχηματική απεικόνιση του παθητικού συστήματος. Στο Β παρουσιάζεται μία κάθετη τομή του αντιδραστήρα.

Στην δεξαμενή καταβύθισης παρατηρήθηκε σημαντική απομάκρυνση σιδήρου και κατανάλωση αλκαλικότητας. Αυτό συνέβηκε γιατί ενώ όταν καταβυθίζεται σίδηρος τείνει να αυξηθεί το pH λόγω της παραγωγής  $H^+$ , το φαινόμενο αυτό αντισταθμίζεται από την παραγωγή σημαντικής αλκαλικότητας που είχε πραγματοποιηθεί στον αντιδραστήρα.

Ένα μειονέκτημα της μεθόδου ήταν ότι κατά τους τελευταίους οχτώ μήνες λειτουργίας της παρατηρήθηκε μία μικρή μείωση στο pH και σημαντική μείωση της παραγόμενης αλκαλικότητας (από τα 200 mg/L ως  $CaCO_3$  έως σχεδόν στο 0) στον αντιδραστήρα και επίσης στο ίδιο χρονικό διάστημα έγινε σημαντική μείωση του pH στη δεξαμενή καταβύθισης.

Σε ότι αφορά τους άλλους κύριους ρυπαντές, το Al αποδείχθηκε ότι ήταν το στοιχείο που επηρεάστηκε λιγότερο από τη μείωση του pH και μόνο όταν το pH έπεσε κοντά στην τιμή 5, καταβυθίστηκε το Al υπό τη μορφή  $Al_4(SO_4)(OH)_{10} \cdot 15H_2O$ . Το As καταβυθίστηκε προσροφούμενο στην επιφάνεια των ιζημάτων του σιδήρου με την μορφή του σκορδίτη

(FeAsO<sub>4</sub>). Για τα στοιχεία Zn, Co, Ni, τους έξι πρώτους μήνες λειτουργίας του συστήματος παρατηρήθηκε σημαντική απομάκρυνσή τους (πιθανόν λόγω της δράσης θειοαναγωγικών βακτηρίων που είχαν αναπτυχθεί λόγω της παρουσίας του οργανικού υλικού στο ενεργό μίγμα του αντιδραστήρα). Στη συνέχεια όμως, η δράση των βακτηρίων μειώθηκε γιατί ο ρυθμός ροής στον αντιδραστήρα ήταν υψηλός και επομένως ο χρόνος παραμονής της OAM σε αυτόν δεν ήταν επαρκής. Έτσι μειώθηκε και η καταβύθιση αυτών των μετάλλων.

Ένας άλλος παράγοντας που εξετάστηκε κατά την αξιολόγηση της μεθόδου ήταν η μείωση του φορτίου οξύτητας. Αυτή είναι μία παράμετρος που βοηθάει στην καλύτερη κατανόηση της απαιτούμενης επιφάνειας του συστήματος προκειμένου να είναι αποδοτικό και επομένως επηρεάζει δραματικά το κόστος της μεθόδου εάν το κόστος ενοικίασης της γης είναι υψηλό. Συγκρίθηκε λοιπόν η παράμετρος αυτή στο παθητικό αυτό σύστημα καθώς και σε άλλα συστήματα (Αναερόβιους υγρότοπους-AnW, υγρότοπους κάθετης ροής-VFW, Ανοξικές ασβεστολιθικές τάφρους-ALD, Ανοιχτές ασβεστολιθικές τάφρους-OLC). Φάνηκε λοιπόν, ότι το παθητικό σύστημα που παρουσιάζεται εδώ είχε σημαντικά μεγαλύτερη δυνατότητα κατανάλωση φορτίου οξύτητας (32 φορές σε σχέση με την μέθοδο VFW και 47 φορές σε σχέση με την μέθοδο ALD).

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### **1) Τεχνολογικά κριτήρια**

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Η μέθοδος είναι αρκετά αξιόπιστη καθώς τα αποτελέσματά της συμφωνούν με τα θεωρητικώς αναμενόμενα και δεν αναφέρονται αιτίες αναξιοπιστίας.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Το σύστημα απομάκρυνε σε σημαντικό βαθμό τους κυριότερους ρυπαντές με τον Fe να απομακρύνεται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με όλα τα άλλα μέταλλα. Όμως η αποδοτικότητα του συστήματος για το Al, τον Cu και το Cd μειώθηκε μετά τον ένα χρόνο λειτουργίας, γεγονός που οφείλεται στο ότι η ποσότητα του ασβεστολίθου δεν ήταν πλέον επαρκής.

Η μεγάλη αποτελεσματικότητα που είχε το σύστημα φαίνεται και από τις υψηλές τιμές οξύτητας που καταναλώθηκαν κατά την επεξεργασία της OAM. Η ποσότητα της καταναλισκόμενης οξύτητας (σε g/m<sup>2</sup>\*day) ήταν 10 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τις γενικά αποδεκτές τιμές των παθητικών συστημάτων(40 g/m<sup>2</sup>\*day).

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Fe, Al, Cu, Si, As, Cd, Cr, Ni, Ti

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Προτείνεται η εφαρμογή ενός νέου συστήματος που θα συνδυάζει τρεις δεξαμενές τεχνολογίας DAS. Με τον τρόπο αυτό αναμένεται να μπορούν να επεξεργαστούν μεγαλύτερες ροές OAM (έως και 2,5 L/sec) και ταυτόχρονα πιθανολογείται ότι θα ξεπεραστούν τα προβλήματα που είχε αυτό το σύστημα δηλ. η μη πλήρης απομάκρυνση Fe καθώς και η μικρότερη απομάκρυνση Al, Cu και Cd μετά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας.

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Η μέθοδος αυτή αν και στηρίζεται σε απλές αρχές δεν έχει εφαρμοστεί σε πάρα πολλές πιλοτικές έρευνες. Ωστόσο το σύστημα δεν περιελάμβανε κάτι ιδιαίτερα πρωτοποριακό από άποψη τεχνολογίας. Επομένως αν και δεν φαίνεται να υπάρχουν προβλήματα τεχνικής φύσεως είναι επιθυμητή η περαιτέρω εφαρμογή του.

Τέλος, σημειώνεται ότι η μέση παροχή της επεξεργαζόμενης OAM στο σύστημα ήταν 0,03 L/min.

## **2) Οικονομικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Η μέθοδος χρησιμοποιεί ενέργεια μόνο από φυσικές πηγές (βαρυτική, βιοχημική).

## **2) Περιβαλλοντικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Είναι ασφαλής επειδή η μέθοδος έχει υψηλή αποτελεσματικότητα ως προς την απομάκρυνση των κυριότερων ρυπαντών καθώς και την κατανάλωση του φορτίο οξύτητας.

**Κριτήριο 3.2 (Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου):** Αν χρειάζεται να γίνει αποκατάσταση του τοπίου αυτό θα είναι κάτι εύκολο καθώς το σύστημα δεν καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Χρησιμοποιήθηκαν μίγμα από διεσπαρμένο ασβεστόλιθο και ασβεστολιθική άμμο καθώς και χοντρό χαλίκι χαλαζία δηλ. υλικά φιλικά προς το περιβάλλον.

**Κριτήριο 3.5 (Απαιτήσεις γης):** Η απαιτούμενη επιφάνεια είναι 120m<sup>2</sup>, δηλ. πολύ μικρότερη σε σύγκριση με άλλες μεθόδους. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα.



## Case study 2

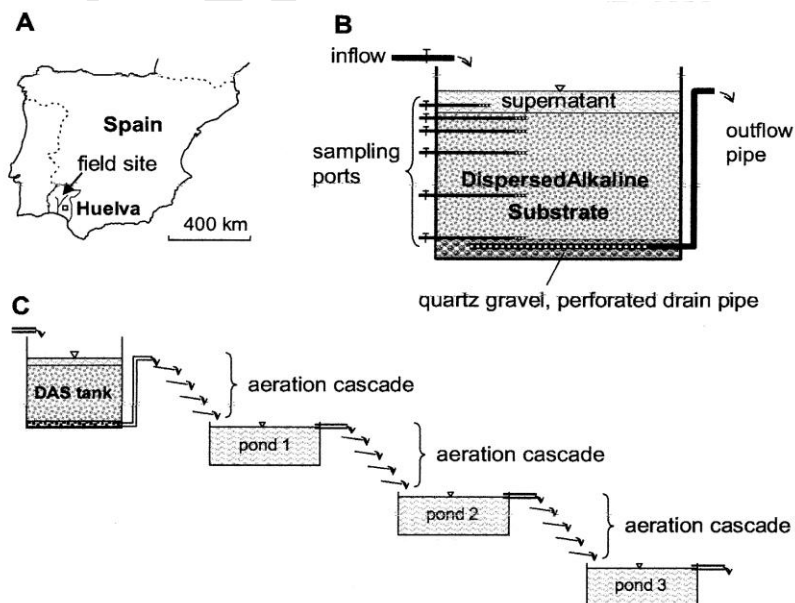
### ALD in Huelva, SW Spain<sup>[27]</sup>

**Τόπος:** Το παθητικό σύστημα εγκαταστάθηκε σε ένα εγκαταλελειμμένο ορυχείο που ονομάζεται «Monte Romero» και βρίσκεται στο χωριό Huelva στην βορειοδυτική Ισπανία. Το μεταλλείο εξήγαγε πυρίτη και επίσης είχε σημαντικές ποσότητες σουλφιδίων Zn, Pb και Cu.

**Χρόνος παρακολούθησης του συστήματος:** Αύγουστος 2005-Μάιος 2006

**Περιγραφή του συστήματος και βασικά φαινόμενα που παρατηρήθηκαν κατά την λειτουργία του:** Το σύστημα εγκαταστάθηκε προκειμένου να επεξεργαστεί την OAM που προερχόταν από ένα εγκαταλελειμμένο μεταλλείο πυρίτη. Η OAM είχε pH περίπου 3, καθαρή οξύτητα 1400-1650 mg/L CaCO<sub>3</sub>, και περιείχε υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων Fe (υπό τη μορφή κυρίως Fe<sup>2+</sup>), Al, As, Cu, Si, Zn, Pb, Cd, Mn, Ni, Co.

Πρώτα κατασκευάστηκε η δεξαμενή (βλ. σχήμα 29) που περιείχε το DAS (διάμετρος 1,7m, ύψος 1,6 m, όγκος 3 m<sup>3</sup>). Η δεξαμενή εξοπλίστηκε με έναν διάτρητο σωλήνα και μία ζώνη στον πυθμένα της πάχους 15cm από χαλαζία σε μέγεθος χαλικιού (διαμέτρου 2-4 cm). Στη συνέχεια τοποθετήθηκε μία ζώνη πάχους 1m που περιείχε το DAS (Disperse Alkaline Substrate) το οποίο ήταν ένα μίγμα από 25% (v/v) άμμο ασβεστίτη και το υπόλοιπο 75% ήταν ροκανίδια πεύκου.



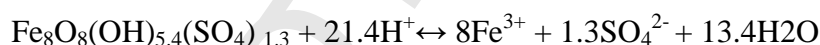
Σχήμα 29<sup>[27]</sup>: A: Τοποθεσία όπου εγκαταστάθηκε το παθητικό σύστημα. B: Σχέδιο δεξαμενής DAS. C: Σχηματική αναπαράσταση ολόκληρου του παθητικού συστήματος (δεξαμενή DAS+δεξαμενές αερισμού).

Με βάση ότι το πορώδες του υποστρώματος που τοποθετήθηκε στη δεξαμενή DAS ήταν περίπου 50%, καθορίστηκε η μέση ροή της OAM που ήταν  $0,5\text{m}^3/\text{m}^2\text{day}$ .

Η λειτουργία της δεξαμενής αυτής στηρίζεται στο ότι τα ροκανίδια παρέχουν υψηλή διαπερατότητα και μεγάλους πόρους και έτσι μπορούν να μειωθούν τα προβλήματα από πιθανή φραγή των πόρων. Ταυτόχρονα, το μικρό μέγεθος πόρων του ασβεστολιθικού υλικού που προστίθεται, παρέχει μεγάλη ενεργή επιφάνεια και αυτό αυξάνει την δραστηριότητα του συστήματος, μειώνει τις πιθανότητες παθητικοποίησής του, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει την υδρόλυση του Fe και του Al. Γενικά, οι αντιδράσεις που πιθανόν να λαμβάνουν χώρα σε μία τέτοια δεξαμενή είναι υδατική συμπλοκοποίηση (συμπεριλαμβανομένων των οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων), ρόφηση, καταβύθιση/διαλυτοποίηση ορυκτών και διαλυτοποίηση αερίων.

Έπειτα κατασκευάστηκαν μία δεξαμενή αερισμού και μία δεξαμενή καταβύθισης. Επειδή όμως το μέγεθος της τελευταίας αποδείχτηκε ότι ήταν μικρό, αποφασίστηκε μετά από 8 μήνες λειτουργίας η κατασκευή και άλλων δεξαμενών αερισμού καθώς και μεγαλύτερης δεξαμενής καταβύθισης.

Κατά την λειτουργία του συστήματος αποδείχθηκε ότι παρά την υψηλή συγκέντρωση  $\text{Fe}^{3+}$  και Al στην OAM, τελικά δεν έγινε παθητικοποίηση του συστήματος. Αυτό επιτεύχθηκε γιατί οι κόκκοι του ασβεστολίθου που είχαν πολύ μικρό μέγεθος μπόρεσαν να διαλυτοποιηθούν πλήρως προτού η ζώνη που δημιουργήθηκε από τα καταβυθίσματα του Fe και του Al αποκτήσει μεγάλο πάχος. Επίσης, η απομάκρυνση του Fe έγινε κυρίως μέσω δύο μηχανισμών: 1) οξείδωση του  $\text{Fe}^{2+}$  σε  $\text{Fe}^{3+}$  και 2) υδρόλυση και καταβύθιση του  $\text{Fe}^{3+}$  σύμφωνα με την επόμενη αντίδραση<sup>[25]</sup>:



Ωστόσο ο περιορισμός της απομάκρυνσης του σιδήρου οφειλόταν στην μεν δεξαμενή DAS στην ύπαρξη του διαλυτοποιημένου οξυγόνου ενώ στις δεξαμενές αερισμού και καταβύθισης οφειλόταν στην αυξημένη αλκαλικότητα.

Παρατηρήθηκε επίσης ότι ο ασβεστίτης καταναλώθηκε πλήρως στη ζώνη συσσώρευσης του Fe και μερικώς στη αντίστοιχη ζώνη για το Al και καταβυθίστηκε στη χαρακτηριστική μορφή του γύψου ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Τέλος, η δεξαμενή DAS κατόρθωσε να απομακρύνει υψηλό ποσοστό οξύτητας καθώς ο  $\text{Fe}^{3+}$  και το Al αλλά και άλλα μέταλλα συσσωρεύτηκαν στο ασβεστολιθικό υπόστρωμα. Μέσω αυτού του μηχανισμού η δεξαμενή πέτυχε να μειώσει πολύ την οξύτητα αλλά βαθμιαία επήλθε φραγή των πόρων του υποστρώματος, γεγονός που οπωσδήποτε θα οδηγήσει στην ανάγκη καθαρισμού ή αλλαγής του υποστρώματος.

Επίσης, έγινε σύγκριση μεταξύ του συστήματος της δεξαμενής DAS, του ALD και ενός RAPS και αποδείχθηκε ότι η δεξαμενή DAS απομάκρυνε περισσότερη οξύτητα από ότι τα άλλα δύο συστήματα. Ακόμα φάνηκε ότι στη δεξαμενή DAS επιτεύχθηκε μεγαλύτερη μείωση του όξινου φορτίου σε σχέση με ένα σύστημα RAPS. Όμως το σημαντικό είναι ότι το φαινόμενο της φραγής των πόρων παρουσιάστηκε νωρίτερα από ότι σε ένα σύστημα τύπου RAPS ή ALD.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Η μέθοδος είναι πολύ αξιόπιστη αφού τα αποτελέσματά της συμφωνούν πλήρως με την εργαστηριακή έρευνα που είχε προηγηθεί.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Η απόδοση της δεξαμενής που είχε το DAS ήταν πάρα πολύ καλή ως προς ορισμένους ρυπαντές (Al κατά 93%, AI κατά 99%, Pb κατά 98%, Cu κατά 95%), μέτρια για κάποιους άλλους (Fe κατά 25%, Cd κατά 14%, Zn κατά 5% ) και πολύ μικρή για λίγους μόνο (Mn, Ni, Co). Η απομάκρυνση του Fe κατά τη λειτουργία όλου του παθητικού συστήματος (δηλ. DAS+δεξαμενή καταβύθισης) ανήλθε στο 48%. Δυστυχώς όμως δημιουργήθηκε ένα αδιαπέραστο στρώμα από καταβυθίσματα πλούσια σε Al γεγονός που σημαίνει ότι κάποια στιγμή θα χρειαστεί αντικατάσταση το υπόστρωμα.

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Οι κυριότεροι ρυπαντές που εξετάστηκαν ήταν: Fe, Al, As, Cu, Si, Zn, Pb, Cd, Mn, Ni, Co.

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Υπάρχουν προοπτικές βελτίωσης της μεθόδου. Αυτό που προτείνεται είναι να εξεταστεί η χρήση και κάποιου άλλου, διαφορετικού μίγματος αλκαλικών υλικών που θα χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα σε μία άλλη δεξαμενή DAS που θα ακολουθεί αυτήν που ήδη υπάρχει ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερο pH και έτσι να απομακρύνονται περισσότερα δισθενή μέταλλα.

Η άλλη προτεινόμενη λύση είναι η προς επεξεργασία OAM να έχει μικρότερη συγκέντρωση Al ώστε να μην καθυστερεί όσο είναι δυνατό η εμφάνιση του φαινομένου της φραγής των πόρων του υποστρώματος.

Σημειώνεται ακόμα ότι υπολογίζοντας ότι το πορώδες του υποστρώματος που τοποθετήθηκε στη δεξαμενή DAS ήταν περίπου 50%, καθορίστηκε η μέση ροή της OAM που ήταν  $0,5\text{m}^3/\text{m}^2\text{day}$ .

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Υπήρχε η αναγκαία τεχνολογική ωριμότητα αφού η μέθοδος των δεξαμενών DAS είχε εφαρμοστεί ήδη και σε άλλες έρευνες.

## 2) Περιβαλλοντικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Το μίγμα του ασβεστολιθικού υποστρώματος αποτελούνταν από άμμο ασβεστίτη και ροκανίδια πεύκου. Χρησιμοποιήθηκε ακόμα χαλαζίας. Όλα είναι φυσικά υλικά, φιλικά στο περιβάλλον.

**Κριτήριο 3.5 (Απαιτήσεις γης):** Αναφέρεται μόνο ότι ο όγκος της δεξαμενής DAS είναι περίπου  $3\text{m}^3$  και ο όγκος κάθε δεξαμενής αερισμού είναι  $6\text{m}^3$ .

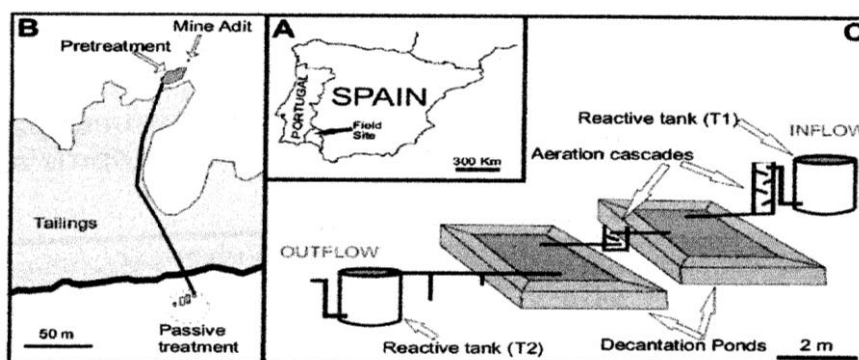
## Case study 3

### ALD in Monte Romero mine, SW Spain<sup>[28]</sup>

**Τόπος:** Το παθητικό σύστημα εγκαταστάθηκε δίπλα στο εγκαταλελειμμένο ορυχείο Monte Romero στη νοτιοδυτική Ισπανία

**Χρόνος παρακολούθησης του συστήματος:** Απρίλιος 2008-Σεπτέμβριος 2008

**Περιγραφή του συστήματος και βασικά φαινόμενα που παρατηρήθηκαν κατά την λειτουργία του:** Το σύστημα εγκαταστάθηκε προκειμένου να επεξεργαστεί την ΟΑΜ από το διπλανό εγκαταλελειμμένο μεταλλείο (βλ. σχήμα 30). Επειδή το μεταλλείο αυτό εξήγαγε πυρίτη, υπήρχαν σημαντικές ποσότητες από το ορυκτό αυτό στο υπέδαφος της περιοχής και επίσης υπήρχαν σημαντικές ποσότητες Zn και Pb.



Σχήμα 30<sup>[28]</sup>: Α και Β: Χάρτης γενικός (Α) και με λεπτομέρειες (Β) που εγκαταστάθηκε το παθητικό σύστημα. C: Γενικό σχεδιάγραμμα του παθητικού συστήματος στο Monte Romero.

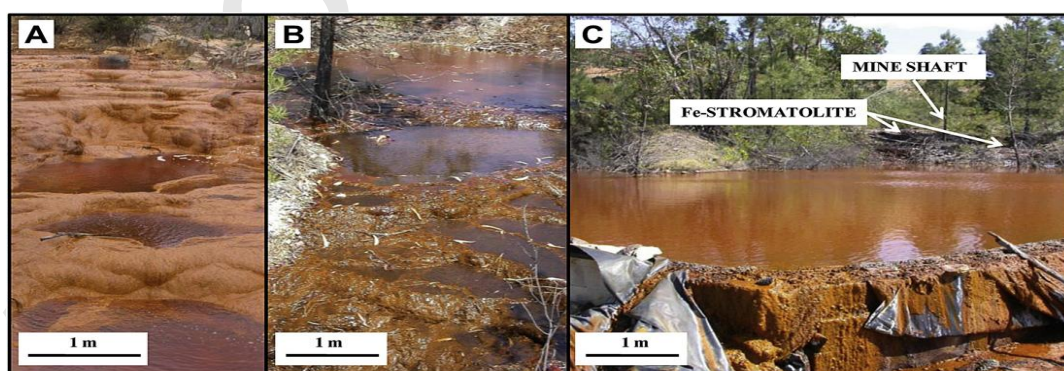
Η ΟΑΜ είχε pH περίπου 3, καθαρή οξύτητα  $1800\text{ mg/L CaCO}_3$ , και περιείχε υψηλές (περίπου μία ή δύο φορές μεγαλύτερες από αυτές που επεξεργάζονται τα παθητικά

συστήματα στη βόρεια Αμερική) συγκεντρώσεις μετάλλων Fe (κατά 99% με τη μορφή  $\text{Fe}^{2+}$ ), Al, As, Cu, Zn, Pb, Cd, Mn, Ni, Co καθώς και  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Το καινούριο σε αυτό το παθητικό σύστημα ήταν ότι πριν πάει η OAM στην δεξαμενή DAS υφίστατο προεπεξεργασία σε μία δεξαμενή τύπου NFOL (Natural Fe-Oxidizing Lagoon, Λιμνοθάλασσα φυσικής οξειδωσης του Fe). Ο σκοπός ύπαρξης αυτής της δεξαμενής είναι να βοηθήσει ώστε να γίνεται καλύτερη οξειδωση του σιδήρου. Η διαδικασία αυτή όπως είναι γνωστό καταλύεται από την ύπαρξη βακτηρίων καθώς σε τόσο χαμηλό pH η αβιοτική οξειδωση είναι πολύ αργή.

Το συνολικό σύστημα που εγκαταστάθηκε αποτελούνταν από μία δεξαμενή τύπου NFOL απο όπου η προεπεξεργασμένη OAM μέσω σωληνώσεων μεταφερόταν στην δεξαμενή DAS (T1). Μετά ακολουθούσαν δύο δεξαμενές καταβύθισης και μετά είχε τοποθετηθεί μία άλλη δεξαμενή DAS (T2.)

Η δεξαμενή NFOL περιελάμβανε (βλ. εικόνα 7) μία ανώτερη περιοχή που βρίσκεται πολύ κοντά στο ορυχείο η οποία είχε σχηματιστεί από προϋπάρχοντα θειούχα ορυκτά που είχαν σχηματίσει μία ζώνη. Μετά το ανώτερο αυτό τμήμα ακολουθούσε μία λιμνοθάλασσα όγκου περίπου  $100\text{m}^3$  και έπειτα χτίστηκε ένα φράγμα (για να απομονωθεί μία μικρή περιοχή) ύψους 100cm που είχε δημιουργηθεί από χώμα και πέτρες που υπήρχαν στην περιοχή και είχε μονωθεί με τη χρήση αδιαπέραστου πλαστικού υλικού. Ο πυθμένας αυτού του φράγματος και τα τοιχώματα που είχαν δημιουργηθεί με φυσικό τρόπο είχαν ακανόνιστο σχήμα το οποίο όμως δεν πειράχτηκε γιατί αυτό ακριβώς ήταν που αύξανε την ειδική επιφάνεια της περιοχής. Εξαιτίας αυτής της αυξημένης παραμέτρου η δεξαμενή NFOL κατάφερνε να προκαλέσει γρηγορότερη οξειδωση του σιδήρου.



Εικόνα 7<sup>[28]</sup>: A: στρώματα Fe. B: λεπτομέρεια από στρώματα Fe που βρίσκονται πολύ κοντά στο ορυχείο. C: γενική εικόνα της δεξαμενής NFOL.

Οι δεξαμενές DAS είχαν όγκο  $3\text{m}^3$  η κάθε μία και το υπόστρωμα κάθε τέτοιας δεξαμενής ήταν ένα μίγμα από 80% (v/v) ροκανίδια πεύκου και το υπόλοιπο 20% ήταν

άμμος ασβεστολίθου με μέγεθος κόκκων 1-5mm. Έπειτα κάθε μία δεξαμενή εξοπλίστηκε με έναν διάτρητο σωλήνα και στον πυθμένα της τοποθετήθηκε μία ζώνη πάχους 15cm από χαλαζία σε μέγεθος χαλικιού.

Παρατηρήθηκε ότι το υγρό στη λιμνοθάλασσα είχε μεγάλη θολερότητα και επίσης είχε κόκκινο-καφέ χρώμα (βλ. εικόνα 7), ενδεικτικό της ύπαρξης του  $Fe^{3+}$  σε αυτή. Οι αναλύσεις έδειξαν ότι τα δείγματα που ελήφθησαν σε διάφορα βάθη της λιμνοθάλασσας είχαν την ίδια σύσταση γεγονός που αποδεικνύει ότι η οξείδωση του σιδήρου ελάμβανε χώρα σε όλο τον όγκο της λιμνοθάλασσας.

Στη λιμνοθάλασσα, όπως ήταν αναμενόμενο, υπήρχαν υψηλές συγκεντρώσεις  $Fe^{3+}$  οι οποίες αυξάνονταν με τον χρόνο. Έτσι, στην αρχή της λειτουργίας του συστήματος το 42% του συνολικά καταβυθιζόμενου σιδήρου ήταν με τη μορφή του  $Fe^{3+}$ , ποσοστό που ανήλθε στο 89% μετά από τρεις μήνες λειτουργίας.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Το χρονικό διάστημα εφαρμογής της μεθόδου (μόλις 6 μήνες) δεν επαρκεί για να κριθεί η αξιοπιστία της. Ωστόσο με τα δεδομένα που υπάρχουν μέχρι στιγμής μπορούμε να πούμε ότι η μέθοδος δείχνει αξιόπιστη αφού τα αποτελέσματά της συμφωνούν πλήρως με την εργαστηριακή έρευνα που είχε προηγηθεί.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Ήταν η πρώτη φορά που ένα παθητικό σύστημα (NFOL + DAS) που εγκαταστάθηκε στο εγκαταλελειμμένο ορυχείο Monte Romero πέτυχε να απομακρύνει πλήρως τον Fe και το Al. Εκτός από αυτά τα δύο μέταλλα, απομακρύνθηκαν κατά 100% ο Cu, ο Pb και το As. Η προεπεξεργασία της OAM που έγινε στην δεξαμενή NFOL πέτυχε καταβύθιση του εισερχόμενου  $Fe^{2+}$  κατά 38% με ρυθμό περίπου  $100g/m^2/day$  που ήταν 10 φορές μεγαλύτερος από τους συνήθεις ρυθμούς που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Επίσης σε αυτό το στάδιο απομακρύνθηκε περίπου το 80% του As. Αντίθετα ο Zn απομακρύνθηκε μόνο κατά 6%.

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Οι ρυπαντές που εξετάστηκαν κυρίως ήταν ο Fe και το Al, και επίσης εξετάστηκαν As, Cu, Zn, Pb, Si, Cd, Mn,  $SO_4^{2-}$

**Κριτήριο 1.6 (Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης):** Για να βελτιωθεί η απομάκρυνση του Zn (που είναι μόλις 6%) προτείνεται η περαιτέρω επεξεργασία του προϊόντος (μετά και την δεύτερη δεξαμενή DAS) σε έναν αντιδραστήρα με ένα κατάλληλο υπόστρωμα

(όχι το ίδιο της δεξαμενής DAS) που να αυξάνει το pH σε τιμές κατάλληλες ώστε να μπορεί να καταβυθιστεί ο Zn.

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Η μέθοδος είχε την απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα καθώς τα υποσυστήματα που την αποτελούσαν (NFOL + DAS) είχαν εφαρμοστεί και σε άλλες περιπτώσεις.

Τέλος, αναφέρεται ότι η μέση ροή της επεξεργαζόμενης OAM ήταν 0,025L/min.

## 2) Οικονομικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Χρησιμοποιούνται μόνο βαρυτική ενέργεια καθώς και η χημική ενέργεια των αντιδράσεων.

## 3) Περιβαλλοντικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Λόγω της σχεδόν πλήρους απομάκρυνσης των κυριότερων ρυπαντών που επιτυγχάνεται από το σύστημα, το επεξεργασμένο απόβλητο μπορεί να διατεθεί χωρίς κανένα κίνδυνο στο περιβάλλον.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Το μίγμα του ασβεστολιθικού υποστρώματος αποτελούνταν κατά 80% από ροκανίδια πεύκου και κατά 20% από άμμο ασβεστίτη. Χρησιμοποιήθηκε ακόμα χαλαζίας. Όλα είναι φυσικά υλικά, φιλικά στο περιβάλλον.

**Κριτήριο 3.5 (Απαιτήσεις γης):** Δεν παρουσιάζονται συγκεκριμένα στοιχεία. Το μόνο που αναφέρεται είναι ότι απαιτείται μικρή έκταση γης.

## Case study 4

### ALD in Alabama, USA<sup>[29]</sup>

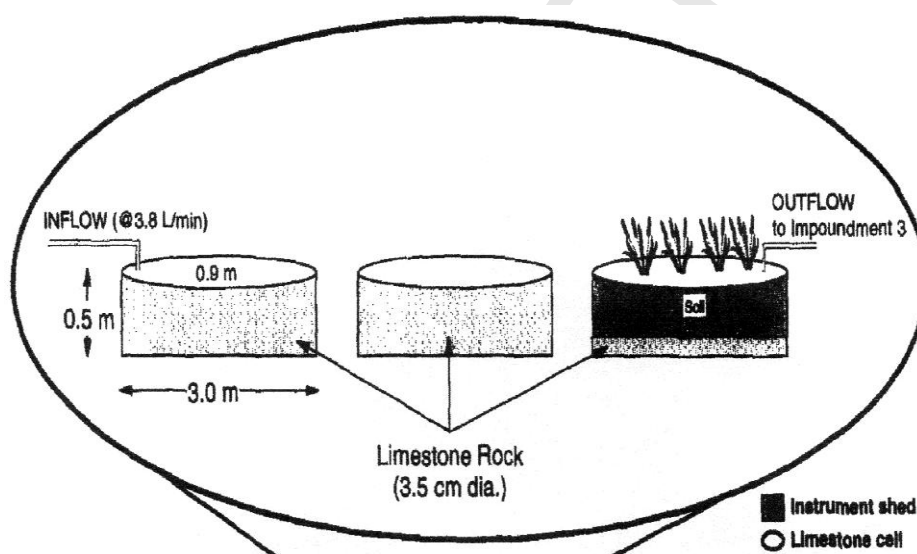
**Τόπος:** Το παθητικό σύστημα ALD εγκαταστάθηκε στη βάση μίας δεξαμενής απόθεσης τέφρας άνθρακα. Η δεξαμενή αυτή βρισκόταν στην πολιτεία Αλαμπάμα των ΗΠΑ.

**Χρόνος παρακολούθησης του συστήματος:** Ιούνιος 1991-Οκτώβριος 1992

**Περιγραφή του συστήματος:** Στόχος της εγκατάστασης του παθητικού συστήματος ήταν η επεξεργασία των νερών αποστράγγισης που προέρχονταν από μία δεξαμενή απόθεσης τέφρας άνθρακα. Το παθητικό σύστημα χτίστηκε στη βάση αυτής της δεξαμενής η οποία βρισκόταν δίπλα σε έναν τεχνητό υγρότοπο που είχε κατασκευαστεί πέντε χρόνια νωρίτερα προκειμένου να επεξεργαστεί τα νερά αυτά. Όμως ο υγρότοπος

είχε αποτύχει ως προς την απομάκρυνση του Mn, γι' αυτό και χρειάστηκε το νέο παθητικό σύστημα.

Το σύστημα αποτελούνταν από δύο δεξαμενές ALD και μετά από αυτές είχε κατασκευαστεί ένας υγρότοπος (βλ. σχήμα 31). Οι δεξαμενές ALD είχαν ως πληρωτικό υλικό κόκκους ασβεστολίθου (κατά 90% αποτελούνταν από καθαρό  $\text{CaCO}_3$ ) που είχαν μέση διάμετρο 35mm. Στον πυθμένα του υγρότοπου είχε τοποθετηθεί κονιορτοποιημένος ασβεστόλιθος σε μία ζώνη πάχους 30cm ενώ τα φυτά που είχαν τοποθετηθεί σε αυτόν ανήκαν στα γένη *Typha latifolia* L. και *Scirpus validus*. Τονίζεται ότι τα νερά αποστράγγισης είχαν χαμηλή συγκέντρωση σιδήρου και επομένως δεν υπήρχε το πρόβλημα της τυχόν φραγής των πόρων του υποστρώματος από τις καταβυθίσεις των υδροξειδίων του σιδήρου. Έτσι, ο υγρότοπος ήταν αερόβιος.



Σχήμα 31<sup>[29]</sup>: Γενικό σχεδιάγραμμα του παθητικού συστήματος στην πολιτεία Αλαμπάμα.

Αυτό που διαφοροποιεί την παρούσα εφαρμογή από εκείνες που είχαν ήδη εφαρμοστεί είναι ότι οι προηγούμενες χρησιμοποιούσαν ενεργό υλικό στο οποίο είχαν εμβολιαστεί βακτήρια που προκαλούσαν την οξείδωση του Mn. Τώρα όμως δεν είχαν εμβολιαστεί καθόλου βακτήρια οπότε αυτό που εξετάστηκε ήταν εάν αυτά τα βακτήρια είναι δυνατό να παρουσιαστούν μέσω φυσικών διεργασιών.

Η χημική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα επεξεργασμένα ύδατα έδειξε το pH είχε αυξηθεί από 6,43 στο 7,55 και ότι η συγκέντρωση του Ca δεν είχε μεταβληθεί σημαντικά. Η παρατήρηση αυτή για το Ca οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο κύριος μηχανισμός λειτουργίας του υποστρώματος είναι ότι παρέχει τις κατάλληλες συνθήκες



για τη δράση των βακτηρίων που προκαλούν την καταβύθιση του Mn και λιγότερο ότι το ασβεστολιθικό υπόστρωμα διαλυτοποιείται και παρέχει το κατάλληλο αλκαλικό περιβάλλον που για την απομάκρυνση του Mn.

Ένα άλλο ενδιαφέρον συμπέρασμα από την λειτουργία αυτού του παθητικού συστήματος ήταν ότι ενώ υπήρχαν και άλλες μελέτες όπου ανάλογα συστήματα εμφάνιζαν εξίσου επιτυχημένα αποτελέσματα, αυτό ήταν το πρώτο σύστημα που είχε λειτουργήσει πολύ αποδοτικά για τόσο μεγάλο χρονικό (σχεδόν 2 χρόνια).

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου ως προς τα εξής κριτήρια:

### 1) Τεχνολογικά κριτήρια

**Κριτήριο 1.1 (Αξιοπιστία):** Η μέθοδος είναι αξιόπιστη αφού εφαρμοζόμενη επί τόπου για μεγάλο χρονικό διάστημα (17 μήνες) έδωσε τα αναμενόμενα αποτελέσματα σύμφωνα με τις εργαστηριακές εφαρμογές που είχαν προηγηθεί.

**Κριτήριο 1.2 (Αποδοτικότητα):** Το παθητικό σύστημα κατάφερε να απομακρύνει κατά 90% το Mn, που ήταν και ο κύριος στόχος δημιουργίας του.

**Κριτήριο 1.5 (Πλήθος ρυπαντών):** Ο κύριος ρυπαντής που εξετάστηκε ήταν το Mn και δευτερευόντως ο Fe.

**Κριτήριο 1.7 (Ωριμότητα τεχνολογίας):** Η μέθοδος είχε την απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα καθώς τα υποσυστήματα που την αποτελούσαν (ALD + Αερόβιος υγρότοπος) είχαν εφαρμοστεί και σε άλλες μελέτες.

Σημειώνεται επίσης ότι η μέση παροχή για τα προς επεξεργασία νερά αποστράγγισης ήταν 2,8L/min.

### 2) Οικονομικά κριτήρια

**Κριτήριο 3.4 (Ενεργειακές απαιτήσεις):** Χρησιμοποιείται κυρίως η βιοχημική ενέργεια των βακτηρίων και η χημική ενέργεια που παράγεται από τις διάφορες αντιδράσεις. Η μόνη ενέργεια που δεν είναι φυσικής προέλευσης είναι η ηλεκτρική που χρειάζεται στην αρχή προκειμένου να λειτουργήσει η αντλία που μεταφέρει τα νερά αποστράγγισης στην πρώτη δεξαμενή ALD. Όμως αυτή η ενέργεια είναι ελάχιστη και επομένως η μέθοδος είναι φιλική στο περιβάλλον από ενεργειακή άποψης.

### **3) Περιβαλλοντικά κριτήρια**

**Κριτήριο 3.1 (Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων):** Είναι ασφαλής η διάθεσή τους ως προς το περιεχόμενο Mn. Οι άλλοι ρυπαντές δεν εξετάζονται σε αυτή την πιλοτική εφαρμογή.

**Κριτήριο 3.3 (Χρήση πρώτων υλών):** Χρησιμοποιούνται μόνο κόκκοι ασβεστολίθου για τις δεξαμενές ALD και για το υπόστρωμα του υγρότοπου καθώς και μερικά φυτά. Είναι όλα φυσικά υλικά.

Στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 18, Πίνακας 19, Πίνακας 20) παρουσιάζονται συνοπτικά τα case studies που αναλύθηκαν παραπάνω και συγκρίνονται μεταξύ τους ως προς κάθε κατηγορία κριτηρίων (τεχνολογικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά)

**Πίνακας 18:** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ALD

ΜΕΘΟΔΟΣ ALD								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη παρακολούθησης	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργασόμενης OAM	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
ALD in Mina Esperanza (SW Spain) <sup>[26]</sup>	Μάρτιος 2007-Οκτώβριος 2008 (20 μήνες)	Είναι αρκετά αξιόπιστη Τα αποτελέσματά της συμφωνούν με τα θεωρητικώς αναμενόμενα και δεν αναφέρονται αιτίες αναξιοπιστίας.	Πολύ αποτελεσματικό για τους κυριότερους ρυπαντές (ιδιαίτερω για τον Fe). Ακόμα σημαντική απομάκρυνση μεγάλων φορτίων οξύτητας. Μικρότερη απόδοση τον δεύτερο χρόνο για (Al, Cu, Cd).	Μέση παροχή: 0,03 L/min	Δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία	Fe, Al, Cu, Si, As, Cd, Cr, Ni, Ti	Προτείνεται η εφαρμογή ενός νέου συστήματος που θα συνδυάζει τρεις δεξαμενές τεχνολογίας DAS	Είναι επιθυμητή η περαιτέρω εφαρμογή του συστήματος.

**Πίνακας 18 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ALD

ΜΕΘΟΔΟΣ ALD								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη παρακολούθησης	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης OAM	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
ALD in Huelva, SW Spain <sup>[27]</sup>	Αύγουστος 2005-Μάϊος 2006	Η μέθοδος είναι πολύ αξιόπιστη. Τα αποτελέσματά της συμφωνούν πλήρως με την εργαστηριακή έρευνα που είχε προηγηθεί.	Η απόδοση της δεξαμενής που είχε το DAS ήταν πάρα πολύ καλή ως προς ορισμένους ρυπαντές (Al κατά 93%, Al κατά 99%, Pb κατά 98%, Cu κατά 95%), μέτρια για κάποιους άλλους (Fe κατά 25%, Cd κατά 14%, Zn κατά 5%) και πολύ μικρή για λίγους μόνο (Mn, Ni, Co). Η απομάκρυνση του Fe από όλο το παθητικό σύστημα ήταν 48%. Δημιουργήθηκε ένα αδιαπέραστο στρώμα από καταβυθίσματα πλούσια σε Al άρα κάποτε θα πρέπει να αντικατασταθεί το υπόστρωμα.	Μέση ροή της OAM: 0,5m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> day	Δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία. Ωστόσο οι 11 μήνες εφαρμογής της μεθόδου σίγουρα δεν επαρκούν για την αξιολόγησή της.	Fe, Al, Cu, Si, Zn, Pb, Cd, Ni, Co.	Υπάρχουν. 1)Χρήση άλλου μίγματος σε δεξαμενή DAS που θα ακολουθεί την πρώτη για να καταβυθίζονται τα δυσθερή μέταλλα. 2)Η OAM να έχει χαμηλότερη συγκέντρωση Al για να καθυστερεί η φραγή των πόρων.	Υπήρχε η αναγκαία τεχνολογική ωριμότητα αφού η μέθοδος των δεξαμενών DAS είχε εφαρμοστεί ήδη και σε άλλες έρευνες

**Πίνακας 18 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ALD

ΜΕΘΟΔΟΣ ALD								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη παρακολούθησης	Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
ALD in Monte Romero mine, SW Spain <sup>[28]</sup>	Απρίλιος 2008- Σεπτέμβριος 2008	Μικρό χρονικό διάστημα εφαρμογής (μόλις 6 μήνες). Δεν μπορεί να κριθεί η αξιοπιστία της. Ωστόσο με τα δεδομένα που υπάρχουν, η μέθοδος δείχνει αξιόπιστη αφού τα αποτελέσματά της συμφωνούν πλήρως με την εργαστηριακή έρευνα που είχε προηγηθεί.	Ο συνδυασμός NFOL και DAS είχε πολύ καλά αποτελέσματα. Ήταν η πρώτη φορά που σε αυτό το ορυχείο απομακρύνθηκαν πλήρως ο Fe και το Al. Επίσης καταβυθίστηκαν πλήρως ο Cu, ο Pb και το As. Ο Zn όμως κατακρατήθηκε μόνο κατά 6%.	Η μέση ροή της ΟΑΜ ήταν 0,025L/min	Δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία.	Εξετάστηκαν κυρίως ο Fe και το Al, και επίσης εξετάστηκαν As, Cu, Zn, Pb, Si, Cd, Mn, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Για μεγαλύτερη απομάκρυνση του Zn (είναι μόλις 6%) προτείνεται η περαιτέρω επεξεργασία του προϊόντος (μετά και την δεύτερη δεξαμενή DAS) σε έναν αντιδραστήρα με τέτοιο υπόστρωμα (όχι το ίδιο της δεξαμενής DAS) ώστε να αυξάνει το pH σε τιμές κατάλληλες για την καταβύθιση του Zn.	Η μέθοδος είχε την απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα. Τα υποσυστήματα που την αποτελούσαν (NFOL, DAS) είχαν εφαρμοστεί και σε άλλες περιπτώσεις.

**Πίνακας 18 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για τη μέθοδο ALD

ΜΕΘΟΔΟΣ ALD								
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ								
Case study	Ετη παρακολούθησης	Αξιολογία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργασόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
ALD in Alabama, USA <sup>[29]</sup>	Ιούνιος 1991- Οκτώβριος 1992	Η μέθοδος είναι αξιόπιστη Εφαρμόστηκε επί τόπου για 17 μήνες και έδωσε τα αναμενόμενα αποτελέσματα σύμφωνα με τις εργαστηριακές εφαρμογές που είχαν προηγηθεί.	Το παθητικό σύστημα κατάφερε να απομακρύνει κατά 90% το Mn, που ήταν και ο κύριος στόχος δημιουργίας του.	Η μέση παροχή για τα προς επεξεργασία νερά αποστράγγισης ήταν 2,8L/min	Δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία ωστόσο οι 17 μήνες που εφαρμόστηκε η μέθοδος είναι ικανός χρόνος για να εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα.	Ο κύριος ρυπαντής που εξετάστηκε ήταν το Mn και δευτερευόντως ο Fe.	Δεν γίνεται κάποια συγκεκριμένη αναφορά	Υπήρχε η απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα καθώς τα υποσυστήματα που την αποτελούσαν (ALD + Αερόβιος υγρότοπος) είχαν εφαρμοστεί και σε άλλες μελέτες.

**Πίνακας 19:** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα οικονομικά κριτήρια για τη μέθοδο ALD

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ALD</b>						
<b>ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Σταθερό Κόστος</b>	<b>Λειτουργικό Κόστος</b>	<b>Κόστος συλλογής &amp; αποθήκευσης επεξεργασμένου αποβλήτου</b>	<b>Κόστος επεξεργασίας αποβλήτου</b>	<b>Κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>
ALD in Mina Esperanza (SW Spain) <sup>[26]</sup>	Μάρτιος 2007-Οκτώβριος 2008 (20 μήνες)	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία
ALD in Huelva, SW Spain <sup>[27]</sup>	Αύγουστος 2005-Μάιος 2006	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία
ALD in Monte Romero mine, SW Spain <sup>[28]</sup>	Απρίλιος 2008-Σεπτέμβριος 2008	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν συγκεκριμένα στοιχεία. Αναφέρεται μόνο ότι είναι μικρό.	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία
ALD in Alabama, USA <sup>[29]</sup>	Ιούνιος 1991-Οκτώβριος 1992	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία

**Πίνακας 20 :** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο ALD

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ALD</b>						
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
ALD in Mina Esperanza (SW Spain) <sup>[26]</sup>	Μάρτιος 2007-Οκτώβριος 2008 (20 μήνες)	Ασφαλής επειδή η μέθοδος έχει υψηλή αποτελεσματικότητας	Αν χρειάζεται, η αποκατάσταση του τοπίου θα είναι κάτι εύκολη καθώς το σύστημα δεν καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια.	Μίγμα από διεσπαρμένο ασβεστόλιθο και ασβεστολιθική ή άμμο καθώς και χοντρό χαλίκι χαλαζία δηλ. υλικά φιλικά προς το περιβάλλον.	Χρησιμοποιείται ενέργεια μόνο από φυσικές πηγές (βαρυτική, βιοχημική).	Είναι μόλις 120m <sup>2</sup> , δηλ. πολύ μικρότερη σε σύγκριση με άλλες μεθόδους. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα.



**Πίνακας 20 (συνέχεια) :** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο ALD

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ALD</b>						
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
ALD in Huelva, SW Spain <sup>[27]</sup>	Αύγουστος 2005-Μάιος 2006	Δεν γίνεται συγκεκριμένη αναφορά για το αν το επεξεργασμένο απόβλητο μπορεί να διατεθεί με ασφάλεια στο περιβάλλον. Όμως αναφέρεται σαφώς ότι οι συγκεντρώσεις κάποιων μετάλλων είναι σε υψηλά επίπεδα (Mn, Ni, Co).	Δεν γίνεται καμία συγκεκριμένη αναφορά.	Χρησιμοποιήθηκαν άμμος ασβεστίτη και ροκανίδια πεύκου για το ασβεστολιθικό υπόστρωμα. Χρησιμοποιήθηκε ακόμα χαλαζίας. Όλα είναι φυσικά υλικά, φιλικά στο περιβάλλον.	Χρησιμοποιούνται μόνο βαρυτική ενέργεια και η χημική ενέργεια των αντιδράσεων, δηλ. η ενέργεια προέρχεται από φυσικές πηγές.	Δεν υπάρχουν στοιχεία για την έκταση της δεξαμενής DAS ή των δεξαμενών αερισμού. Αναφέρεται μόνο ότι ο όγκος της δεξαμενής DAS είναι περίπου 3m <sup>3</sup> και ο όγκος κάθε δεξαμενής αερισμού είναι 6m <sup>3</sup> . Σίγουρα η έκταση όλου του παθητικού συστήματος θα είναι μεγάλη λόγω της ύπαρξης πολλών δεξαμενών.

**Πίνακας 20 (συνέχεια) :** Συνοπτική παρουσίαση των case studies ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια για τη μέθοδο ALD

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ALD</b>						
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Case study</b>	<b>Ετη παρακολούθησης</b>	<b>Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
ALD in Monte mine, Spain <sup>[28]</sup> ALD in Romero SW	Απρίλιος 2008- Σεπτέμβριος 2008	Λόγω της σχεδόν πλήρους απομάκρυνσης των κυριότερων ρυπαντών που επιτυγχάνεται από το σύστημα, το επεξεργασμένο απόβλητο μπορεί να διατεθεί με ασφάλεια στο περιβάλλον.	Δεν γίνεται καμία αναφορά.	Το μίγμα του ασβεστολιθικού υποστρώματος αποτελούνταν από ροκανίδια πεύκου από άμμο ασβεστίτη. Χρησιμοποιήθηκε ακόμα χαλαζίας. Όλα φυσικά υλικά, φιλικά στο περιβάλλον.	Χρησιμοποιούνται μόνο βαρυτική ενέργεια καθώς και η χημική ενέργεια των αντιδράσεων.	Δεν παρουσιάζονται συγκεκριμένα στοιχεία. Το μόνο που αναφέρεται είναι ότι απαιτείται μικρή έκταση γης
ALD in Alabama, USA <sup>[29]</sup>	Ιούνιος 1991- Οκτώβριος 1992	Είναι ασφαλής η διάθεσή τους ως προς το περιεχόμενο Mn. Οι άλλοι ρυπαντές δεν εξετάζονται σε αυτή την πιλοτική εφαρμογή.	Δεν γίνεται καμία αναφορά.	Χρησιμοποιούνται μόνο κόκκοι ασβεστολίθου για τις δεξαμενές ALD και για το υπόστρωμα του υγρότοπου καθώς και μερικά φυτά. Είναι όλα φυσικά υλικά.	Χρησιμοποιείται κυρίως η βιοχημική ενέργεια των βακτηρίων και η χημική ενέργεια των αντιδράσεων. Γίνεται και ελάχιστη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία μιας αντλίας. Επομένως η μέθοδος είναι φιλική στο περιβάλλον από ενεργειακή άποψης.	Δεν γίνεται καμία αναφορά σχετική με την επιφάνεια που καταλαμβάνει το σύστημα.

## Κεφάλαιο 6

### Συμπεράσματα

Οι μέθοδοι που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν πιλοτικά στην επεξεργασία ΟΑΜ και αξιολογήθηκαν ως προς 17 κριτήρια που συμπεριλάμβαναν τεχνολογικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους. Σημειώνεται ότι:

(α) Στην πλειοψηφία των εξεταζομένων περιπτώσεων δεν χρησιμοποιούνται μεμονωμένες μέθοδοι επεξεργασίας αλλά πραγματοποιείται ένας συνδυασμός των ήδη γνωστών μεθόδων με αποτέλεσμα να προκύπτουν υβριδικά συστήματα επεξεργασίας. Πιθανόν αυτό να αποτελέσει στο άμεσο μέλλον μία προοπτική θετικής εξέλιξης στην προσπάθεια εξεύρεσης ικανοποιητικών μεθόδων καταστολής της ΟΑΜ. Συνήθως συνδυάζονται αερόβιοι και αναερόβιοι υγρότοποι ή αερόβιοι υγρότοποι με ενεργά διαπερατά φράγματα ή ανοξικές ασβεστολιθικές τάφροι με τεχνητούς υγροτόπους (συνήθως αερόβιους). Έτσι, η επιστημονική έρευνα δείχνει να στρέφεται προς την κατεύθυνση της εξεύρεσης της καταλληλότερης και αποδοτικότερης σύνθεσης των μεθόδων αυτών, ενώ παράλληλα γίνεται προσπάθεια βελτιστοποίησης των μεμονωμένων υποσυστημάτων<sup>[13, 14, 17-19, 23, 24, 26, 29]</sup>.

(β) Παρ' όλα αυτά, ακόμη και τα υβριδικά συστήματα που αναπτύχθηκαν *ad hoc*, δεν εμφανίζουν επαρκώς ικανοποιητική απόδοση. Για παράδειγμα, η απόδοση της μεθόδου SRB σε όλα τα υβριδικά συστήματα που εξετάστηκαν, μειώνεται σημαντικά στις χαμηλές θερμοκρασίες, στη μέθοδο ΕΔΦ παρατηρείται μειωμένη απόδοση κατά μήκος του ενεργού πληρωτικού υλικού η οποία δεν δύναται βελτίωσης σε συνδυασμό με καμία άλλη μέθοδο, ενώ κατά τη χρήση αναερόβιων υγροτόπων ελαχιστοποιείται η αποδοτικότητα τους όταν η συγκέντρωση των ρυπαντών στο απόβλητο είναι πολύ υψηλή, κυρίως λόγω της αδυναμίας κατανόησης σε βάθος ορισμένων ιδιαίτερων υδρογεωχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη γένεση αλλά και κατά την μετανάστευση της ΟΑΜ<sup>[10, 13-15, 19]</sup>. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα περισσότερα μοντέλα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία να είναι εμπειρικά, αρκετά εξειδικευμένα για την κάθε περίπτωση και συνεπώς είναι δύσκολο να εφαρμοστούν ή να συγκριθούν με άλλη περίπτωση ή, ακόμη, και να γενικευθούν. Η έρευνα των φαινομένων αυτών και των νέων τεχνολογιών είναι σε εξέλιξη με αποτέλεσμα να υπάρχουν στοιχεία ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια για bench scale χωρίς να έχει γίνει ακόμα μετάβαση σε επίπεδο pilot scale.

(γ) Στη χρησιμοποιούμενη βιβλιογραφία, τα αποτελέσματα και η αξιολόγηση που παρουσιάζεται αφορούν κυρίως στην εφαρμοσιμότητα και στα οικονομικά κριτήρια,

ενώ, συνήθως, δεν παρουσιάζονται επαρκή στοιχεία ως προς άλλα κριτήρια (π.χ. τεχνολογικά ή περιβαλλοντικά). Για παράδειγμα, στις μεθόδους SRB δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην εξάρτηση της απόδοσης από τις καιρικές συνθήκες καθώς και στο ότι το επεξεργασμένο απόβλητο δεν πληρούσε πάντα τα όρια ασφαλούς περιβαλλοντικής διάθεσης.

Η μέθοδος SRB (Πίνακας 4 και Πίνακας 21) παρουσιάζει γενικά πολύ καλή απόδοση ως προς πλήθος ανόργανων ρυπαντών και για μεγάλο εύρος ροών ΟΑΜ. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η φιλικότητά της στο περιβάλλον αφού χρησιμοποιεί μόνο φυσικές πρώτες ύλες, ενώ η απαιτούμενη ενέργεια μπορεί να προέλθει από φυσικές/εναλλακτικές πηγές<sup>[10]</sup> (ηλιακή, βιοχημική, κλπ.). Το κόστος της μεθόδου είναι σχετικά μικρότερο από αυτό των ενεργητικών μεθόδων, ενώ το λειτουργικό κόστος είναι σημαντικά χαμηλότερο. Όμως, η αποδοτικότητά της ως προς την απομάκρυνση Fe, As και Mn είναι μικρή, εξαρτώμενη από τις καιρικές συνθήκες (ιδιαίτερα σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοσθεί) καθιστώντας την αξιοπιστία της σχετικά ικανοποιητική. Σημειώνεται ότι υπάρχουν πολλές προοπτικές βελτίωσης οι οποίες δεν απαιτούν παρά μόνο μικρές τεχνολογικές παρεμβάσεις.

Η μέθοδος των ενεργών διαπερατών φραγμάτων (ΕΔΦ) είναι πολύ αποδοτική (Πίνακας 9 και Πίνακας 22) καθώς επιτυγχάνεται περιορισμός σε συγκεντρώσεις ρυπαντών ακόμη και κάτω από τα όρια ανίχνευσης. Η μέθοδος, η οποία είναι φιλική προς το περιβάλλον και επιτρέπει τη χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας<sup>[11, 13-15]</sup> (Πίνακας 11 και Πίνακας 22), εφαρμόστηκε με επιτυχία στην απομάκρυνση τόσο ανόργανων<sup>[13-15]</sup> όσο και οργανικών ρυπαντών<sup>[11, 16]</sup> (εξαιρουμένου του Mn<sup>[13]</sup>). Όμως, η απόδοσή της μειώνεται κατά μήκος του ΕΔΦ καθώς δεν αξιοποιείται όλο το ενεργό μήκος του φράγματος<sup>[14, 15]</sup> (Πίνακας 22). Επίσης, με την πάροδο του χρόνου παρατηρείται μείωση της ενεργού δράσης και της διαπερατότητας του πληρωτικού υλικού λόγω βιολογικής ή χημικής καταβύθισης, γεγονός που οδηγεί στην ανάγκη αναγέννησής του ή αν αυτό δεν είναι εφικτό τότε προτείνεται η ακριβή λύση της αντικατάστασής του. Οι προοπτικές βελτίωσης της μεθόδου αφορούν στην εξεύρεση τρόπων αξιοποίησης όλου του μήκους του ενεργού υλικού.

Η μέθοδος των αναερόβιων υγροτόπων (anaerobic wetlands) είναι πολύ αποτελεσματική στην απομάκρυνση ανόργανων και οργανικών ρυπαντών (Πίνακας 12 και Πίνακας 23). Όμως παρουσιάζει το μειονέκτημα της μειωμένης απόδοσης όταν οι συγκεντρώσεις των ρυπαντών στο προς επεξεργασία απόβλητο είναι πολύ υψηλές. Ένα άλλο αρνητικό στοιχείο της είναι ότι απαιτεί μεγαλύτερες εκτάσεις γης<sup>[17]</sup> σε σχέση με τις

άλλες μεθόδους που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία. Όλα αυτά όμως αντισταθμίζονται από το ότι εμφανίζει το πολύ μεγάλο πλεονέκτημα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους (π.χ. αερόβιοι υγρότοποι ή ΕΔΦ) και να αυξήσει την αποδοτικότητά τους. Καθώς αποτελεί παθητικό σύστημα, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς τις ενεργειακές απαιτήσεις και τη φιλικότητα στο περιβάλλον, αλλά οι μέθοδοι/τεχνολογίες βελτιστοποίησης είναι περιορισμένες και κοστοβόρες.

Η μέθοδος των αερόβιων υγροτόπων (aerobic wetlands) χαρακτηρίζεται από υψηλή απόδοση (Πίνακας 15 και Πίνακας 24) κυρίως στην απομάκρυνση οργανικών ρυπαντών αν και η απόδοσή της επηρεάζεται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες (π.χ. μεταβάλλεται σημαντικά κατά τις περιόδους μεγάλης βροχόπτωσης). Καθώς απομακρύνεται το μεταλλικό φορτίο του ρυπαντή εμφανίζεται ελάττωση του pH, γεγονός που αποτελεί άλλο ένα μειονέκτημα μαζί με τη μεγάλη έκταση γης που συνήθως απαιτεί. Ωστόσο έχει όλα τα πλεονεκτήματα των παθητικών μεθόδων δηλ. χρησιμοποιεί πρώτες ύλες φυσικής προέλευσης και ενέργεια μόνο από φυσικές πηγές, δεν χρειάζεται συνεχή παρακολούθηση και μπορεί να συνδυαστεί με άλλες μεθόδους π.χ. αερόβιοι υγρότοποι ή ΕΔΦ, ώστε να ενισχύσει την απόδοση αυτών. Καθώς, όμως, το λειτουργικό της κόστος είναι εξαιρετικά χαμηλό<sup>[23]</sup> (Πίνακας 24), συγκεντρώνει το ερευνητικό ενδιαφέρον προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η λειτουργικότητά της.

Η μέθοδος των ανοξικών ασβεστολιθικών τάφρων (Anoxic Limestone drains, ALD) (Πίνακας 18 και Πίνακας 25) είναι αρκετά αξιόπιστη και αποδοτική (ιδίως όταν η παροχή της ΟΑΜ δεν είναι πολύ μεγάλη) και εφαρμόζεται κυρίως για την απομάκρυνση ανόργανων ρυπαντών (με μικρότερη απόδοση για το Mn, το Al και το Fe). Τα κυριότερο πλεονέκτημα αυτής είναι οι μικρότερες απαιτήσεις γης σε σχέση με τις μεθόδους των υγροτόπων, ενώ, γενικά, το λειτουργικό της κόστος είναι συγκρίσιμο με αυτό των υγροτόπων. Η μέθοδος είναι αρκετά ευέλικτη και μπορεί να συνδυαστεί με άλλες μεθόδους<sup>[29]</sup> (Πίνακας 25) είτε στην προ-επεξεργασία είτε στην τελική επεξεργασία του αποβλήτου. Οι προοπτικές εξέλιξης της μεθόδου είναι περιορισμένες.

Όπως προκύπτει από την πολυκριτηριακή αξιολόγηση (Πίνακας 26), στο σύνολο των περιπτώσεων που εξετάστηκαν, οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται είναι ως επί το πλείστον φυσικές (π.χ. γεωργοκτηνοτροφικά απορρίμματα). Πέραν της φιλικότητάς τους στο περιβάλλον, καθίσταται δυνατή η αξιοποίηση αποβλήτων/απορριμμάτων μικρού κόστους με σημαντικά, όμως, μειονεκτήματα (α) τη διαθεσιμότητά τους πλησίον του χώρου επεξεργασίας και (β) το μεγάλο εύρος των χρησιμοποιούμενων υλών και του

τοπικού και *ad hoc* χαρακτήρα των μεθόδων επεξεργασίας, τα οποία δεν επιτρέπουν την προτυποποίησή τους ή τη μεταφορά/εφαρμογή τους (και την εκμετάλλευση της αποκτηθείσας εμπειρίας) σε άλλη περιοχή.

Πέραν αυτών, το μικρό σταθερό και λειτουργικό κόστος των υγροτόπων (αερόβιων ή αναερόβιων), καθιστά τις μεθόδους αυτές ως την πρώτη επιλογή για την καταστολή ΟΑΜ, αν και η αποδοτικότητά τους είναι σχετικά χαμηλή, ιδίως στις περιπτώσεις υψηλών συγκεντρώσεων ρυπαντών ή πολύπλοκων μειγμάτων ρυπαντών. Η μέθοδος των ενεργών διαπερατών φραγμάτων παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση για μικρό μήκος φράγματος και θα μπορούσε να συνδυασθεί είτε με υγρότοπο κατάντη είτε με SRB ανάντη (ακόμη και συνδυασμός αυτών) προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η συνολική απόδοση του συστήματος επεξεργασίας και να περιορισθούν τα μειονεκτήματα των μεμονομένων μεθόδων).

Σε μεγάλο ποσοστό των περιπτώσεων υπάρχουν οι προοπτικές βελτίωσης τόσο του υβριδικού συστήματος όσο και των μεμονομένων μεθόδων, όπως αποδείχθηκε όταν έγιναν μικρές παρεμβάσεις κατά την διάρκεια της λειτουργίας των εγκατεστημένων μονάδων. Το γεγονός αυτός καταδεικνύει την κρισιμότητα δύο παραμέτρων: (α) της ανάγκης σωστού τεχνικού σχεδιασμού πριν την εγκατάσταση μιας μονάδος (π.χ. ορθή χωροταξική κατανομή του χρησιμοποιούμενου μηχανολογικού εξοπλισμού) και (β) της ανάγκης ευέλικτου σχεδιασμού της εγκατάστασης, προκειμένου να καθίστανται δυνατές οι μετέπειτα απαιτούμενες παρεμβάσεις.

Σε κάθε έναν από τους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 21, Πίνακας 22, Πίνακας 23, Πίνακας 24, Πίνακας 25) παρουσιάζεται συνοπτικά κάθε μία μέθοδος που αναλύθηκε (από τις πέντε που παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία) ως προς το σύνολο των κριτηρίων (τεχνολογικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά) με βάση τα οποία αξιολογήθηκε.

Τέλος, στον πίνακα 26 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν για όλες τις μεθόδους που εξετάστηκαν ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια. Το ίδιο συμβαίνει για όλες τις μεθόδους ως προς τα οικονομικά κριτήρια στον πίνακα 27 και ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια στον πίνακα 28.

**Πίνακας 21** : Συνοπτική παρουσίαση όλων των case studies της μεθόδου SRB ως προς όλα τα κριτήρια

**ΜΕΘΟΔΟΣ SRB**

<b>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Αξιοπιστία μεθόδου</b>	<b>Αποδοτικότητα μεθόδου</b>	<b>Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ</b>	<b>Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου</b>	<b>Πλήθος ρυπαντών</b>	<b>Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου</b>	<b>Ωριμότητα τεχνολογίας</b>
Σχετική. Τα αποτελέσματα μεταβάλλονται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες (μειωμένη δράση βακτηρίων σε χαμηλές θερμοκρασίες)	Επαρκής απομάκρυνση των περισσότερων ρυπαντών. Μειωμένη απόδοση για το Mn και το Fe. Αποδοτικότητα εξαρτάται και από καιρικές συνθήκες (μειωμένη δράση βακτηρίων σε χαμηλές θερμοκρασίες)	Εφαρμόζεται για μεγάλο εύρος ροών.	Οι μέθοδοι που εξετάστηκαν εφαρμόστηκαν για μεγάλα χρονικά διαστήματα (2-10 χρόνια). Δεν αναφέρεται ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος.	Κυρίως ανόργανοι ρυπαντές (βαρέα και τοξικά μέταλλα π.χ. Fe, Al, Zn, Pb, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Mn, Cd, Cu, S, As)	Υπάρχουν απλοί τρόποι βελτίωσης (μικρές τεχνολογικές παρεμβάσεις)	Συνήθως η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία είναι ήδη γνωστή χωρίς καινοτομίες.

**Πίνακας 21 (συνέχεια)** : Συνοπτική παρουσίαση όλων των case studies της μεθόδου SRB ως προς όλα τα κριτήρια

**ΜΕΘΟΔΟΣ SRB**

<b>ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>				
<b>Σταθερό Κόστος</b>	<b>Λειτουργικό Κόστος</b>	<b>Κόστος συλλογής &amp; αποθήκευσης επεξεργασμένου αποβλήτου</b>	<b>Κόστος επεξεργασίας αποβλήτου</b>	<b>Κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>
Συνήθως είναι υψηλό	Μικρό κόστος συντήρησης	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία. Εξαρτάται από την ποσότητα της παραγόμενης ύλης	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>				
<b>Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
Συνήθως είναι ασφαλής. Προσοχή απαιτείται για Mn, και As που πολλές φορές είναι εκτός ορίων	Συνήθως δεν αναφέρεται αρνητική επίδραση στο φυσικό τοπίο	Είναι μίγμα φυσικών υλικών (π.χ. χαλίκι, πριονίδια, κόπρανα αγελάδων κ.λ.π.)	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία. Συνήθως δεν υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις ενέργειας (παρά μόνο ηλεκτρική για την είσοδο των αποβλήτων στον αντιδραστήρα)	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία. Συνήθως απαιτείται χώρος για την αποθήκευση των τελικών αποβλήτων.



Πίνακας 22 : Συνοπτική παρουσίαση όλων των case studies της μεθόδου ΕΔΦ ως προς όλα τα κριτήρια

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΔΦ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ						
Αξιοπιστία μεθόδου	Αποδοτικότητα μεθόδου	Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ	Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου	Πλήθος ρυπαντών	Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου	Ωριμότητα τεχνολογίας
Η αξιοπιστία επηρεάζεται από το ότι τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες και από το ότι η απόδοση μειώνεται με την πάροδο του χρόνου	Είναι πολύ αποδοτικές (λιγότερο για το Μη). Πολλές φορές η αποδοτικότητα μεταβάλλεται κατά μήκος του ΕΔΦ	Δεν υπάρχουν συγκεκριμένα στοιχεία.	Δεν αναφέρεται ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής. Οι μέθοδοι που εξετάστηκαν εφαρμόστηκαν για διάφορα χρονικά διαστήματα (1-8 χρόνια).	Εφαρμόζονται για οργανικούς και ανόργανους ρυπαντές.	Σε μερικές εφαρμογές δεν υπάρχουν στοιχεία. Σε άλλες, οι βελτιώσεις αναφέρονται σε καλύτερη αξιοποίηση όλου του μήκους του αντιδρώντος υλικού και αποφυγή δημιουργίας καταβυθίσεων ή αν δεν υπάρχει άλλη λύση αντικατάσταση του ενεργού υλικού	Κάποιες από τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν ήταν πρωτοποριακές για την εποχή τους.

**Πίνακας 22 (συνέχεια) :** Συνοπτική παρουσίαση όλων των case studies της μεθόδου ΕΔΦ ως προς όλα τα κριτήρια

**ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΔΦ**

<b>ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>				
<b>Σταθερό Κόστος</b>	<b>Λειτουργικό Κόστος</b>	<b>Κόστος συλλογής &amp; αποθήκευσης επεξεργασμένου αποβλήτου</b>	<b>Κόστος επεξεργασίας αποβλήτου</b>	<b>Κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>
Γενικά είναι χαμηλό Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Γενικά είναι χαμηλό Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>				
<b>Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
Συνήθως είναι ασφαλής αφού οι ρυπαντές απομακρύνονται σε μεγάλα ποσοστά	Δεν υπάρχουν συγκεκριμένες αναφορές.	Για το ενεργό υλικό του ΕΔΦ χρησιμοποιούνται μίγματα από φυσικά υλικά	Απαιτείται μόνο βιοχημική ενέργεια (προέρχεται από τη δράση βακτηρίων).	Δεν υπάρχουν συγκεκριμένα στοιχεία

**Πίνακας 23 :** Συνοπτική παρουσίαση όλων των case studies της μεθόδου των αναερόβιων υγροβιότοπων ως προς όλα τα κριτήρια

**ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ**

<b>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Αξιοπιστία μεθόδου</b>	<b>Αποδοτικότητα μεθόδου</b>	<b>Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ</b>	<b>Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου</b>	<b>Πλήθος ρυπαντών</b>	<b>Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου</b>	<b>Ωριμότητα τεχνολογίας</b>
Είναι αρκετά αξιόπιστες. Προσοχή: τα αποτελέσματά τους εξαρτώνται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες (μεγάλη εξάρτηση από την βροχόπτωση).	Επιτυγχάνεται σημαντική μείωση σχεδόν όλων των ρυπαντών (ιδιαίτερα των οργανικών). Οι μέθοδοι δεν είναι τόσο αποδοτικές όταν οι συγκεντρώσεις των ρυπαντών είναι πολύ υψηλές.	Οι μέθοδοι εφαρμόζονται για μεγάλο εύρος ροών ΟΑΜ	Δεν αναφέρεται ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής. Οι μέθοδοι που εξετάστηκαν εφαρμόστηκαν για διάφορα χρονικά διαστήματα (2-6 χρόνια).	Χρησιμοποιούνται τόσο για οργανικούς όσο και για ανόργανους ρυπαντές	Οι μέθοδοι βελτίωσης που προτείνονται είναι περιορισμένες και κάποιες φορές ακριβές (π.χ. αντικατάσταση του ασβεστολιθικού υποστρώματος).	Όλα τα υποσυστήματα που αποτελούν το συνολικό σύστημα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρύτατα. Σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχουν ιδιαιτερότητες στον υπολογισμό του μεγέθους των υγροτόπων.

**Πίνακας 23 (συνέχεια)** : Συνοπτική παρουσίαση όλων των case studies της μεθόδου των αναερόβιων υγροβιότοπων ως προς όλα τα κριτήρια

**ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ**

<b>ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>				
<b>Σταθερό Κόστος</b>	<b>Λειτουργικό Κόστος</b>	<b>Κόστος συλλογής &amp; αποθήκευσης επεξεργασμένου αποβλήτου</b>	<b>Κόστος επεξεργασίας αποβλήτου</b>	<b>Κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>
Γενικά είναι χαμηλό Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Γενικά είναι χαμηλό Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>				
<b>Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
Σε άλλες περιπτώσεις είναι ασφαλής και σε άλλες όχι (ανάλογα με το αν έχουν απομακρυνθεί οι ρυπαντές σε ικανοποιητικό ποσοστό). Όμως η απόδοση είναι περιορισμένη όταν τα αρχικά απόβλητα έχουν υψηλές συγκεντρώσεις ρυπαντών.	Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν γίνονται συγκεκριμένες αναφορές.	Σε όλες τις περιπτώσεις το υπόστρωμα του υγρότοπου ήταν μίγμα φυσικών υλικών (π.χ. χαλίκια, άχυρο) και η βλάστηση ήταν από φυτά της εκάστοτε περιοχής.	Χρησιμοποιούνται μόνο φυσικές πηγές ενέργειας (βαρυτική, βιοχημική).	Στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, ο αναερόβιος υγρότοπος συνδυάζεται και με άλλα συστήματα. Επομένως δεν μπορεί να αξιολογηθεί η έκταση μόνο αυτού του υγρότοπου.

**Πίνακας 24** : Συνοπτική παρουσίαση όλων των case studies της μεθόδου των αερόβιων υγροβιότοπων ως προς όλα τα κριτήρια

**ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ**

<b>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Αξιοπιστία μεθόδου</b>	<b>Αποδοτικότητα μεθόδου</b>	<b>Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ</b>	<b>Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου</b>	<b>Πλήθος ρυπαντών</b>	<b>Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου</b>	<b>Ωριμότητα τεχνολογίας</b>
Υπήρχε πάντα σχετική αξιοπιστία. Σε όλες τις περιπτώσεις τα αποτελέσματα είχαν άμεση εξάρτηση από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες.	Η απόδοση της μεθόδου ήταν πολύ καλή σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από μία όπου η σύσταση της τελικής απορροής ήταν εκτός ορίων ασφαλούς διάθεσης.	Οι περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν λειτουργούσαν σε μεγάλο εύρος ροών.	Δεν αναφέρεται ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για να εφαρμοστεί η μέθοδος. Στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν ο χρόνος παρακολούθησης ποικίλλει από λίγους μήνες έως και 6 χρόνια.	Στις περισσότερες περιπτώσεις, η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για απομάκρυνση οργανικών ρυπαντών.	Προτάσεις βελτίωσης υπάρχουν (π.χ. αύξηση χρόνου παραμονής στον υγρότοπο, αλλαγή υλικού του υποστρώματος) αλλά όχι για όλες τις μεθόδους. Πρέπει να αντιμετωπισθεί η μειωμένη απόδοση όταν το αρχικό απόβλητο έχει υψηλές συγκεντρώσεις ρυπαντών.	Στις περισσότερες περιπτώσεις υπήρχε τεχνολογική ωριμότητα

**Πίνακας 24 (συνέχεια):** Συνοπτική παρουσίαση όλων των case studies της μεθόδου των αερόβιων υγροβιότοπων ως προς όλα τα κριτήρια

**ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΕΡΟΒΙΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ**

<b>ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>				
<b>Σταθερό Κόστος</b>	<b>Λειτουργικό Κόστος</b>	<b>Κόστος συλλογής &amp; αποθήκευσης επεξεργασμένου αποβλήτου</b>	<b>Κόστος επεξεργασίας αποβλήτου</b>	<b>Κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>
Γενικά είναι χαμηλό Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Γενικά είναι πολύ χαμηλό Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>				
<b>Διάθεση αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
Σε άλλες περιπτώσεις δεν γίνεται καμία αναφορά για το αν καλύπτονται τα περιβαλλοντικά όρια και αλλού η σύσταση της τελικής απορροής δεν πληροί τα όρια ασφαλούς διάθεσης	Δεν υπάρχουν συγκεκριμένες αναφορές.	Παντού χρησιμοποιήθηκαν μόνο φυσικά υλικά.	Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνταν μόνο βαρυτική και βιοχημική ενέργεια. Σε ορισμένες περιπτώσεις μόνο χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρική ενέργεια για την λειτουργία των αντλιών.	Σε όλες τις περιπτώσεις ο αερόβιος υγρότοπος συνδυάστηκε και με άλλα συστήματα. Δεν αναφέρονται ακριβή στοιχεία για την συνολική έκταση κάθε εξεταζόμενης περίπτωσης.

**Πίνακας 25 :** Συνοπτική παρουσίαση όλων των case studies της μεθόδου των ανοξικών ασβεστολιθικών τάφρων (ALD) ως προς όλα τα κριτήρια

**ΜΕΘΟΔΟΣ ALD**

<b>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Αξιοπιστία μεθόδου</b>	<b>Αποδοτικότητα μεθόδου</b>	<b>Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ</b>	<b>Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου</b>	<b>Πλήθος ρυπαντών</b>	<b>Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου</b>	<b>Ωριμότητα τεχνολογίας</b>
Οι μέθοδοι είναι αξιόπιστες αφού επαληθεύουν τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ερευνών που έχουν προηγηθεί	Η απόδοση κάθε μεθόδου ήταν πολύ καλή (ιδίως όταν η εισερχόμενη ροή δεν ήταν πολύ μεγάλη) ως προς τους περισσότερους ρυπαντές που εξετάζονταν οι οποίοι ήταν κυρίως ανόργανοι ρυπαντές.	Οι περισσότερες μέθοδοι λειτουργούσαν αποδοτικά όταν η μέση εισερχόμενη ροή δεν ήταν πολύ μεγάλη.	Δεν αναφέρεται ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για να εφαρμοστεί η μέθοδος. Στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν ο χρόνος παρακολούθησης ποικίλλει από 6 μήνες έως και 2 χρόνια.	Εφαρμόζονται κυρίως για κατεργασία ανόργανων ρυπαντών (βαρέα και τοξικά μέταλλα π.χ. Fe, Al, Zn, Pb, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Mn, Cd, Cu, Si, As)	Προτάσεις βελτίωσης υπάρχουν (π.χ. συνδυασμός πιο πολλών δεξαμενών DAS) για τις περισσότερες μεθόδους. Πρέπει να αντιμετωπισθεί η μειωμένη απόδοση όταν το αρχικό απόβλητο έχει υψηλές συγκεντρώσεις ρυπαντών ή μεγάλη παροχή.	Όλες οι μέθοδοι είχαν την απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα.

**Πίνακας 25 (συνέχεια)** : Συνοπτική παρουσίαση όλων των case studies της μεθόδου των ανοξικών ασβεστολιθικών τάφρων (ALD) ως προς όλα τα κριτήρια

**ΜΕΘΟΔΟΣ ALD**

<b>ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>				
<b>Σταθερό Κόστος</b>	<b>Λειτουργικό Κόστος</b>	<b>Κόστος συλλογής &amp; αποθήκευσης επεξεργασμένου αποβλήτου</b>	<b>Κόστος επεξεργασίας αποβλήτου</b>	<b>Κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>
Γενικά είναι χαμηλό Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Γενικά είναι χαμηλό Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία
<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>				
<b>Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ασφαλής αφού οι ρυπαντές απομακρύνονται σε μεγάλα ποσοστά. Σε λίγες περιπτώσεις δεν γίνεται σαφής αναφορά.	Δεν υπάρχουν συγκεκριμένες αναφορές.	Χρησιμοποιούνται μίγματα από φυσικά υλικά (π.χ. ασβεστόλιθος, ροκανίδια πεύκου)	Απαιτείται μόνο βιοχημική ενέργεια (προέρχεται από τη δράση βακτηρίων) ή χημική ενέργεια από τις αντιδράσεις που πραγματοποιούνται.	Στις πιο πολλές περιπτώσεις δεν υπάρχουν συγκεκριμένα στοιχεία. Σε ελάχιστες μεθόδους αναφέρεται μόνο ότι απαιτείται μικρή έκταση γης.



**Πίνακας 26 :** Συνοπτική παρουσίαση όλων των μεθόδων ως προς τα τεχνολογικά κριτήρια  
**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ**

<b>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ</b>						
<b>Αξιοπιστία μεθόδου</b>	<b>Αποδοτικότητα μεθόδου</b>	<b>Ελάχιστη, Μέση, Μέγιστη Παροχή Επεξεργαζόμενης ΟΑΜ</b>	<b>Απαιτούμενος Χρόνος Εφαρμογής Μεθόδου</b>	<b>Πλήθος ρυπαντών</b>	<b>Προοπτικές ανάπτυξης/βελτίωσης μεθόδου</b>	<b>Ωριμότητα τεχνολογίας</b>
<p>Η πλειοψηφία των μεθόδων εμφανίζει καλή αξιοπιστία (συνήθως επιβεβαιώνονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών εφαρμογών). Κάποιες φορές η αξιοπιστία είναι σχετική αφού η όλη λειτουργία του συστήματος εξαρτάται από εξωγενείς και γι' αυτό μεταβαλλόμενους παράγοντες (π.χ. καιρικές συνθήκες)</p>	<p>Οι περισσότερες μέθοδοι έχουν ικανοποιητική απόδοση. Σε μερικές η απόδοση εξαρτάται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες (π.χ. στην SRB μειώνεται στις χαμηλές θερμοκρασίες) ενώ σε άλλες μειώνεται με το χρόνο λόγω παθητικοποίησης του συστήματος (π.χ. μέθοδος υγρότοπων). Επίσης η αποδοτικότητα διαφέρει και ως προς το είδος του ρυπαντή (π.χ. η SRB έχει χαμηλή απόδοση για Mn, Fe, As και η ALD έχει μειωμένη απόδοση για υψηλές αρχικές συγκεντρώσεις Fe και Al)</p>	<p>Πολύ καλή απόδοση για μεγάλο εύρος ροών έχει η μέθοδος των SRB αντιδραστήρων και η μέθοδος των αναερόβιων υγροτόπων ενώ η ALD έχει αποδοτική λειτουργία σε μικρότερα εύρη ροών.</p>	<p>Δεν αναφέρεται ο ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής για καμία μέθοδο. Είναι βέβαιο όμως ότι τα ΕΔΦ σχεδιάζονται ώστε να λειτουργήσουν αποδοτικά για δεκαετίες.</p>	<p>Όλες οι μέθοδοι αντιμετωπίζουν καλά ανόργανους ρυπαντές. Η μέθοδος ΕΔΦ και οι υγρότοποι (αερόβιοι και αναερόβιοι) εφαρμόζονται αποτελεσματικά και σε οργανικούς ρυπαντές.</p>	<p>Σε όλες τις μεθόδους υπάρχουν προοπτικές βελτίωσης που αφορούν συνήθως μικρές τεχνολογικές παρεμβάσεις ή χρήση και άλλων υλικών σαν υποστρώματα. Όλες οι βελτιώσεις στοχεύουν στο να αξιοποιήσουν όλη την ποσότητα του υλικού που αντιδρά και να μειώσουν το φαινόμενο της φραγής των πόρων του ενεργού υλικού.</p>	<p>Στην πλειοψηφία των μεθόδων υπάρχει η απαιτούμενη τεχνολογική ωριμότητα καθώς όλες οι μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια.</p>

**Πίνακας 27 :** Συνοπτική παρουσίαση όλων των μεθόδων ως προς τα οικονομικά κριτήρια

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ  
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ**

<b>Σταθερό Κόστος</b>	<b>Λειτουργικό Κόστος</b>	<b>Κόστος συλλογής &amp; αποθήκευσης επεξεργασμένου αποβλήτου</b>	<b>Κόστος επεξεργασίας αποβλήτου</b>	<b>Κόστος αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>
Για τις περισσότερες μεθόδους δεν διατίθενται ακριβή οικονομικά στοιχεία. Φαίνεται όμως ότι είναι υψηλότερο για τη μέθοδο των SRB αντιδραστήρων.	Σε όλες τις μεθόδους είναι χαμηλό (αφού είναι παθητικές). Δεν υπάρχουν για όλες ακριβή στοιχεία φαίνεται όμως ότι για τη μέθοδο των SRB αντιδραστήρων είναι πολύ χαμηλό.	Σε όλες τις μεθόδους είναι χαμηλό αλλά εξαρτάται από την ποσότητα της παραγόμενης ιλύος. Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Σε όλες τις μεθόδους είναι χαμηλό αλλά εξαρτάται βέβαια από την ποσότητα της παραγόμενης ιλύος. Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία	Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία για καμία μέθοδο.

**Πίνακας 28 :** Συνοπτική παρουσίαση όλων των μεθόδων ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ**

**ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ**

<b>Διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων</b>	<b>Δυνατότητα αποκατάστασης φυσικού τοπίου</b>	<b>Χρήση πρώτων υλών</b>	<b>Ενεργειακές Απαιτήσεις</b>	<b>Απαιτήσεις γης</b>
Στις περισσότερες μεθόδους η διάθεση επεξεργασμένων αποβλήτων στο περιβάλλον είναι ασφαλής αφού συνήθως υπάρχει καλή απόδοση και επομένως απομακρύνονται σε ικανοποιητικό βαθμό οι κυριότεροι ρυπαντές.	Για καμία μέθοδο δεν αναφέρονται συγκεκριμένα στοιχεία.	Όλες οι μέθοδοι χρησιμοποιούν φυσικά υλικά (π.χ. ασβεστόλιθο, άμμο, ροκανίδια πεύκου, αγροκτηνοτροφικά απορρίμματα κ.λ.π.)	Όλες οι εξεταζόμενοι μέθοδοι είναι παθητικές. Επομένως χρησιμοποιούν ενέργεια μόνο από φυσικές πηγές (π.χ. βαρυτική, βακτηριακή κ.λ.π.).	Για καμία μέθοδο δεν αναφέρονται συγκεκριμένα στοιχεία. Τις μεγαλύτερες απαιτήσεις γης τις έχουν πρώτα οι αναερόβιοι και ακολουθούν οι αερόβιοι υγρότοποι.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Κοντόπουλος Α, «Σημειώσεις Περιβαλλοντικής Υδατικής Χημείας», 1997
- 2) Κορνίτας Κ.-Ξενίδης Α., «ΟΑΜ Δημιουργία-Επιπτώσεις και Τεχνικές Αντιμετώπισης σε μεταλλεία Μικτών Θειούχων», Τεχν. Χρον. Επιστ., 1&2 (2001) 19-36
- 3) Κούρτης Απ., «Υγρά απόβλητα στη Βιομηχανία Αξιοποίησης Ορυκτών Υλών και Υλικών», διαθέσιμο στο [http:// www.metal.ntua.gr/uploads/2095/Ygra\\_Apovlita\\_Presentation2.ppt](http://www.metal.ntua.gr/uploads/2095/Ygra_Apovlita_Presentation2.ppt)
- 4) Κουμπάρης Μ., Μέγκουλας Ν., «Πειραματικός σχεδιασμός για τον έλεγχο ανθεκτικότητας αναλυτικών μεθόδων», Εργαστήριο Αναλυτικής Χημείας, Τμήμα Χημείας Παν/μίου Αθηνών, διαθέσιμο στο <http://www.chem.uoa.gr/courses/chemometrics>
- 5) Buttner Hannes, «International Federation of Clinical Chemistry (IFCC) and reference methods», Pure & Applied Chemistry 45 (1976) 70-71
- 6) Esther Trullols Soler, «Validation of Qualitative Analytical Methods», doctoral thesis, University Povera I Virgili, (2006) 26
- 7) Taverniers I., Bockstaele Erik, Loose de Mark, «Trends in quality in the analytical laboratory. I. Traceability and measurement uncertainty of analytical results», Trends in Analytical Chemistry 23 (2004) 481
- 8) <http://www.investopedia.com/terms>
- 9) <http://www.businessdictionary.com/definition>
- 10) Doshi Sheela, «Bioremediation of Acid Mine Drainage Using Sulfate-Reducing Bacteria», National Network of Environmental Management Studies Fellow University of Indiana, (2006) 13-29, διαθέσιμο στην διεύθυνση <http://www.epa.gov>
- 11) Muchitsch N., Nooten T., Bastiaens L., Kjeldsen P., «Integrated evaluation of the performance of a more than seven year old permeable reactive barrier at a site contaminated with chlorinated aliphatic hydrocarbons (CAHs)», Journal of Contaminant Hydrology 126 (2011), 258-270.
- 12) Roehl K., Czurda K., Meggyes T., Simon F., Stewart D., «Long-term Performance of Permeable reactive barriers», Elsevier (2005) 1-14.

- 13) Javris A., Moustafa M., Orme P., Younger P., «Effective remediation of grossly polluted acidic, and metal-rich, spoil heap drainage using a novel, low cost, permeable reactive barrier in Northumberland, UK», *Environmental Pollution* 143 (2006) 261-268
- 14) Gibert O., Rotting T., Cortina J., Pablo J., Ayora C., Carrera J., Bolzicco J., «In-situ remediation of acid mine drainage using a permeable reactive barrier in Aznalcollar (Sw Spain)», *Journal of Hazardous Materials* 191 (2011) 287-295
- 15) Ludwig R., McGregor R., Blowes D., Benner S., Mountjoy K., «A Permeable Reactive Barrier for Treatment of Heavy Metals», *Ground Water* 40 (2002) 59-66
- 16) Vesela L., Nemecek J., Siglova M., Kubal M., «The biofiltration permeable reactive barrier: Practical Experience from Synthesia», *International Biodeterioration & Biodegradation* 58 (2006) 224-230
- 17) Matthies R., Andrew A., Javris A., «Performance of a passive treatment system for net-acidic coal mine drainage over five years of operation», *Science of the Total Environment* 408 (2010) 4877-4885.
- 18) Barros P., Ruiz I., Manuel S., «Performance of an anaerobic digester-constructed wetland system for a small community», *Ecological Engineering* 33 (2008) 142-149.
- 19) Ruiz I., Diaz M., Crujeiras B., Garcia J., Soto M., «Solids hydrolysis and accumulation in a hybrid anaerobic digester-constructed wetlands system», *Ecological Engineering* 36 (2010) 1007-1016
- 20) Hasche A., Wolkersdorfer C., «Mine Water Treatment with a Pilot Scale RAPS-System», *Wissenschaftliche Mitteilungen* 25 (2004) 93-99
- 21) Chen Z., Wu S., Braeckevelt M., Paschke H., Kastner M., Koser H., Kusch P., «Effect of vegetation in pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands treating sulphate rich groundwater contaminated with a low and high chlorinated hydrocarbon», *Chemosphere* 89 (2012) 724-731
- 22) Wu S., Chen Z., Braeckevelt M., Seeger E., Dong R., Kastner M., Paschke H., Hahn A., Kayser G., Kusch P., «Dynamics of Fe(II) sulphur and phosphate in pilot-scale constructed wetlands treating a sulphate-rich chlorinated hydrocarbon contaminated groundwater», *Water Research* 46 (2012) 1923-1932

- 23) Herouvim E., Akkratos Chr., Tekerlekopoulou A., Vayenas D., «Treatment of olive mill wastewater in pilot-scale vertical flow constructed wetlands», *Ecological Engineering* 37 (2011) 931-939
- 24) Dzakpasu M., Scholz M., Harrington R., Jordan S., McCarthy V., «Characterising infiltration and contaminant migration beneath earthen-lined integrated constructed wetlands», *Ecological Engineering* 41 (2012) 41-51
- 25) Lazareva Ol., Pichler T., «Long-term performance of a constructed wetland/filter basin system treating wastewater, Central Florida», *Chemical Geology* 269 (2010) 137-152
- 26) Caraballo M., Macias F., Rotting T., Nieto J., Ayora C., «Long term remediation of highly polluted acid mine drainage: A sustainable approach to restore the environmental quality of the Odiel river basin», *Environmental Pollution* 159 (2011) 3613-3619
- 27) Rotting T., Caraballo M., Serrano J., Ayora C., Carrera J., «Field application of calcite Dispersed Alkaline Substrate (calcite-DAS) for passive treatment of acid mine drainage with high Al and metal concentrations», *Applied Geochemistry* 23 (2008) 1660-1674
- 28) Macias F., Caraballo M., Nieto J., Rotting T., Ayora C., «Natural pretreatment and passive remediation of highly polluted acid mine drainage», *Journal of Environmental Management*, 104 (2012) 93-100
- 29) Thorton F., «Manganese removal from water using limestone-filled tanks», *Ecological Engineering* 4 (1995) 11-18