

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ ΜΟΛΥΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ:

ΔΗΜΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΚΡΙΜΗΤΣΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΜΗΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΚΑΘΡΕΠΤΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια βιβλιογραφική διερεύνηση των διαθέσιμων τεχνολογιών για την απορρύπανση των ρυπασμένων εδαφών.

Η υποβάθμιση του περιβάλλοντος αποτελεί ένα φαινόμενο που μαστίζει τη σύγχρονη κοινωνία εξ' αιτίας της ραγδαίας εξέλιξης της τεχνολογίας, της έντονης αστικής ανάπτυξης καθώς και την επέκταση της βιομηχανικής δραστηριότητας. Η ευρωπαϊκή ένωση θέτει συνεχώς οδηγίες για την προστασία του περιβάλλοντος αλλά και την αποκατάσταση του στοχεύοντας σε μια βιώσιμη ανάπτυξη. Ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα αποτελεί η μόλυνση του εδάφους καθώς αποτελεί ένα από τους σημαντικότερους παράγοντες για τη ζωή. Πάνω στο έδαφος λαμβάνουν χώρα πολλές λειτουργίες οι οποίες εξυπηρετούν τους ανθρώπους αλλά ταυτόχρονα το επιβαρύνουν σε τέτοιο βαθμό ώστε να ρυπαίνεται.

Το έντονο προσωπικό ενδιαφέρον για την αποκατάσταση του ρυπασμένου εδάφους με ώθησε στην επιλογή αυτού του θέματος διερευνώντας τι τεχνολογίες υπάρχουν για την αποκατάσταση του ρυπασμένου εδάφους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια να μελετηθούν και να αναλυθούν οι τεχνολογίες απορρύπανσης ρυπασμένων εδαφών μέσω μιας ολοκληρωμένης βιβλιογραφικής διερεύνησης. Το διαδίκτυο αποτέλεσε επίσης ένα σημαντικό αρωγό για την εκπόνηση της εργασίας.

Αρχικά, παρουσιάζεται ένα θεωρητικό υπόβαθρο αναλύονται κάποιες έννοιες και ορισμοί για παράδειγμα τι είναι έδαφος και εδαφική ρύπανση. Διερευνώνται οι κυριότερες πηγές εδαφικής ρύπανσης όπου διαπιστώνεται ότι η ανθρώπινη δραστηριότητα πάνω στο έδαφος είναι αυτή που επιβαρύνει το έδαφος. Έπειτα, μελετώνται οι επιπτώσεις της εδαφικής ρύπανσης αλλά και οι γνώσεις των ευρωπαίων πολιτών περί του θέματος μέσω έρευνας που διεξήγαγε η Ευρωπαϊκή Ένωση. Το θεσμικό πλαίσιο που διέπει το θέμα που μελετάται δεν θα μπορούσε να παραληφθεί, όπως και η πολιτική που ακολουθείται για το έδαφος.

Στη συνέχεια, κατηγοριοποιούνται οι διαθέσιμες τεχνολογίες απορρύπανσης ρυπασμένων εδαφών στις κατηγορίες «Κυριότερες μέθοδοι, Μέθοδοι περιορισμού επέκτασης ρύπανσης και μέθοδοι απορρύπανσης ακόρεστης ζώνης». Σε κάθε κατηγορία αναπτύσσεται μια ποικιλία μεθόδων και τεχνολογιών που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική διερεύνηση.

Αναλύονται επίσης κάποια κριτήρια τα οποία θα μπορούσαν να αποτελέσουν πολύτιμο αρωγό για την επιλογή της βέλτιστης τεχνολογίας ανάλογα με την κάθε περίπτωση. Τέλος προτείνεται μια στρατηγική για την αειφορική αποκατάσταση του εδάφους η οποία θα μπορούσε να αποτελεί ένα οδηγό πρότυπο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1. Έδαφος.....	7
1.1 Έδαφος και η σημασία του.....	7
1.2 Εδαφική ρύπανση και πηγές ρύπανσης.....	8
1.2.1 Η εντοπισμένη εδαφική ρύπανση	13
1.2.2 Διάχυτη εδαφική ρύπανση.....	14
1.2.3 Επιπτώσεις εδαφική ρύπανσης.....	16
1.2.4 Αποδεκτά όρια ρύπανσης εδάφους.....	18
1.2.5 Λόγοι απόφασης αποκατάστασης εδάφους.....	20
1.3 Θεσμικό πλαίσιο και Πολιτικές για το έδαφος	21
Θεσμικά πλαίσια	21
Η κοινοτική πολιτική για την προστασία του εδάφους	23
Η πολιτική περιβάλλοντος.....	23
Η πολιτική μεταφορών.....	25
Πολιτική έρευνας.....	25
2. Τεχνολογίες απορρύπανσης ρυπασμένων εδαφών	28
2.1 Κυριότερες μέθοδοι απορρύπανσης.....	29
2.1.1 Φωτοεξυγίανση	29
2.1.2 Μέθοδος άντλησης και απορρύπανσης διαλυμένων ρυπαντών (pumpand treat).....	42
2.1.3 Αεροδιαχωρισμός (airstripping)	44
2.1.4 Βιολογική αποκατάσταση (bio-remediation)	45
2.1.5 Μέθοδος άντλησης επιπλεόντων ρυπαντών	48
2.1.6 Αφαίρεση βαρέων μετάλλων με εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος.....	50
2.1.7 Φυσική εξασθένησης της ρύπανσης	51
2.1.8 Διαπερατά αντιδραστικά διαφράγματα	51
2.1.9 Αεροδιασπορά (airsparging).....	53
2.2 Μέθοδοι περιορισμού επέκτασης ρύπανσης	56

2.2.1 Μέθοδοι εγκιβωτισμού (διαφράγματα)	56
2.2.2 Υδραυλικές μέθοδοι αναστροφής της κίνησης του υπόγειου νερού	60
2.2.3 Μέθοδος σταθεροποίησης του εδάφους (soilstabilization, solidification)	61
2.3 Μέθοδοι απορρύπανσης ακόρεστης ζώνης εδάφους	66
2.3.1 Μέθοδοι βιολογικής απορρύπανσης	67
2.3.2 Θερμική επεξεργασία εδάφους	68
2.3.3 Χημική επεξεργασία	69
2.3.4 Έκπλυση εδάφους	70
2.3.5 Εκσκαφή εδάφους	77
2.3.6 Εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	78
3. Κριτήρια επιλογής τεχνολογιών απορρύπανσης ρυπασμένων εδαφών	79
4. Στρατηγική για την αειφορική αποκατάσταση των εδαφών	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	83
Ελληνική.....	83
Ξενόγλωσση.....	84
ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ.....	84

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την ανάγκη για κοινωνική ευημερία όλο και περισσότερο εκμεταλλεύονται οι φυσικοί πόροι. Ένας από αυτούς του πόρους αποτελεί και το έδαφος το οποίο έχει ένα πολυδιάστατο και πολυλειτουργικό χαρακτήρα. Όλες οι χρήσεις γης λαμβάνουν χώρα πάνω στο έδαφος επιβαρύνοντάς το και προκαλώντας αρνητικές επιπτώσεις. Μια από τις σημαντικότερες αρνητικές επιπτώσεις είναι η αύξηση της ποσότητας των ρύπων που εντοπίζονται στο έδαφος προκαλώντας εδαφική ρύπανση και φυσικά ρύπανση των υπόγειων υδάτων.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας αποτέλεσε πολύτιμο αρωγό για την αποκατάσταση εδαφική ρύπανση προσφέροντας μια μεγάλη ποικιλία τεχνολογιών απορρύπανσης εδάφους ανάλογα με την έκταση της ρύπανσης, το είδος του ρυπαντή και άλλους παράγοντες. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η βιβλιογραφική διερεύνηση των διαθέσιμων τεχνολογιών απορρύπανσης ρυπασμένου εδάφους.

Στο πρώτο κεφάλαιο, αποτελεί ένα θεωρητικό υπόβαθρο για την εργασία αναλύοντας τις έννοιες «έδαφος» και «εδαφική ρύπανση». Αναφέρονται επίσης οι κύριες πηγές ρύπανσης του εδάφους και συνεπώς του υδροφόρου ορίζοντα καθώς και οι επιπτώσεις που προκαλούνται από την ρύπανση του εδάφους. Εν συνεχεία, γίνεται μια σύντομη αναφορά σχετικά με τις γνώσεις ευρωπαίων πολιτών και φορέων για τις επιπτώσεις που προκαλούνται από τη ρύπανση του εδάφους. Μελετάται επίσης η σημασία του εδάφους, η πολιτική που ακολουθείται γι' αυτό καθώς και το θεσμικό πλαίσιο που το διέπει.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναπτύσσονται οι τεχνολογίες απορρύπανσης ρυπασμένων εδαφών οι οποίες έχουν κατηγοριοποιηθεί ως προς τις κυριότερες μεθόδους απορρύπανσης, τις μεθόδους περιορισμού επέκτασης της ρύπανσης και τις μεθόδους απορρύπανσης ακόρεστης ζώνης.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύονται κάποια κριτήρια για τη βέλτιστη επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας απορρύπανσης που προέκυψαν ύστερα από βιβλιογραφική διερεύνηση.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο προτείνεται μια στρατηγική ή μια πορεία για την αειφορική αποκατάσταση των εδαφών. Προτείνονται δηλαδή κάποια βασικά βήματα τα οποία πρέπει να ακολουθηθούν ώστε επιτευχθεί ο στόχος της βιώσιμης αποκατάστασης του εδάφους.

1. Έδαφος

1.1 Έδαφος και η σημασία του

Το έδαφος αποτελεί ένα μη ανανεώσιμο και ζωτικό πόρο. Η έννοια του εδάφους ορίζεται σύμφωνα με τον ορισμό του Διεθνούς Οργανισμού Προτύπων (ISO) ως το ανώτατο στρώμα του φλοιού της Γης. Αποτελείται από ανόργανα και οργανικά συστατικά, νερό, αέρα και έμβιους οργανισμούς.¹ Το έδαφος αποτελεί τη διεπαφή μεταξύ της γης (γεώσφαιρας), του



Εικόνα 1.1, Το έδαφος και η σημασία του, πηγή: <http://www.greenbelt.gr/gr/solutions.php?action=view&id=24>, επίσκεψη 01/09/2011

αέρα (ατμόσφαιρας) και του νερού (υδρόσφαιρας). Πάνω στο έδαφος λαμβάνουν χώρα πολυάριθμες λειτουργίες καθοριστικής σημασίας για τη ζωή, όπως περιβαλλοντικές, οικονομικές, κοινωνικές και πολιτιστικές. Μερικές από τις σημαντικότερες λειτουργίες είναι οι ακόλουθες:

1. Πηγή πρώτων υλών, παραγωγή τροφίμων και άλλων γεωργικών προϊόντων
2. Στο έδαφος αποθηκεύονται και εν μέρει μετατρέπονται ανόργανα και οργανικά συστατικά, το νερό, η ενέργεια καθώς και διάφορες χημικές ουσίες. Το έδαφος λειτουργεί ως φυσικός ηθμός για τα υπόγεια ύδατα, που είναι η κύρια πηγή πόσιμου νερού, ενώ παράλληλα εκλύει CO₂, μεθάνιο και άλλα αέρια στην ατμόσφαιρα.
3. Οικολογική λειτουργίας καθώς το έδαφος αποτελεί το οικολογικό ενδιαίτημα για πολυποίκιλους οργανισμούς που διαβιούν στο εσωτερικό ή την επιφάνειά του και έχουν μοναδικούς γενετικούς συνδυασμούς.
4. Το έδαφος αποτελεί το υπόστρωμα κάθε ανθρώπινης δραστηριότητας ενώ ταυτόχρονα είναι στοιχείο του τοπίου και της πολιτιστικής κληρονομιάς.

Γνωρίζοντας την πολυλειτουργικότητα του εδάφους γίνεται εύκολα κατανοητό πόσο σημαντική είναι η προστασία του καθώς είναι κατά βάση ένας μη ανανεώσιμος πόρος που μπορεί να υποβαθμιστεί ταχέως ενώ η δημιουργία και η ανανέωσή του

¹Διεθνούς Οργανισμού Προτύπων (ISO) στο ISO 11074-1 της 1.08.1996

είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες. Κατά συνέπεια, η πρόληψη, η προφύλαξη και η αειφόρος διαχείριση του εδάφους θα πρέπει να αποτελούν το επίκεντρο των πολιτικών που αποσκοπούν στην προστασία του.

Η σημασία της προστασίας του εδάφους αναγνωρίζεται ολοένα και περισσότερο διεθνώς. Το 1992, στη Διάσκεψη Κορυφής του Ρίο, τα συμμετέχοντα κράτη ενέκριναν σειρά δηλώσεων σχετικά με την προστασία του εδάφους. Αξίζει να σημειωθεί ιδιαίτερα ότι οι συμμετέχοντες κατέληξαν σε κοινής αποδοχής ορισμό της έννοιας της αειφόρου ανάπτυξης καθώς και ότι εγκρίθηκαν νομικά δεσμευτικές συμβάσεις με θέμα την αλλαγή του κλίματος, τη βιοποικιλότητα και αργότερα την απερίμωση. Στόχος της σύμβασης του 1994 για την καταπολέμηση της απερίμωσης είναι η πρόληψη και ο περιορισμός της υποβάθμισης των εδαφών, η αποκατάσταση εν μέρει υποβαθμισθέντων εδαφών καθώς και η ανάκτηση απερημωθέντων εδαφών. Η σύμβαση αναγνωρίζει τη σχέση που συνδέει την απερίμωση, την ένδεια, την τροφική ασφάλεια, την απώλεια της βιοποικιλότητας και την αλλαγή του κλίματος. Το Μάιο του 2001, η Επιτροπή επισήμανε ότι η απώλεια εδάφους και η υποβάθμιση της γονιμότητάς του απειλούν την αειφόρο ανάπτυξη επειδή περιορίζουν τη βιωσιμότητα των γεωργικών γαιών.

1.2 Εδαφική ρύπανση και πηγές ρύπανσης

Η είσοδος ρύπων στο έδαφος έχει ως αποτέλεσμα να πληγούν ή να απολεστούν πολλές από τις λειτουργίες των εδαφών και πιθανόν έμμεσα την ρύπανση του ύδατος. Όταν οι ρύποι στο έδαφος υπερβαίνουν ορισμένα επίπεδα πολλαπλασιάζονται οι αρνητικές επιπτώσεις στην τροφική αλυσίδα και, ως εκ τούτου, στην υγεία του ανθρώπου, καθώς και σε κάθε είδους οικοσυστήματα και φυσικούς πόρους. Για να αξιολογηθούν οι πιθανές επιπτώσεις των εδαφικών ρύπων, θα πρέπει να ληφθούν δεόντως υπόψη εκτός της συγκέντρωσης και η περιβαλλοντική συμπεριφορά και οι μηχανισμοί έκθεσης μέσω των οποίων επηρεάζεται η υγεία του ανθρώπου.



Εικόνα 1.2., Εδαφική ρύπανση, πηγή: <http://www.buzzle.com/articles/soil-pollution-causes-and-effects.html>, επίσκεψη 15/09/2011

Οι πηγές της εδαφικής ρύπανσης ποικίλουν, προέρχονται από διαφορετικές λειτουργίες και χρήσης γης ενώ οι επιπτώσεις τους μπορεί να είναι πολύ σοβαρές στην υγεία του ανθρώπου. Στο παρακάτω πίνακα γίνεται μια κατάταξη πηγών ρύπανσης εδαφών αλλά και υπόγειων υδάτων.

Κατηγορία ενώσεων	Τυπικές τοποθεσίες	Κινητικότητα	Τοξική δράση
Αγροχημικά	Βιομηχανίες, Αγροτικές εκμεταλλεύσεις	Χαμηλή	Καρκίνος, ασθένειες του νευρικού συστήματος
Βενζίνη και Πετρέλαιο	Διυλιστήρια, Πρατήρια, Στρατιωτικές βάσεις	Μέτρια ως Χαμηλή	Καρκινογενέσεις
Διαλύτες	Βαφεία αυτοκινήτων, Στρατιωτικές Βάσεις	Υψηλή ως μέτρια	Καρκινογενέσεις
PAHs	Εργοστάσια	Μέτρια ως Χαμηλή	Καρκινογενέσεις
PCBs	Εργοστάσια	Χαμηλή	Καρκίνος
Διοξίνες	Χημική βιομηχανία	Χαμηλή	Καρκίνος

Πίνακας 1, Κατάταξη πηγών ρύπανσης εδαφών και υπόγειων υδάτων, πηγή: Ζαμπετάκης, Λ., Μάνιο, Θ., Καρατζάς, Γ. [2005] Καινοτομικές μέθοδοι εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπογείων υδάτων. Η τεχνολογία της φωτοεξυγίανσης. Πρακτικά συνεδρίου Heleco '05, Αθήνα. Φορέας διεξαγωγής ΤΕΕ

Παρατηρώντας τον πίνακα 1 διαπιστώνεται πως αυτές οι πηγές ρύπανσης συμβάλουν στις καρκινογενέσεις. Αξίζει να σημειωθεί, πως οι λειτουργίες και οι χρήσεις γης που προκαλούν εδαφική ρύπανση εντοπίζονται στην Ελλάδα εντός πόλεων θέτοντας σε κίνδυνο την υγεία των κατοίκων.



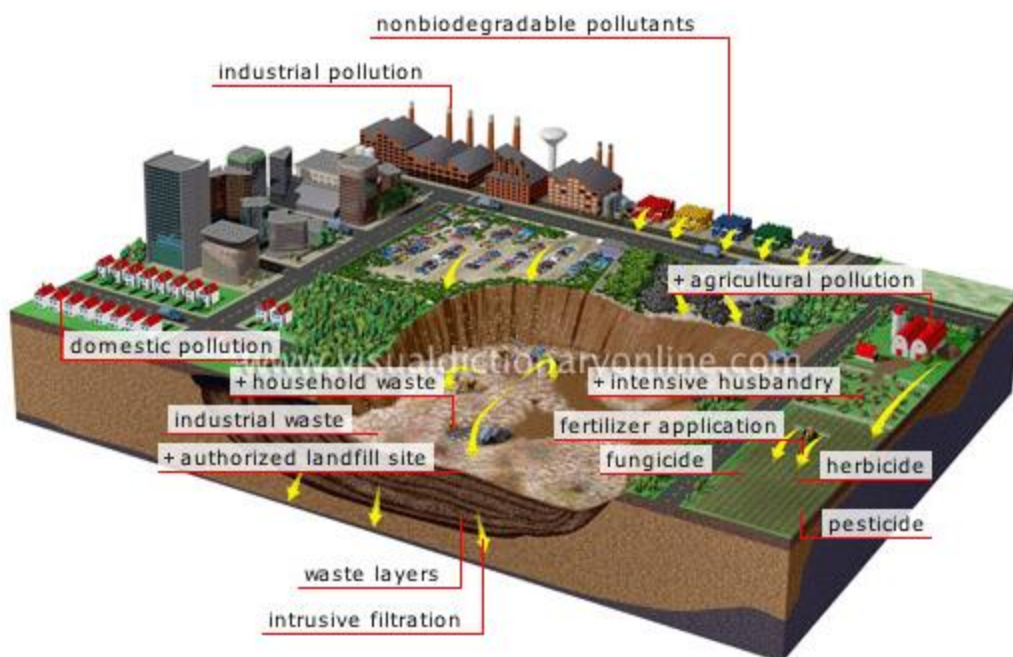
Εικόνα 1.3, Παράδειγμα εδαφική ρύπανσης, πηγή: Λατινόπουλος Π. (2007), «Οικονομική του Περιβάλλοντος και των Φυσικών Πόρων», Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

Οι κύριες πηγές, οι οποίες προκαλούν τη ρύπανση του ευρύτερου γεωπεριβάλλοντος θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Φυσικές διεργασίες

- Η διάλυση αλάτων κατά τη διήθηση των υπογείων υδάτων διαμέσου των πετρωμάτων, με συνέπεια την αύξηση της συγκέντρωσης χλωριόντων, θεικών, νιτρικών, ιόντων σιδήρου, ασβεστίου κλπ.
- Η εξατμισοδιαπνοή από αβαθείς υδροφορείς, η οποία μπορεί επίσης να προκαλέσει την αύξηση της συγκέντρωσης αλάτων
- Ανθρώπινες ενέργειες που σχετίζονται με τη διάθεση αποβλήτων
 - Βιομηχανικά υγρά απόβλητα που αποθηκεύονται σε επιφανειακούς ταμιευτήρες
 - Αστικά και βιομηχανικά στερεά απόβλητα και ιλείς, που διατίθενται στο έδαφος (π.χ. σε ειδικούς χώρους απόθεσης)
 - Αστικά λύματα που διατίθενται στο έδαφος είτε απευθείας είτε μετά από κάποια επεξεργασία
 - Στερεά και υγρά παραπροϊόντα της εκμετάλλευσης ορυκτών πόρων, όπως άγωνα ανθρακωρυχείων, τέφρα θερμοηλεκτρικών σταθμών, προϊόντα διάτρησης πετρελαιοπηγών ή βαθιών φρεάτων, υποπροϊόντα της διαδικασίας εμπλουτισμού μεταλλευμάτων κλπ.
 - Απόβλητα κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων
- Λοιπές ανθρώπινες ενέργειες
 - Γεωργικές εκμεταλλεύσεις (π.χ. χρήση φυτοφαρμάκων, εντομοκτόνων και λιπασμάτων)
 - Ατυχήματα κατά τη μεταφορά ή αποθήκευση ρύπων, με αποτέλεσμα τη διαφυγή τους στο έδαφος και τα υπόγεια νερά (π.χ. εκτροχιασμός τρένου μεταφοράς τοξικών ουσιών)
 - Αστοχία τεχνικών έργων, με αποτέλεσμα τη διαφυγή ρύπων στο έδαφος και τα υπόγεια νερά (π.χ. αστοχία φράγματος ταμίευσης υδαρών αποβλήτων μεταλλευτικής δραστηριότητας)
 - Ανεξέλεγκτη απόρριψη αποβλήτων λόγω άγνοιας ή έλλειψης ευαισθησίας στις πιθανές περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις
 - Τυχαίες διαρροές ρύπων από τους χώρους αποθήκευσης, όπως π.χ. οι διαρροές καυσίμων από δεξαμενές αποθήκευσης
 - Οι αέριες εκπομπές της βιομηχανίας και των μεταφορικών μέσων, μέσω της όξινης βροχής
- Ανθρωπογενείς δραστηριότητες με έμφαση στη βιομηχανία:
 - Εγκαταστάσεις παραγωγής φωταερίου και επεξεργασίας ορυκτών καυσίμων

- Ορυχεία εξόρυξης μεταλλευμάτων, χυτήρια, καθώς και συγκροτήματα κατεργασίας των υλικών αυτών
- Βιοτεχνίες παραγωγής ρούχων (υφαντουργεία, βαφεία)
- Διαφόρων ειδών χημικές βιομηχανίες με έμφαση στις φαρμακοβιομηχανίες, στις βιομηχανίες παραγωγής φυτοφαρμάκων, λιπασμάτων κ.α.
- Εγκαταστάσεις επεξεργασίας και αποθήκευσης πετρελαίου και των διαφόρων προϊόντων του
- Θερμοηλεκτρικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Χώροι εναπόθεσης υπολειμματικών υλικών
- Χωματερές και διάφοροι χώροι εναπόθεσης αποβλήτων, αστικών λυμάτων κ.α.
- Οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο
- Στρατιωτικές εγκαταστάσεις και περιοχές δοκιμής οπλικών συστημάτων²

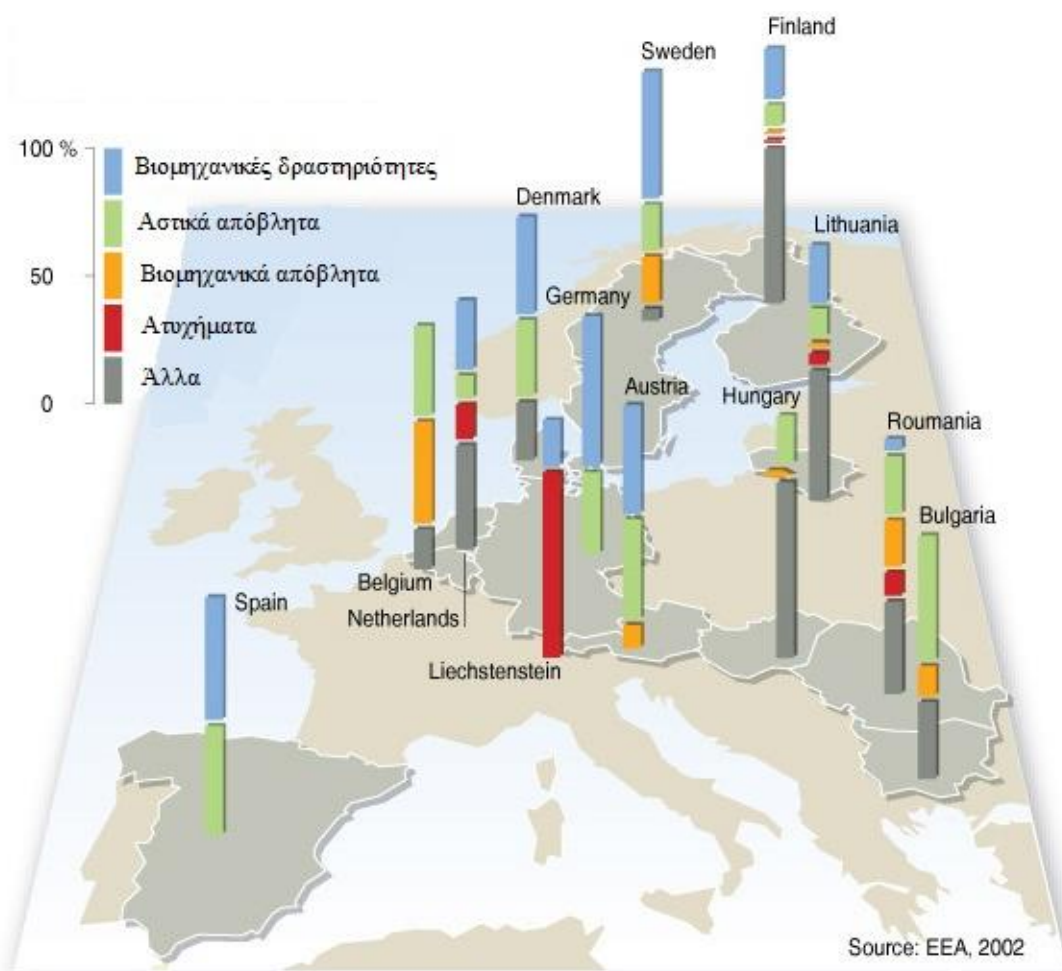


² Λατινόπουλος Π. (2007), «Οικονομική του Περιβάλλοντος και των Φυσικών Πόρων», Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

3. Μπαντής Σ. (2008), «Γεωτεχνική Περιβάλλοντος, Μέρος Β», Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

Εικόνα1.4, Πηγές ρύπανσης εδαφών, πηγή: <http://visual.merriam-webster.com/earth/environment/land-pollution.php>, επίσκεψη 13/09/2011

Στην παρακάτω εικόνα αποτυπώνονται συγκεκριμένες πηγές ρύπανσης εδάφους και σε τι ποσοστό προκαλούν εδαφική ρύπανση σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες. Παρατηρείται ότι στη Γερμανία, την Ισπανία και τη Σουηδία κύρια πηγή ρύπανσης αποτελεί η βιομηχανική δραστηριότητα. Ενώ τα αστικά απόβλητα αποτελούν επίσης κύρια πηγή εδαφικής ρύπανσης στις περισσότερες χώρες που αποτυπώνονται στην εικόνα.



Εικόνα1.5, Πηγές ρύπανσης εδαφών στην Ευρώπη, πηγή: http://maps.grida.no/go/graphic/soil_polluting_activities_from_selected_sources, επίσκεψη (10/09/2011)

Η εδαφική ρύπανση διακρίνεται αρκετές φορές σε δυο κατηγορίες, εντοπισμένη ή διάχυτη. Η διάκριση αυτή γίνεται βάση της πηγής ρύπανσης.

1.2.1 Η εντοπισμένη εδαφική ρύπανση

Η εντοπισμένη ρύπανση από σημειακές πηγές σχετίζεται εν γένει με εξορυκτικές δραστηριότητες, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, χώρους υγειονομικής ταφής αποβλήτων και άλλες εγκαταστάσεις που εξακολουθούν ή έπαυσαν να λειτουργούν. Οι εν λόγω δραστηριότητες ενδέχεται να συνεπάγονται κινδύνους για το έδαφος και τους υδατικούς πόρους.

Στο πλαίσιο των εξορυκτικών δραστηριοτήτων οι κίνδυνοι σχετίζονται με την αποθήκευση ή τη διάθεση καταλοίπων, την αποστράγγιση οξέων στα ορυχεία και τη χρήση ορισμένων χημικών αντιδραστηρίων.

Οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις που λειτουργούν ή έχουν παροπλισθεί ενίοτε αποτελούν μείζονα πηγή εντοπισμένης ρύπανσης. Μολονότι ως επί το πλείστον οι πλέον εκτεταμένες περιοχές που έχουν πληγεί απαντούν γύρω από τις ιδιαίτερα εκβιομηχανισμένες περιφέρειες της βόρειας Ευρώπης, τοποθεσίες που έχουν υποστεί ρύπανση υφίστανται και σε όλη την υπόλοιπη ήπειρο.

Στην Ευρώπη δεν είναι σημαντικές οι εκτάσεις που έχουν υποστεί ρύπανση από τεχνητά ραδιονουκλεΐδια. Η φυσική ραδιενέργεια που έχει πλήξει ορισμένες εκτάσεις προέρχεται από το ουράνιο και άλλα εξορυκτικά κατάλοιπα, τους σωρούς φωσφορογύψου, τη βιομηχανία μετάλλων, κ.λπ.

Η υγειονομική ταφή αποβλήτων έχει επίσης συχνά ρυπογόνες επιπτώσεις μείζονος σημασίας: κατά μέσο όρο 65% των αστικών απορριμμάτων που δημιουργούνται στην Ευρωπαϊκή Ένωση (190 εκατομμύρια τόνοι το 1995) εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο υγειονομικής ταφής. Τα εκπλύματα από τους χώρους υγειονομικής ταφής μπορούν να καταλήξουν στο περιβάλλον έδαφος και τα συναφή υλικά με αποτέλεσμα τελικά να διαχυθούν στα υπόγεια και/ή επιφανειακά ύδατα. Ιδιαίτερο προβληματισμό προκαλούν οι υγειονομικοί χώροι που λειτουργούν ή λειτούργησαν κατά το παρελθόν, δίχως να ανταποκρίνονται στην ελάχιστη δέσμη τεχνικών απαιτήσεων που καθορίζει η οδηγία για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων.

Οι τοποθεσίες που έχουν υποστεί ρύπανση εντός Ευρωπαϊκής Ένωσης υπολογίζονται σε 300.000 με 1,5 εκατομμύριο. Οι αντίστοιχοι υπολογισμοί ποικίλλουν ιδιαίτερα επειδή δεν υφίσταται κοινά αποδεκτός ορισμός για τις τοποθεσίες που έχουν υποστεί ρύπανση λόγω του ότι ακολουθούνται διαφορετικές προσεγγίσεις για τα αποδεκτά επίπεδα κινδύνου, των στόχων προστασίας και τις παραμέτρους της έκθεσης.

Η απορρύπανση του εδάφους είναι ιδιαίτερος δύσκολη και δαπανηρή διαδικασία. Το κόστος απορρύπανσης των τοποθεσιών ποικίλει ευρύτατα ανάλογα με το κράτος μέλος. Το 2000 η Ολλανδία δαπάνησε 550 εκατομμύρια ευρώ για απορρύπανση, η Αυστρία 67 και η Ισπανία 14. Ανάλογες διαφορές απηγούν τη διαφορά των αντιλήψεων σε ό,τι αφορά την σοβαρότητα της εδαφικής ρύπανσης, τις επιμέρους πολιτικές αποκατάστασης και τους αντίστοιχους στόχους καθώς και τη διαφορά των υπολογιστικών μεθόδων. Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος υπολόγισε ότι το συνολικό κόστος του καθαρισμού των τοποθεσιών που έχουν υποστεί ρύπανση στην Ευρώπη κυμαίνεται σε 59 με 109 δισεκατομμύρια ευρώ.

Η ανταλλαγή πείρας και η θέσπιση στόχων για την απορρύπανση αποτελούν διαδικασίες που δύνανται να συμβάλλουν σοβαρά στην αντιμετώπιση του εν λόγω προβλήματος, εντούτοις η πρόληψη κάθε περαιτέρω ρύπανσης θα πρέπει να συγκαταλέγεται μεταξύ των μελλοντικών στόχων.

1.2.2 Διάχυτη εδαφική ρύπανση

Η διάχυτη ρύπανση εν γένει σχετίζεται με ατμοσφαιρικές εναποθέσεις, ορισμένες γεωργικές πρακτικές και την ανεπαρκή ανακύκλωση και επεξεργασία των αποβλήτων και του νερού.

Οι ατμοσφαιρικές εναποθέσεις οφείλονται σε εκπομπές από τη βιομηχανία, την κυκλοφορία οχημάτων και τη γεωργία. Η εναπόθεση αεροφερόμενων ρύπων έχει ως αποτέλεσμα να συγκεντρώνονται στο έδαφος ρύποι που προκαλούν οξύνιση (π.χ. SO₂, NO_x), βαρέα μέταλλα (π.χ. κάδμιο, μόλυβδος, αρσενικό, υδράργυρο), και πολλές οργανικές ενώσεις (π.χ. διοξίνες, PCB, PAH).

Οι παράγοντας που προκαλούν οξύνιση σταδιακά μειώνουν τη ρυθμιστική ικανότητα του εδάφους, όταν μάλιστα υπερβαίνονται ορισμένα κρίσιμα φορτία προκαλείται αιφνίδια και μαζική απελευθέρωση αλουμινίου και άλλων τοξικών μετάλλων στα υδατικά συστήματα. Επιπλέον, οι οξύνιση διευκολύνει την απόπλυση θρεπτικών στοιχείων με αποτέλεσμα να περιορίζεται η γονιμότητα του εδάφους και να εμφανίζονται προβλήματα ευτροφισμού στους υδατικούς πόρους και της υπερβολική περιεκτικότητα σε αζωτούχες ενώσεις στο πόσιμο νερό. Επιπλέον ενδέχεται να είναι επιβλαβής για χρήσιμους μικροοργανισμούς του εδάφους επιβραδύνοντας τοιούτοτρόπως κάθε βιολογική δραστηριότητα.

Η εναπόθεση αμμωνίας και άλλων αζωτούχων ενώσεων (που οφείλονται σε εκπομπές από τη γεωργία, τη κυκλοφορία οχημάτων και τη βιομηχανία) προκαλεί ανεπιθύμητο εμπλουτισμό του εδάφους σε άζωτο με αποτέλεσμα τη συρρίκνωση της βιοποικιλότητας των δασών και των φυσικών λειμώνων υψηλής αξίας. Σε ορισμένα ευρωπαϊκά δάση οι εισερχόμενες αζωτούχες ενώσεις προσεγγίζουν ακραίες τιμές έως

και 60 kg αζώτου ανά εκτάριο ετησίως. Πριν από τη βιομηχανική εποχή οι αντίστοιχες εναποθέσεις δεν υπερέβαιναν τα 5 kg.

Όσον αφορά τις ραδιενεργές ουσίες, οι δασικές εκτάσεις έχουν ιδιαίτερη σημασία. Ο χαρακτηριστικός κύκλος των θρεπτικών ουσιών σε κάθε δασικό οικοσύστημα συνεπάγεται ότι για πολλά ραδιονουκλεΐδια (όπως τα καΐσιο-134 και -137 που απελευθερώθηκαν με το ατύχημα του Τσερνομπίλ), δεν υφίσταται διαδικασία εξάλειψης (εκτός της φυσιολογικής τους αποσύνθεσης). Ως εκ τούτου τα επίπεδα ραδιενέργειας στα δασικά προϊόντα εξακολουθούν να υπερβαίνουν τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές, ιδίως στα άγρια μανιτάρια.

Ορισμένες από τις γεωργικές πρακτικές μπορούν επίσης να θεωρηθούν ως πηγή της διάχυτης εδαφικής ρύπανσης, μολονότι οι επιπτώσεις τους στο νερό είναι γνωστότερες από τις επιπτώσεις τους στο έδαφος.

Τα συστήματα παραγωγής που δεν επιτυγχάνουν την εξισορρόπηση μεταξύ εισερχόμενων και εξερχόμενων υλών σε μια αγροτική μονάδα εν σχέση προς το διαθέσιμο έδαφος και γη, οδηγεί σε ανισορροπία των θρεπτικών ουσιών στο έδαφος, που συχνά έχει ως αποτέλεσμα τη ρύπανση των υπογείων και επιφανειακών υδάτων. Η κλίμακα των προβλημάτων νιτρορρύπανσης στην Ευρώπη υπογραμμίζει τη σοβαρότητα της ανισορροπίας αυτής.

Επιπλέον το πρόβλημα σχετίζεται με τα βαρέα μέταλλα (π.χ. κάδμιο, χαλκός) στα λιπάσματα και τις ζωοτροφές. Η επίδραση τους στο έδαφος και τους οργανισμούς που διαβιούν σε αυτό είναι σαφής, μολονότι από ορισμένες μελέτες προκύπτει ότι ενδεχομένως το κάδμιο καταλήγει στις τροφικές αλυσίδες. Αγνοούνται επίσης οι εδαφικές συνέπειες των αντιβιοτικών που περιέχουν οι ζωοτροφές.

Τα φυτοφάρμακα είναι τοξικές ενώσεις που διοχετεύονται εσκεμμένα στο περιβάλλον για την καταπολέμηση των ζιζανίων και των ασθενειών των φυτών. Είναι δυνατό να συγκεντρωθούν στο έδαφος, να εκπλυθούν στα υπόγεια ύδατα και να εξαερωθούν με αποτέλεσμα την εν συνεχεία εναπόθεσή τους στο έδαφος. Μπορούν επίσης να επηρεάσουν τη βιοποικιλότητα του εδάφους και να εισέλθουν στην τροφική αλυσίδα.

Η ισχύουσα διαδικασία χορήγησης αδειών για φυτοφάρμακα αξιολογεί μεταξύ άλλων τους περιβαλλοντικούς κινδύνους των επιμέρους φυτοφαρμάκων για το έδαφος, ωστόσο, οι πληροφορίες για τις συνδυασμένες επιπτώσεις τους εξακολουθούν να είναι περιορισμένες. Κατά την εφαρμογή των αντίστοιχων διαδικασιών χορήγησης αδειών απαγορεύονται τα φυτοφάρμακα που συνεπάγονται απαράδεκτους κινδύνους.

Ενώ η χρήση των φυτοφαρμάκων αποτελεί αντικείμενο κανονιστικής ρύθμισης, και ενώ προβλέπεται η υποχρεωτική τήρηση των αρχών της ορθής γεωργικής πρακτικής κατά τη χρήση τους, έχει αποδειχθεί ότι διαχέονται μέσω του εδάφους στα υπόγεια ύδατα καθώς και ότι λόγω της διάβρωσης μπορεί να καταλήξουν και στα επιφανειακά ύδατα. Σήμερα μεταξύ των φυτοφαρμάκων που συσσωρεύονται στο έδαφος συγκαταλέγονται και εκείνα που έχουν πλέον απαγορευθεί στην ΕΕ.

Όσον αφορά τα απόβλητα, η ιλύς καθαρισμού που αποτελεί το τελικό προϊόν της επεξεργασίας των αστικών λυμάτων προκαλεί επίσης προβληματισμούς. Τα υλικά αυτά που πιθανώς προσβάλλονται από ευρύ φάσμα ρύπων, όπως τα βαρέα μέταλλα και τα περιορισμένης βιοαποδομησιμότητας ίχνη οργανικών ουσιών, μπορεί να προκαλέσουν αύξηση των συγκεντρώσεων των εν λόγω ουσιών στο έδαφος. Ορισμένες εξ αυτών είναι δυνατό να διασπασθούν σε αβλαβή μόρια από μικροοργανισμούς του εδάφους, ενώ άλλες, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται και τα βαρέα μέταλλα, είναι δυσαποδόμητες. Τοιουτοτρόπως ενίοτε αυξάνουν οι συγκεντρώσεις τους στο έδαφος με συνακόλουθο κίνδυνο για τους εδαφόβιους μικροοργανισμούς, τα φυτά, την πανίδα και τον άνθρωπο. Παράλληλα διαπιστώνεται η παρουσία δυνάμει παθογενών οργανισμών όπως οι ιοί και τα βακτήρια. Ωστόσο η ιλύς καθαρισμού λυμάτων περιέχει οργανική ύλη και θρεπτικά συστατικά όπως το άζωτο, ο φώσφορος και το ποτάσσιο που είναι ιδιαίτερης σημασίας για το έδαφος και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά στη γεωργία. Εάν εξασφαλιστεί η πρόληψη και η παρακολούθηση της ρύπανσης στην πηγή της, η προσεκτική και η ελεγχόμενη χρήση της ιλύος καθαρισμού λυμάτων στο έδαφος αντί να αποτελεί πρόβλημα θα μπορούσε να αποδειχθεί επωφελής και να συμβάλει στην αύξηση της περιεκτικότητας του εδάφους σε ενόργανα συστατικά. 6,5 εκατομμύρια τόνων ιλύος καθαρισμού λυμάτων (σε ξηρά μορφή) παράγονται ετησίως στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Το κόστος της διάχυτης ρύπανσης του εδάφους δεν γίνεται αισθητό τόσο σε επίπεδο σύστασης του εδάφους όσο λόγω των καταστροφικών επιπτώσεων της στις ρυθμιστικές ικανότητές του. Μολονότι μέχρι σήμερα δεν έχει καταστεί δυνατό να υπολογιστεί επακριβώς το ως άνω κόστος, ο καθαρισμός του νερού από τις οργανικές ουσίες, τα φυτοφάρμακα, τις θρεπτικές ουσίες για τα φυτά και τα βαρέα μέταλλα είναι γνωστό ότι είναι ιδιαίτερα δαπανηρός.

1.2.3 Επιπτώσεις εδαφική ρύπανσης

Οι κίνδυνοι και οι βλαβερές επιπτώσεις που μπορούν να προκύψουν από την έκθεση σε κάθε είδους μολυσμένα εδάφη, κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Καρκινογένεση
- Τοξικότητα
- Ακτινοβολία επιβλαβής
- Ασφυξία
- Διαβρωτικότητα
- Εκρηξιμότητα
- Ευφλεκτικότητα

Οι επιπτώσεις αυτές, και κατά κύριο λόγο οι πρώτες, αφορούν το σύνολο της βιόσφαιρας συμπεριλαμβανομένων των φυτών, των ζώων και του ανθρώπου.

Συγκεκριμένα, οι μολυσματικοί παράγοντες που παρατηρούνται στα εδάφη μπορούν να βλάψουν τα φυτά, όταν αυτά προσπαθήσουν να αναπτυχθούν, απορροφώντας τη μόλυνση μέσω του ριζικού τους συστήματος. Άμεσα μπορεί να επηρεαστεί και η υγεία των ζώων και των ανθρώπων όταν καταναλώνουν, εισπνέουν ή έρχονται σε επαφή με μολυσμένο έδαφος, ή όταν τρέφονται με φυτά και ζώα, τα οποία με τη σειρά τους έχουν προσβληθεί από μολυσμένο έδαφος.

Αναφερόμενοι ειδικότερα στην περίπτωση του ανθρώπου, η επίδραση στην υγεία του μπορεί να καταστεί δυνατή είτε άμεσα είτε έμμεσα. Η άμεση αφορά την απευθείας επαφή με το έδαφος, γεγονός που μπορεί να συμβεί με τους εξής τρόπους:

- Λήψη τροφής από το έδαφος
- Δερματική επαφή με το έδαφος
- Εισπνοή εδαφικών μορίων

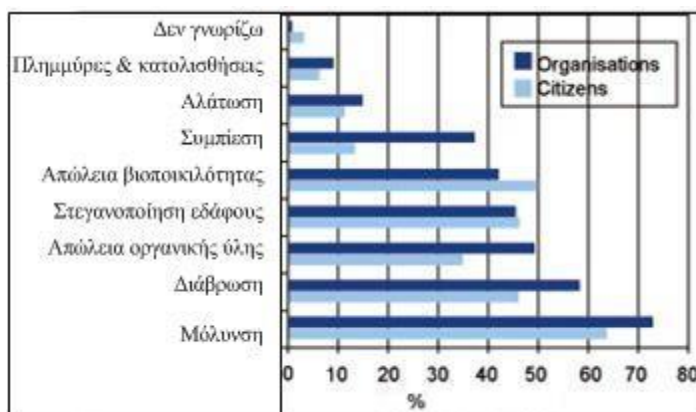
Η έμμεση αφορά την επίδραση μέσω διαφόρων προϊόντων και αγαθών που σχετίζονται με το έδαφος, γεγονός που μπορεί να συμβεί με τους εξής τρόπους:

- Κατανάλωση δημητριακών, λαχανικών ή φρούτων από μολυσμένα εδάφη
- Κατανάλωση ζωικών προϊόντων, όπως κρέας, γάλα κ.α.
- Κατανάλωση μολυσμένου νερού

Εν κατακλείδι, αναφέρεται ότι το είδος και ο βαθμός των επιπτώσεων που επιφέρει η έκθεση σε μολυσμένα εδάφη εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος της μόλυνσης, οι χημικές ιδιότητες των μολυσματικών συστατικών, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η συγκεκριμένη έκθεση(εισπνοή, δερματική επαφή, λήψη τροφής και κατανάλωση προϊόντων).

Όσον αφορά τις γνώσεις του πληθυσμού σχετικά με τις επιπτώσεις της εδαφικής ρύπανσης η Ευρωπαϊκή Ένωση διεξήγαγε μια έρευνα με τη μέθοδο των ερωτηματολογίων. Δόθηκε ένα ερωτηματολόγιο διερευνώντας τις γνώσεις των πολιτών της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις επιπτώσεις που προκαλούνται. Ένα αντίστοιχο ερωτηματολόγιο διαμοιράστηκε σε διάφορους φορείς δημόσιους αλλά και ιδιωτικούς. Τα ερωτηματολόγια απαντήθηκαν από 1.206 πολίτες και 662 φορείς και τα αποτελέσματα παρουσίασαν μεγάλο ενδιαφέρον.

Καταρχάς οι απόψεις των πολιτών διαφωνούν με τις απόψεις των φορέων. Χαρακτηριστικά, σύμφωνα με τους πολίτες η δεύτερη πιο σημαντική επίπτωση από την εδαφική ρύπανση είναι η απώλεια της βιοποικιλότητας. Αντίστοιχα, σύμφωνα με τους φορείς η δεύτερη πιο σημαντική είναι η διάβρωση. Ωστόσο, και οι δυο ομάδες ερωτηθέντων συμφώνησαν πως η σημαντικότερη επίπτωση είναι η μόλυνση και η λιγότερο σημαντική επίπτωση οι πλημμύρες και οι κατολισθήσεις. Πολύ μικρό ποσοστό απάντησε ότι δεν γνωρίζει τις επιπτώσεις, γεγονός ιδιαίτερα ενθαρρυντικό.



Διάγραμμα 1, Αποτελέσματα έρευνας για τις απόψεις των Ευρωπαίων σχετικά με τις επιπτώσεις της εδαφικής ρύπανσης, πηγή: <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=17583#tit1>, επίσκεψη 20/09/2011

1.2.4 Αποδεκτά όρια ρύπανσης εδάφους

Για την εκτίμηση του βαθμού ρύπανσης των εδαφών και των υπογείων υδάτων κάθε χώρα έχει θεσπίσει μέγιστα αποδεκτά όρια για διάφορους ρύπους. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα όρια για διαφορετικές χώρες. Όπως είναι φυσικό η μέγιστη αποδεκτή τιμή του κάθε ρύπου εξαρτάται άμεσα από τις χρήσεις γης της περιοχής όπου εντοπίζεται ρύπανση. Χαρακτηριστικά, τα μέγιστα αποδεκτά όρια ρύπανσης από μόλυβδο δεν μπορεί να είναι ίδια στην αυλή ενός σχολείου και σε ένα υπαίθριο χώρο στάθμευσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα μέγιστα αποδεκτά όρια εξαρτώνται άμεσα και από τη μέθοδο μέτρησής τους, συνεπώς είναι φυσικό ο ίδιος ρύπος να έχει διαφορετικό αποδεκτό όριο σε διαφορετικές χώρες.

Ουσία	Μέγιστη αποδεκτή συγκέντρωση στο εκχύλισμα (mg/l)
Βενζόλιο	0.5
Τετραχλωράνθραξ	0.5
Χλωριδάνιο	0.03
Χλωροβενζόλιο	100
Χλωροφόρμιο	6
Κρεζόλιο	200
1,4-Διχλωροβενζόλιο	7.5
1,2-Διχλωροαιθάνιο	0.5
1,1-Διχλωροαιθυλένιο	0.7
2,4-Δινιτρολουόλιο	0.13
Επταχλώριο	0.008
Εξσχωροβουταδιένιο	0.5
Εξσχωροβενζόλιο	0.13
Εξσχωροαιθάνιο	3.0
Μεθυλ-αιθυλ-κετόνη	200
Νιτροβενζόλιο	2
Πενταχλωροφαινόλη	100
Πυριδίνη	5
Τετραχλωροαιθυλένιο	0.7
Τριχλωροαιθυλένιο	0.5
2,4,5-Τριχλωροφαινόλη	400
2,4,6-Τριχλωροφαινόλη	2
Χλωριούχο βινύλιο	0.2

Πίνακας 2, Μέγιστα αποδεκτά όρια στα εδάφη των Η.Π.Α., πηγή: Καββάδας Μ., Πανταζίδου Μ. [2007] «Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής», Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Ουσία	Όριο επιφυλακής (mg/kg ξηρού εδάφους)	Όριο λήψης μέτρων (mg/kg ξηρού εδάφους)
Αρσενικό	10 - 40	-
Κάδμιο	3 - 15	-
Χρώμιο (ολικό)	600 - 1000	-
Μόλυβδος	500 - 2000	-
Υδράργυρος	1 - 20	-
Σελήνιο	3 - 6	-
Πολυ-αρωματικοί υδρογονάνθρακες	50 - 1000	500 - 10000
Φαινόλες	5	200 - 1000
Κυανιούχα (ελεύθερα)	25 - 100	500
Κυανιούχα (σύνθετα)	250	1000 - 5000
Θειικά	2000	10000 - 50000000000
Σουλφίδια	250	1000
Θείο	5000	20000
pH (όξινο)	5	3
pH (αλκαλικό)	9	12

Πίνακας 3, Μέγιστα αποδεκτά όρια στα εδάφη της Βρετανίας, πηγή: Καββάδας Μ., Πανταζίδου Μ. [2007] «Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής», Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Ουσία	Συγκέντρωση στο έδαφος (mg/kg ξηρού εδάφους)	
	Νέα	Παλαιά
Μέταλλα		
Χρώμιο	380	800
Κοβάλτιο	240	300
Νικέλιο	210	500
Χαλκός	190	500
Ψευδάργυρος	720	3000
Αρσενικό	55	50
Μολυβδένιο	200	200
Κάδμιο	12	20
Βάριο	625	2000
Υδράργυρος	10	10
Μόλυβδος	530	600
Ανόργανες ενώσεις		
Κυανιούχα (ελεύθερα)	20	100
Κυανιούχα (σύνθετα pH<5)	650	500
Κυανιούχα (σύνθετα pH ≥ 5)	50	500
Θειοκυανικά (ολικά)	20	
Βρωμιούχα	20 ^a	300
Χλωριούχα		
Φθοριούχα	500 ^a	2000
Χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες		
Διχλωρομεθάνιο	10	50
Τριχλωρομεθάνιο	10	5
Τετραχλωρομεθάνιο	1	50
1,2-Διχλωροαιθάνιο	4	50
Τριχλωροαιθάνιο	60	50
Τετραχλωροαιθάνιο	4	50
Χλωριούχο βινύλιο	0.1	
Χλωροβενζόλια (μεμονωμένα)		10
Χλωροβενζόλια (σύνολο)	30	20
Μονοχλωροβενζόλιο		10
Διχλωροβενζόλιο		10
Τριχλωροβενζόλιο		10
Τετραχλωροβενζόλιο		10
Πενταχλωροβενζόλιο		10
Εξαχλωροβενζόλιο		10
Χλωροφαινόλες (σύνολο)		10
Μονοχλωροφαινόλες (σύνολο)		5
Διχλωροφαινόλες		
Τριχλωροφαινόλες		
Τετραχλωροφαινόλες		
Πενταχλωροφαινόλη	5	
Χλωροναφθαλένιο		
Πολυχλωριωμένα διφενύλια (7 PCB)	1	10

Πίνακας 4, Μέγιστα αποδεκτά όρια στα εδάφη της Ολλανδίας, πηγή: Καββάδας Μ., Πανταζίδου Μ. [2007] «Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής», Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

1.2.5 Λόγοι απόφασης αποκατάστασης εδάφους

Οι λόγοι που μπορούν να επιβάλλουν τη λήψη απαραίτητων μέτρων για την αποκατάσταση των εδαφικών οικοσυστημάτων, είναι οι παρακάτω:

1. Η διαπίστωση ότι ο βαθμός ρύπανσης κυμαίνεται σε τέτοια επίπεδα, ώστε προκαλεί σημαντικούς κινδύνους στη δημόσια υγεία ή γενικότερα “μη αποδεκτή υποβάθμιση του περιβάλλοντος”. Τα τελευταία χρόνια, τα μέγιστα όρια της αποδεκτής υποβάθμισης του περιβάλλοντος έχουν μειωθεί σημαντικά (κυρίως λόγω της ευαισθητοποίησης των κοινωνικών

φορέων) με συνέπεια τη μεγάλη αύξηση των περιοχών στις οποίες δημιουργείται ανάγκη απορρύπανσης ή/και προστασίας.

2. Η ανάγκη βελτίωσης της ποιότητας του περιβάλλοντος σε μια περιοχή, έστω και εάν ο βαθμός ρύπανσης δεν προκαλεί σημαντικά προβλήματα δημόσιας υγείας.

3. Η ανάγκη αύξησης της εμπορικής αξίας των ακινήτων σε μια περιοχή.

4. Η ανάγκη ανάπτυξης μιας περιοχής σε συνδυασμό με την έλλειψη "καθαρών" χώρων για τη δημιουργία βιομηχανιών, οικισμών κλπ³.

1.3 Θεσμικό πλαίσιο και Πολιτικέςγια το έδαφος

Θεσμικά πλαίσια

Στην Ευρωπαϊκή ένωση έχουν θεσπιστεί κάποιες οδηγίες (Directives) για τη διάθεση των αποβλήτων, τη ρύπανση των εδαφών και άλλων προβλημάτων που απειλούν το περιβάλλον. Στην Ελλάδα η εφαρμογή αυτών των οδηγιών είναι υποχρεωτική. Στοχεύοντας στην προστασία του εδάφους η ευρωπαϊκή ένωση θέσπισε τις παρακάτω οδηγίες σχετικά με τη διάθεση των αποβλήτων και τη ρύπανση των υπόγειων υδάτων:

Ø Οδηγίες σχετικά με τη ρύπανση των υπόγειων υδάτων:

ο 80/68/EEC: Σχετικά με την προστασία του υπόγειου νερού έναντι συγκεκριμένων ρύπων

ο 2000/60/EC: Ενεργοποίηση ενός μεγάλου αριθμού κοινοτικών οδηγιών για τα υπόγεια νερά, με στόχο να συμπληρωθούν ή να αντικατασταθούν ώστε να δημιουργηθεί ένα πλαίσιο δράσης για τα υπόγεια νερά

Ø Οδηγίες σχετικά με τη διάθεση και διαχείριση αποβλήτων:

³ Λατινόπουλος Π. (2007), «Οικονομική του Περιβάλλοντος και των Φυσικών Πόρων», Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη
Μπαντής Σ. (2008), «Γεωτεχνική Περιβάλλοντος, Μέρος Β», Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

- 75/442/EEC: Γενικό πλαίσιο για διάθεση αποβλήτων. Μέσω αυτή απαιτούνται άδειες από όλες τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας, αποθήκευσης και απόθεσης στερών αποβλήτων
- 91/689/EEC: Διαχείριση τοξικών αποβλήτων
- 96/61/EC: εκπομπές ρύπων από βιομηχανικές και βιοτεχνικές μονάδες
- 99/31/EC: Κατασκευή, λειτουργία και αποκατάσταση ΧΥΤΑ

∅ Οδηγίες σχετικά με τη διάθεση ειδικών κατηγοριών αποβλήτων:

- 75/439/EEC: Διάθεση πετρελαϊκών αποβλήτων
- 78/176/EEC: Διάθεση αποβλήτων βιομηχανίας TiO₂
- 83/29/EEC: Προσομοίωση περιοχών διάθεσης TiO₂
- 86/278/EEC: Περί χρήσης αστικών λυμάτων στη γεωργία
- 87/217/EEC: Προστασία και διάθεση αμιάντου
- 89/428/EEC: Εναρμονισμός προγραμμάτων διάθεσης TiO₂
- 9/59/EC: Διάθεση Πολυχλωριούχων υδρογονανθράκων

∅ Οδηγίες σχετικά με τα ραδιενεργά κατάλοιπα:

- 75/406/Euroatom: Διαχείριση και αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων
- 82/74/Euroatom: Διαχείριση και αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων
- 89/664/Euroatom: Αποδοχή συγκεκριμένης πολιτικής στην έρευνα και τεχνολογία για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων⁴

⁴ Μαγκανάς Κ. [2004] «Εδαφική ρύπανση» (http://users.ntua.gr/mc05401/files/Soil_pollution.pdf)

Η κοινοτική πολιτική για την προστασία του εδάφους

Η προστασία του εδάφους, μολονότι, δεν αποτελεί αποκλειστικό θέμα κοινοτικής πολιτικής επηρεάζεται από πολλές κοινοτικές ενέργειες. Λόγω του πολυλειτουργικού ρόλου του εδάφους και της πανταχού παρουσίας του, είναι πολλές οι πολιτικές που το αφορούν, ενώ παράλληλα επιτρέπεται η χορήγηση κρατικών ενισχύσεων για την αποκατάσταση των εδαφών που έχουν υποστεί ρύπανση. Μέχρι σήμερα δεν έχει συστηματικά αποτιμηθεί η επίπτωση των πολιτικών αυτών στην κατάσταση του εδάφους. Οι πλέον σημαντικές μεταξύ των ως άνω πολιτικών είναι οι πολιτικές για το περιβάλλον, τη γεωργία και η περιφερειακή πολιτική ενώ παράλληλα θεωρείται ότι και οι πολιτικές μεταφορών και έρευνας επηρεάζουν το έδαφος.

Η πολιτική περιβάλλοντος

Η στενή σχέση μεταξύ του εδάφους και των άλλων σημαντικών περιβαλλοντικών μέσων, ήτοι του νερού και του αέρα, αντανακλάται στην ειδική περιβαλλοντική νομοθεσία, που μολονότι εστιάζεται στα μέσα αυτά εν γένει συμβάλλει επίσης και στην προστασία του. Παράλληλα είναι προφανής η σχέση μεταξύ της εδαφικής προστασίας και της νομοθεσίας για τα απόβλητα αφενός και της χωροταξικής πολιτικής αφετέρου.

Η κοινοτική νομοθεσία για το νερό (οδηγία για την προστασία από τη νιτρορρύπανση και οδηγία πλαίσιο για το νερό) καθιερώνει πρότυπα για την πρόληψη της ρύπανσης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων λόγω της απόπλυσης από το έδαφος επικίνδυνων ουσιών ή υπερβολικής ποσότητας θρεπτικών ουσιών. Η οδηγία για την καταπολέμηση της νιτρορρύπανσης αποδίδει ιδιαίτερη έμφαση στην καθιέρωση χρηστών καλλιεργητικών πρακτικών σε όλες τις περιοχές και στη θέσπιση προγραμμάτων δράσης για τις ζώνες που είναι ευπαθείς στη νιτρορρύπανση. Περιλαμβάνει διατάξεις για τη βελτίωση της κατάστασης του εδάφους, όπως η χειμερινή κάλυψη του με σπαρτά και η προσαρμοσμένη διαχείριση του εδάφους σε περιοχές με απότομες πλαγιές. Η οδηγία πλαίσιο για το νερό αποσκοπεί στην εξασφάλιση των οικολογικών, ποσοτικών και ποιοτικών λειτουργιών του νερού. Βάσει της οδηγίας όλες οι επιπτώσεις στο νερό αναλύονται υποχρεωτικά ενώ παράλληλα επιβάλλεται η ανάληψη δράσης στο πλαίσιο των προγραμμάτων διαχείρισης των λεκανών απορροής των ποταμών. Όποτε εδάφη τα οποία έχουν υποστεί ρύπανση, διάβρωση ή υπέρμετρη λίπανση συμβάλλουν στην ρύπανση των υπογείων υδάτων, η ανάληψη της αναγκαίας δράσης οδηγεί στη βελτίωση της προστασίας του εδάφους.

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι μπορεί να έρθουν σε επαφή με το έδαφος άμεσα ή έμμεσα όταν οι βροχοπτώσεις συμπαρασύρουν βαρέα μέταλλα και υλικά τα οποία είναι δυνατό να συμβάλλουν στα φαινόμενα της οξύνισης και του ευτροφισμού. Ως

εκ τούτου η νομοθεσία που αποσκοπεί στη μείωση και την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης επηρεάζει την προστασία του εδάφους.

Η διαχείριση των αποβλήτων αποτελεί καθοριστικής σημασίας στοιχείο για την πρόληψη της εδαφικής ρύπανσης. Ως πλέον σχετική θεωρείται η οδηγία για τη χρησιμοποίηση της ιλύος καθαρισμού λυμάτων στη γεωργία κατά τρόπο που να προλαμβάνονται οι επιβλαβείς επιπτώσεις στο έδαφος. Γενικότερα, η οδηγία πλαίσιο για τα απόβλητα καθιστά υποχρεωτικό η εναπόθεση αποβλήτων να είναι αβλαβής για το έδαφος. Ειδικότερα νομοθετήματα σχετικά με τα απόβλητα όπως η οδηγία για τους υγειονομικούς χώρους ταφής, η οδηγία για τις αποτεφρώσεις και η οδηγία για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων μπορούν να συμβάλλουν στην πρόληψη της εδαφικής ρύπανσης.

Η χωροταξική πολιτική μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο για την προστασία των εδαφικών πόρων, περιορίζοντας τη σφράγιση του εδάφους και εξασφαλίζοντας ότι τα χαρακτηριστικά του (π.χ. κίνδυνος διάβρωσης) λαμβάνονται δεόντως υπόψη κατά τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη διάθεση και τη χρήση του.

Η γενική νομοθεσία για το περιβάλλον έχει επίσης επιπτώσεις στην προστασία του εδάφους. Η οδηγία για την ολοκληρωμένη πρόληψη και τον έλεγχο της ρύπανσης επιβάλλει στη βιομηχανία και τις μονάδες εντατικής κτηνοτροφίας που υπερβαίνουν σαφώς καθορισμένο μέγεθος την πρόληψη των εκπομπών ρύπων στον αέρα, το νερό και το έδαφος, ώστε να αποφευχθεί η παραγωγή αποβλήτων και η διάθεση αυτών ασφαλώς, με την παράλληλη αποκατάσταση των παροπλισμένων βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Η οδηγία για την στρατηγική εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθιερώνει τις περιβαλλοντικές αξιολογήσεις για ορισμένα προγράμματα και σχέδια, και χωροταξικού χαρακτήρα, που αναμένεται να έχουν θετικές επιπτώσεις στην προστασία του εδάφους. Η οδηγία για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθιερώνει περιβαλλοντική εκτίμηση για ορισμένα δημόσια και ιδιωτικά έργα. Μεταξύ άλλων εξετάζονται και οι πιθανές επιπτώσεις στο έδαφος. Κατά την εφαρμογή της προβλεπόμενης διαδικασίας για τις χημικές ουσίες εκτελούνται αξιολογήσεις κινδύνου και διαμορφώνονται στρατηγικές μείωσης των κινδύνων για πολλές εξ' αυτών. Με τις εκτιμήσεις βάσει του κανονισμού για τις υφιστάμενες ουσίες, εξετάζονται οι κίνδυνοι από τις εκπομπές ουσιών στο έδαφος. Ανάλογη νομοθεσία υπάρχει και για την εκτίμηση των νέων χημικών ουσιών, των φυτοπροστατευτικών προϊόντων και των βιοκτόνων. Η οδηγία για τα οικολογικά ενδιαίτηματα είναι ιδιαίτερης σημασίας εν προκειμένω διότι ορίζει τα οικολογικά ενδιαίτηματα που εξαρτώνται από ειδικά εδαφικά χαρακτηριστικά όπως οι αμμοθίνες, οι τυρφώνες, οι ασβεστολιθικοί λειμώνες και οι υγράτοποι.

Η πολιτική μεταφορών

Το φάσμα των πιθανών επιπτώσεων των μεταφορών στο έδαφος είναι ιδιαίτερα ευρύ. Το σημαντικότερο στοιχείο είναι το έδαφος που καταλαμβάνεται από την υποδομή των μεταφορών και η κατακερμάτιση των οικοσυστημάτων και των οικολογικών ενδιαμιμάτων λόγω των μεταφορικών δικτύων. Η ποιότητα του εδάφους επηρεάζεται από το νερό που εκχέεται από το οδικό σύστημα και τους διαδρόμους προσγειώσεων των αεροδρομίων, τη χρήση δυσαποδόμητων ζιζανιοκτόνων στις σιδηροδρομικές γραμμές, την εκπομπή ΝΟx από τα αυτοκίνητα οχήματα, τη διατάραξη της ροής των υπογείων υδάτων λόγω των κατασκευαστικών έργων και τους κινδύνους ρύπανσης λόγω μεταφοράς επικινδύνων εμπορευμάτων.

Η Λευκή Βίβλος για την κοινή πολιτική μεταφορών περιγράφει την ασκούμενη πολιτική στον εν λόγω τομέα. Το κείμενο αναφέρεται στην ανάγκη ενσωμάτωσης των μεταφορών στην αειφόρο ανάπτυξη. Εν προκειμένω αναφέρονται δέσμες μέτρων που αποσκοπούν στην αλλαγή του ισοζυγίου μεταξύ των επιμέρους μεταφορικών μέσων, ιδίως από τις οδικές και τις αεροπορικές μεταφορές προς τις φιλικότερες για το περιβάλλον σιδηροδρομικές μεταφορές και τις μεταφορές μέσω των πλωτών οδών.

Το σύστημα δεικτών παρακολούθησης TERM αποσκοπεί στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιδόσεων του τομέα των μεταφορών. Περιλαμβάνει δείκτες κατάληψης και κατάτμησης του εδάφους.

Πολιτική έρευνας

Στο πλαίσιο των επιμέρους κοινοτικών προγραμμάτων έρευνας, αντιμετωπίζεται σειρά προβλημάτων σχετικών με την προστασία του εδάφους. Στο 5ο πρόγραμμα πλαίσιο τα προγράμματα "Περιβάλλον και αειφόρος ανάπτυξη" και "Ποιότητα ζωής" υποστηρίζουν έρευνες που αναφέρονται στο έδαφος.

Στην καθοριστικής σημασίας δράση "Αειφόρος ανάπτυξη και ποιότητα του νερού" πολλές ερευνητικές δραστηριότητες αφορούν την αξιολόγηση και την ελαχιστοποίηση της ρύπανσης από βιομηχανικές δραστηριότητες, εδάφη που έχουν υποστεί ρύπανση, χώρους διάθεσης αποβλήτων καθώς και από τα κατάλοιπα ή τη διάχυτη ρύπανση λόγω επιμέρους χωροταξικών πρακτικών. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ νερού και εδάφους εξετάζονται επίσης στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης διαχείρισης του νερού. Οι εκτελούμενες δραστηριότητες έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης αφορούν την αειφόρο διαχείριση συναρτήσεων των κινδύνων που απειλούν τις εδαφικές εκτάσεις, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τα υπόγεια ύδατα που έχουν υποστεί ρύπανση. Το Δίκτυο Αποκατάστασης Ρυπασμένων Εδαφών με χρήση Περιβαλλοντικών Τεχνολογιών CLARINET αποτελεί έμπειρο δίκτυο πολιτικού

προσανατολισμού διαχείρισης των εκτάσεων που έχουν υποστεί ρύπανση με στόχο την αποκατάστασή τους με την αξιοποίηση των περιβαλλοντικών τεχνολογιών.

Στον τομέα των περιβαλλοντικών εφαρμογών του "Προγράμματος για τις Τεχνολογίες της Κοινωνίας της Πληροφορίας" εκτελούνται πολλά ερευνητικά έργα που σχετίζονται με τη βελτίωση της διαχείρισης των εδαφών.

Η καθοριστικής σημασίας δράση "Η παγκόσμια αλλαγή, κλίμα και βιοποικιλότητα" μελετά τα ευπαθή οικοσυστήματα, των οποίων ένα από τα βασικά συστατικά είναι το έδαφος, σε σχέση με το κλίμα και την παγκόσμια αλλαγή. Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στα αίτια της υποβάθμισης του εδάφους και της απερίθωψης στα εύθραυστα οικοσυστήματα της Ευρώπης. Ερευνητικές προσπάθειες καταβάλλονται επίσης για την αξιολόγηση των επιπτώσεων των διαφόρων πολιτικών και πρακτικών.

Οι εκτελούμενες έρευνες στο πλαίσιο του προγράμματος "Ποιότητα ζωής" αφορούν τις νέες αγροτικές μεθόδους με περιορισμένες αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και το έδαφος. Η πρόληψη και έλεγχος της διάβρωσης και της αλάτωσης αποτελούν επίσης μέρος των ερευνητικών δραστηριοτήτων για την προαγωγή της αειφόρου χρήσης των εδαφών. Για παράδειγμα, το ερευνητικό έργο PESERA καλείται να εκτιμήσει τους κινδύνους διάβρωσης του εδάφους σε ολόκληρη την Ευρώπη.

Επιπλέον, το ειδικό πρόγραμμα του Κοινού Κέντρου Ερευνών της Επιτροπής (ΚΚΕρ) για το Ευρωπαϊκό Γραφείο Εδαφών οδήγησε στη συγκρότηση δικτύου εδαφολογικών επιστημονικών φορέων. Ο εν λόγω φορέας εκτελεί επιστημονικά και τεχνικά προγράμματα εργασίας για τη συλλογή, την εναρμόνιση και τη διανομή πληροφοριών σχετικών προς το έδαφος από τις χώρες της Ευρώπης. Οι πληροφορίες αυτές αφορούν την Κοινότητα και τις εθνικές πολιτικές.

Το 6ο πρόγραμμα πλαίσιο για την έρευνα υποστηρίζει έρευνες που σχετίζονται με το έδαφος στο πλαίσιο της προτεραιότητας "Αειφόρος Ανάπτυξη, Παγκόσμια Αλλαγή και Οικοσύστημα". Επικεντρώνεται στην ολοκληρωμένη εκτίμηση της υποβάθμισης και της απερίθωψης του εδάφους σε μεγάλη κλίμακα ανά την Ευρώπη καθώς και στις συναφείς στρατηγικές πρόληψης και περιορισμού των επιπτώσεων. Επιπλέον, αντιμετωπίζει θέματα του εδάφους που σχετίζονται με τον κύκλο του νερού. Άλλες προτεραιότητες αποσκοπούν στην καλύτερη κατανόηση της βιοποικιλότητας του εδάφους και στο ρόλο που αυτό διαδραματίζει ως αποδέκτης δέσμευσης του άνθρακα. Παράλληλα στο πλαίσιο της δραστηριότητας για τις ειδικές δραστηριότητες που καλύπτουν ένα ευρύτερο ερευνητικό πεδίο, το 6ο πρόγραμμα πλαίσιο θα υποστηρίξει την έρευνα για τη διαμόρφωση και την εφαρμογή των κοινοτικών πολιτικών (6ο πρόγραμμα δράσης για το περιβάλλον),

συμπεριλαμβανομένων των περιβαλλοντικών εκτιμήσεων (έδαφος και νερό, παράλληλα με τις επιπτώσεις των χημικών ουσιών). Το πρόγραμμα του ΚΚΕρ θα εξακολουθήσει να υποστηρίζει το Ευρωπαϊκό Γραφείο Εδαφών, που ως δίκτυο των εδαφολογικών επιστημονικών φορέων, παρέχει στις υπηρεσίες της Επιτροπής εδαφολογικά στοιχεία με ιδιαίτερη σημασία για τις ασκούμενες πολιτικές.

2. Τεχνολογίες απορρύπανσης ρυπασμένων εδαφών

Ο αριθμός και η ποικιλία τεχνολογιών απορρύπανσης ρυπασμένων εδαφών είναι τέτοια που επιτρέπουν την κατηγοριοποίηση των μεθόδων βάση διαφόρων παραγόντων. Μερικοί παράγοντες οι οποίοι θα μπορούσαν να αποτελούν κριτήριο κατηγοριοποίησης είναι οι ακόλουθοι:

- Ρυπασμένο μέσο
 - Ακόρεστη ζώνη: έδαφος
 - Κορεσμένη ζώνη: έδαφος και υπόγειο νερό
- Μηχανισμός αποκατάστασης
 - Μεταφορά μάζας σε άλλο μέσο
 - Διάσπαση ρύπου
- Στόχος εξυγίανσης
 - Προφύλαξη πληθυσμού (προστασία από την έκθεση)
 - Περιορισμός εξάπλωσης ρύπου
 - Αποκατάσταση χώρου
- Βαθμός επέμβασης
 - Φυσική εξασθένηση ρύπων
 - Εγκιβωτισμός/αδρανοποίηση ρύπων (περιορισμός εξάπλωσης ρύπων)
 - Επεξεργασία ρυπασμένου μέσου
 - § επί τόπου επεξεργασία
 - § απομάκρυνση ρύπου – επεξεργασία στην επιφάνεια του εδάφους⁵

⁵ Πανταζίδου Μ. «Μέτρα και τεχνολογίες Αποκατάστασης» Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων, Ε.Μ.Π.

2.1 Κυριότερες μέθοδοι απορρύπανσης

2.1.1 Φωτοεξυγίανση

Η τεχνολογία της φωτοεξυγίανσης κατατάσσεται σύμφωνα με την υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (E.P.A.), στις λεγόμενες καινοτόμες τεχνολογίες επεξεργασίας (Innovative treatment technologies). Πρόκειται για τεχνολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία επικίνδυνων αποβλήτων και άλλων μολυσματικών παραγόντων, χωρίς όμως να υπάρχουν αρκετές πληροφορίες σχετικά με το κόστος και την απόδοση που έχουν υπό διαφορετικές συνθήκες επεξεργασίας. Ο όρος «Φυτοεξυγίανση», αναφέρεται σε κάθε σύστημα ή διαδικασία στην οποία χρησιμοποιούνται φυτά, για την *in situ* ή *ex situ* εξυγίανση ρυπασμένων εδαφών, υλικών καθιζήσεως (sediments) και υδάτων (επιφανειακών ή υπόγειων), μέσω της απομάκρυνσης, διάσπασης και σταθεροποίησης των ρυπαντών.

Ο εν λόγω όρος είναι σχετικά πρόσφατος ωστόσο η ιδέα της εφαρμογής αυτής της μεθόδου εντοπίζεται σε βιβλιογραφία εδώ και αιώνες. Το πρώτο σύστημα επεξεργασίας αστικών λυμάτων βασιζόμενο στη χρήση φυτών, λειτούργησε στη Γερμανία στις αρχές του 17^{ου} αιώνα. Από τότε μέχρι σήμερα έχει επιτευχθεί σημαντική ανάπτυξη στην εφαρμογή διαφόρων τεχνικών ακόμα και σε επίπεδο εμπορικής κλίμακας, για την δευτερογενή επεξεργασία αστικών υδατικών αποβλήτων, με τη χρήση φυτών. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν τη χρήση υδρόβιων και υδροχαρών φυτών για τη δημιουργία τεχνητών υγροβιότοπων (Constructed Wetlands), δεξαμενών σταθεροποίησης (Stabilization Ponds) και γενικότερα φυσικών συστημάτων επεξεργασίας. Οι προαναφερθείσες τεχνικές συνδυάζουν την οικονομική λειτουργία με την ικανοποιητική απόδοση στην απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών (SS), και θρεπτικών στοιχείων (πχ. άζωτο, φώσφορος, υδράργυρος). Τα τελευταία χρόνια η έννοια των φυσικών συστημάτων επεξεργασίας έχει επεκταθεί πέρα από τη χρησιμοποίησή τους στην επεξεργασία υδατικών αποβλήτων. Τέτοιες προσπάθειες περιλαμβάνουν τη χρήση φυτών για την εξυγίανση αβαθών υδροφορέων και έχουν σαν στόχο την ρύπανση που προκαλούν κυρίως εντομοκτόνα και ανόργανα στοιχεία όπως άζωτο και φώσφορος. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως βιο-φίλτρα (Bio-filters) ή ριζο-φίλτρα (Rhizo-filters).

Η εξυγίανση ρυπασμένων εδαφών, χωρίς τη μεσολάβηση της υδατικής βάσης, με τη χρήση φυτών δεν έχει επαρκώς μελετηθεί τόσο σε εργαστηριακά πειράματα όσο και σε πειράματα πεδίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως σε δύο λόγους. Κατ' αρχάς δεν έχουν θεσπιστεί κρίσιμες συγκεντρώσεις τοξικότητας των διαφόρων ρυπαντών για το έδαφος από τους περιβαλλοντικούς οργανισμούς, σε αντίθεση με το νερό. Ο δεύτερος λόγος είναι η πολυπλοκότητα που παρουσιάζει το εδαφικό σύστημα και των εξαιρετικά δύσκολων αναλυτικών τεχνικών που απαιτούνται.

Η τεχνολογία της Φυτοεξυγίανσης έχει αποδειχθεί, κυρίως μέσω εργαστηριακών πειραμάτων ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση τόσο οργανικών (Υδρογονάνθρακες πετρελαίου, διαλύτες, εντομοκτόνα), όσο και ανόργανων ρυπαντών (Βαρέα μέταλλα). Τα περισσότερα από τα πειράματα πεδίου εξακολουθούν να βρίσκονται σε εξέλιξη, με αποτέλεσμα να μην είναι πλήρως τεκμηριωμένη η εφαρμογή της Φυτοεξυγίανσης σε πραγματικές συνθήκες. Παρά το γεγονός ότι στην παρούσα φάση η τεχνολογία της Φυτοεξυγίανσης δεν εφαρμόζεται σε ευρεία κλίμακα, θεωρείται ότι πρόκειται για μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία εξυγίανσης με σημαντική δυναμική εξέλιξη. Οι λόγοι που ευνοούν την εφαρμογή της Φυτοεξυγίανσης είναι οι ακόλουθοι:

- Η επέκταση της επιστημονικής γνώσης σχετικά με το μεταβολισμό επικίνδυνων ρυπαντών και ιδιαίτερα των οργανικών ενώσεων.
- Η εύρεση νέων φυτικών ειδών που έχουν τη δυνατότητα να παρουσιάζουν ανθεκτικότητα σε διάφορους ρυπαντές.
- Η χρησιμοποίηση της γενετικής μηχανικής στη δημιουργία νέων μεταβολικών δυνατοτήτων για τα είδη χρησιμοποιούμενα φυτά.

Τεχνικές της φυτοεξυγίανσης

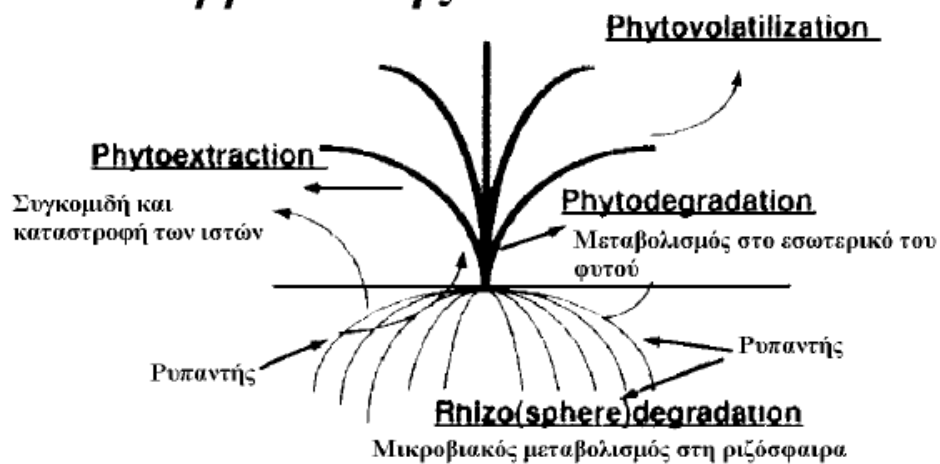
Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία της Φυτοεξυγίανσης γενικά μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. Φυτοαπορρύπανση (Phytodecontamination)
2. Φυτοσταθεροποίηση (Phytostabilization)

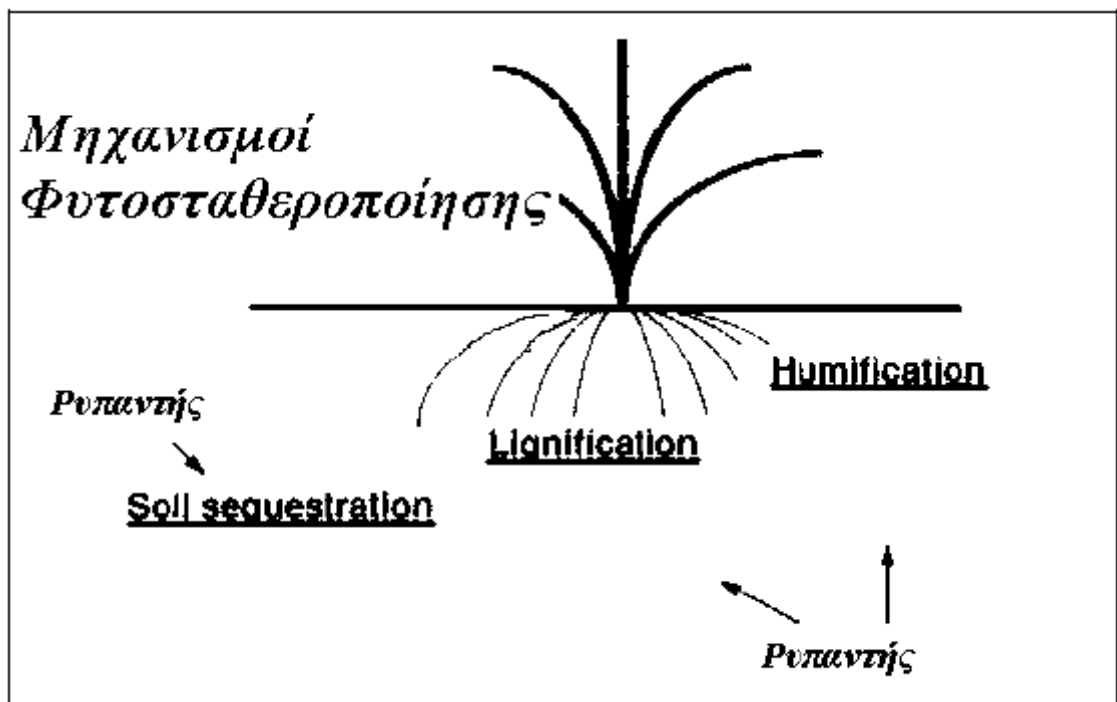
Η φυτοαπορρύπανση, περιλαμβάνει μηχανισμούς, με τη βοήθεια των οποίων, η συγκέντρωση του ρυπαντή στο έδαφος, το νερό και την ατμόσφαιρα μειώνεται σε αποδεκτά επίπεδα. Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζονται οι μηχανισμοί που είναι δυνατόν να εφαρμοστούν κατά τη διαδικασία της φυτοαπορρύπανσης.

Η δεύτερη τεχνική, η τεχνική της φυτοσταθεροποίησης, (Εικόνα 2.1), περιλαμβάνει μηχανισμούς οι οποίοι έχουν ως στόχο την αδρανοποίηση και απομόνωση του ρυπαντή ώστε να παρεμποδιστεί η μετανάστευση του (migration) από το έδαφος στο υπόγειο νερό ή στην ατμόσφαιρα. Η φυτοσταθεροποίηση βασίζεται στην ικανότητα των φυτών να εκκρίνουν ουσίες, μέσω των ριζών τους, οι οποίες ευνοούν μηχανισμούς όπως η χουμοποίηση (humification) - δέσμευση του ρυπαντή στα χουμικά συστατικά του εδάφους, η λιγνιτοποίηση (lignification) - δέσμευση στα κυτταρικά τοιχώματα των ριζών και δέσμευση στα εδαφικά σωματίδια (soil sequestration).

Μηχανισμοί Φυτοαπορρύπανσης



Εικόνα2.1, Μηχανισμοί που εμπλέκονται στην διαδικασία της φυτοαπορρύπανσης, πηγή: Ζαμπετάκης, Λ., Μάνιο, Θ., Καρατζάς,Γ. [2005] Καινοτομικές μέθοδοι εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπογείων υδάτων. Η τεχνολογία της Φωτοεξυγίανσης. Πρακτικά συνεδρίου Heleco '05, Αθήνα. Φορέας διεξαγωγής ΤΕΕ

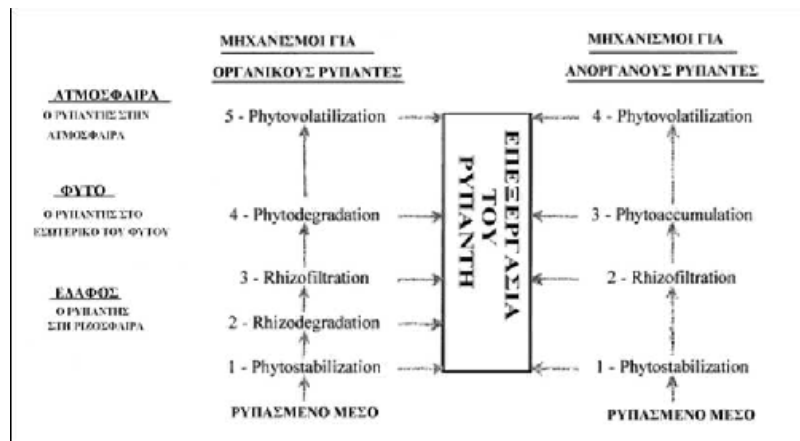


Εικόνα 2.2, Μηχανισμοί που εμπλέκονται στην διαδικασία της φυτοσταθεροποίησης, πηγή: Ζαμπετάκης, Λ., Μάνιο, Θ., Καρατζάς, Γ. [2005] Καινοτομικές μέθοδοι εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπογείων υδάτων. Η τεχνολογία της Φωτοεξυγίανσης. Πρακτικά συνεδρίου Heleco '05, Αθήνα. Φορέας διεξαγωγής ΤΕΕ

Μια άλλη κατάταξη της τεχνολογίας της φυτοεξυγίανσης πραγματοποιείται ανάλογα με τους ρυπαντές στόχους:

- Φυτοεξυγίανση Οργανικών ρυπαντών
- Φυτοεξυγίανση Ανόργανων ρυπαντών

Στην εικόνα 2.3, παρουσιάζονται οι μηχανισμοί εξυγίανσης για οργανικούς και ανόργανους ρυπαντές στο σύστημα έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα.



Εικόνα2.3, Μηχανισμοί εξυγίανσης στο σύστημα έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα, πηγή: Ζαμπετάκης, Λ., Μάνιο, Θ., Καρατζάς,Γ. [2005] Καινοτομικές μέθοδοι εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπογείων υδάτων. Η τεχνολογία της Φυτοεξυγίανσης. Πρακτικά συνεδρίου Heleco '05, Αθήνα. Φορέας διεξαγωγής ΤΕΕ

Σύμφωνα με την υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος των Η.Π.Α, οι ορισμοί για τους διάφορους μηχανισμούς της Φυτοεξυγίανσης έχουν ως εξής:

ΦΥΤΟΕΞΑΓΩΓΗ-Phytoextraction

Η φυτοεξαγωγή (ή φυτοσυσσώρευση-phytoaccumulation), αναφέρεται στη πρόσληψη μετάλλων και τη μεταφορά τους στα υπέργεια τμήματα του φυτού. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις ρυπασμένων εδαφών με βαρέα μέταλλα. Στηρίζεται στη χρησιμοποίηση φυτών τα οποία έχουν την ικανότητα να συσσωρεύουν υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων στη βιομάζα τους, ως και 100 φορές περισσότερο σε σχέση με άλλα φυτά.

ΦΥΤΔΙΑΣΠΑΣΗ -Phytodegradation

Η φυτοδιάσπαση (ή φυτομετασχηματισμός -phytotransformation), περιλαμβάνει διαδικασίες οι οποίες οδηγούν στη διάσπαση/αποδόμηση του ρυπαντή. Η διάσπαση του ρυπαντή μπορεί να πραγματοποιείται είτε εντός του φυτού, μέσω μεταβολικών διεργασιών είτε εξωτερικά στην περιοχή της ρίζας μέσω της παραγωγής ενζύμων. Μετά την διάσπαση του ρυπαντή, πραγματοποιείται η ενσωμάτωση του στους φυτικούς ιστούς. Σε μερικές περιπτώσεις τα τελικά προϊόντα της διάσπασης, ελευθερώνονται στο περιβάλλον, γεγονός που εξαρτάται από το είδος του φυτού και τον ρυπαντή. Ο μηχανισμός της φυτοδιάσπασης χρησιμοποιείται σε ρυπασμένα εδάφη, επιφανειακά και υπόγεια ύδατα. Στην περίπτωση των υπόγειων υδάτων, θα πρέπει το ριζικό σύστημα του φυτού να βρίσκεται σε επαφή με τον υδροφόρο, α

διαφορετικά είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί άντληση και τοποθέτηση του νερού σε δεξαμενές στις οποίες υπάρχουν κατάλληλα φυτικά είδη.

ΦΥΤΟΕΞΑΕΡΩΣΗ -Phytovolatilization

Κατά τη φυτοεξαέρωση, μέταλλα και οργανικές ουσίες, οι οποίες προσλαμβάνονται από τα φυτά, μετατρέπονται σε πτητικές μορφές και ελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Μέσω αυτού του μηχανισμού επιτυγχάνεται η εξυγίανση ρυπασμένων εδαφών και υπόγειων υδάτων χωρίς να είναι απαραίτητη η συγκομιδή του φυτικού υλικού.

ΡΙΖΟΑΙΑΣΠΑΣΗ-Rhizodegradation

Η ριζοδιάσπαση (ή φυτοδιέγερση-phytostimulation, ή βιοεξυγίανση μέσω της ριζόσφαιρας-rhizospherebiodegradation), αναφέρεται στην διάσπαση οργανικών ρυπαντών στο έδαφος, μέσω μικροβιακών πληθυσμών που αναπτύσσονται στην περιοχή του ριζικού συστήματος (ριζόσφαιρα). Οι μικροοργανισμοί (μύκητες, βακτήρια), διασπών ή μετασχηματίζουν οργανικές ουσίες και τις χρησιμοποιούν ως θρεπτικό υπόστρωμα για την ανάπτυξη τους. Η παρουσία των φυτών ευνοεί τη διαδικασία της εξυγίανσης δεδομένου ότι μέσω των ριζών εκκρίνονται ουσίες και μεταφέρεται οξυγόνο και νερό, στοιχεία απαραίτητα για τη μικροβιακή ανάπτυξη.

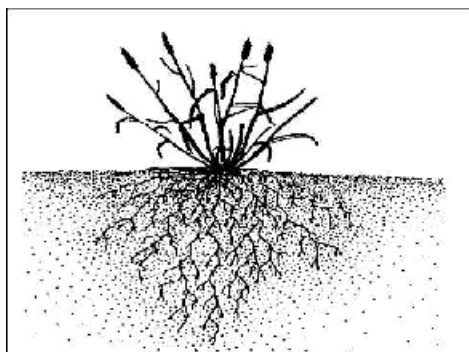
ΡΙΖΟΑΙΗΘΗΣΗ-Rhizofiltration

Η ριζοδιήθηση περιλαμβάνει τη ρόφηση στις φυτικές ρίζες ρυπαντών οι οποίοι βρίσκονται σε υδατικά διαλύματα. Τα φυτά αναπτύσσονται σε θερμοκήπια με τη μέθοδο της υδροπονίας, δηλαδή οι ρίζες τους βρίσκονται εντός υδατικού διαλύματος αντί του εδάφους.

Στοιχεία φυσιολογίας φυτών για την τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης

Ο ρόλος της ριζόσφαιρας

Η ριζόσφαιρα (Εικόνα 2.4), αποτελεί την περιοχή γύρω από το ριζικό σύστημα των φυτών, στην οποία παρατηρείται έντονη μικροβιακή δραστηριότητα. Εκτός από τους μικροοργανισμούς (βακτήρια, μύκητες), στην περιοχή της ριζόσφαιρας υπάρχουν πρωτόζωα, νηματώδεις, και έντομα τα οποία συμβάλουν μέσω της μεταβολικής τους δραστηριότητας στις διαδικασίες αποδόμησης που συντελούνται στα οικοσυστήματα.



Εικόνα2.4, Η ριζόσφαιρα των φυτών αποτελεί περιοχή έντονης μικροβιακής δραστηριότητας, πηγή: Ζαμπετάκης, Λ., Μάνιο, Θ., Καρατζάς,Γ. [2005] Καινοτομικές μέθοδοι εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπογείων υδάτων. Η τεχνολογία της Φωτοεξυγίανσης. Πρακτικά συνεδρίου Heleco '05, Αθήνα. Φορέας διεξαγωγής ΤΕΕ

Γενικά, η ανάπτυξη των μικροοργανισμών στη περιοχή της ριζόσφαιρας οφείλεται στο γεγονός ότι οι φυτικές ρίζες εκκρίνουν διάφορες ουσίες στο έδαφος. Μεταξύ των ουσιών αυτών συγκαταλέγονται σάκχαρα, αμινοξέα, οργανικά οξέα, τα οποία χρησιμοποιούνται από τους μικροοργανισμούς για την ανάπτυξη τους. Επίσης, εφήμερα κύτταρα των ριζών, όπως ριζικά τριχίδια ή συνεχώς αποβαλλόμενα κύτταρα από την αυξανόμενη ρίζα, αποτελούν υποστρώματα για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών.

Ο μικροβιακός πληθυσμός της ριζόσφαιρας διαφέρει από τον αντίστοιχο πληθυσμό που αναπτύσσεται μακριά από αυτήν. Οι διαφορές είναι τόσο ποιοτικές (είδος μικροοργανισμού), όσο και ποσοτικές (πυκνότητα του πληθυσμού). Έχει βρεθεί ότι η πυκνότητα και η ποιοτική σύνθεση του μικροβιακού πληθυσμού της ριζόσφαιρας ποικίλει ανάλογα με το είδος του φυτού και τις εδαφικές συνθήκες.

Η πυκνότητα του μικροβιακού πληθυσμού στη ριζόσφαιρα εκφράζεται με το λόγο των μικροοργανισμών ανά γραμμάριο εδάφους της ριζόσφαιρας, (R), προς τον αντίστοιχο αριθμό ανά γραμμάριο εδάφους μακριά από τις ρίζες (S). Ο λόγος αυτός που αναφέρεται ως R/S (Rhizosphere/Soil), έχει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 10 - 70 αλλά έχουν παρατηρηθεί και τιμές γύρω στα 150 - 200. Η αυξημένη μικροβιακή δραστηριότητα στην ριζόσφαιρα είναι ευνοϊκή, στις περισσότερες περιπτώσεις, για την ανόργανη θρέψη του φυτού καθώς και στην προστασία από παρασιτικές ασθένειες, λόγω έντονων ανταγωνιστικών σχέσεων μεταξύ των μικροοργανισμών.

Διάσπαση ξενοβιοτικών ουσιών στη ριζόσφαιρα των φυτών

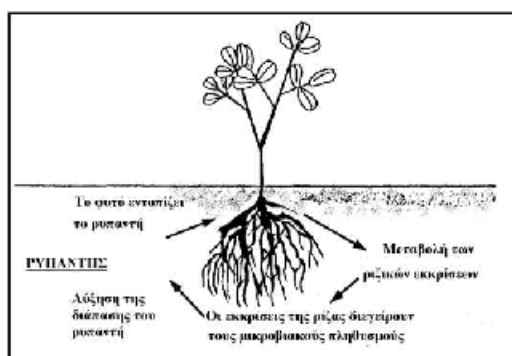
Η χρησιμοποίηση του συστήματος φυτού-μικροοργανισμών της ριζόσφαιρας στην τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης, παρουσιάζει έντονο πρακτικό και ερευνητικό ενδιαφέρον, για την insitu επεξεργασία ρυπασμένων εδαφών και υπογείων υδάτων. Από τις αρχές της δεκαετίας του '70, διάφορες αναφορές παρουσιάζουν την ικανότητα που έχουν τα φυτά να εντείνουν τη διάσπαση οργανικών ουσιών στην περιοχή της ριζόσφαιρας. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οργανικές ουσίες που διασπώνται από βακτήρια, στην περιοχή της ριζοσφαιρας.

Οι γνώσεις για τους μηχανισμούς με τους οποίους τα φυτά εντείνουν τη δράση των μικροοργανισμών της ριζόσφαιρας για τη διάσπαση ξενοβιοτικών ουσιών, είναι πολύ περιορισμένες.

Βακτήριο (γένος)	Υπόστρωμα
Achromobacter	Υδρογονάνθρακες, (BTXE)
Acinetobacter	Υδρογονάνθρακες
Alcaligenes	Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες
Azotobacter	Υδρογονάνθρακες
Nitrosomonas	Αρωματικοί υδρογονάνθρακες
Nocardia	Αρωματικοί υδρογονάνθρακες
Pseudomonas	Υδρογονάνθρακες
Xanthobacter	Αλιφατικές ενώσεις

Πίνακας 5, Οργανικές ουσίες που διασπώνται από βακτήρια στη περιοχή της ριζόσφαιρας, πηγή: Ζαμπετάκης, Λ., Μάνιο, Θ., Καρατζάς,Γ. [2005] Καινοτομικές μέθοδοι εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπογείων υδάτων. Η τεχνολογία της Φωτοεξυγίανσης. Πρακτικά συνεδρίου Heleco '05, Αθήνα. Φορέας διεξαγωγής ΤΕΕ

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται υποθετικός μηχανισμός σύμφωνα με τον οποίο ο μικροβιακός πληθυσμός της ριζόσφαιρας επηρεάζεται από το φυτό. Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, η ξενοβιοτική ουσία στο έδαφος εντοπίζεται από το φυτό το οποίο αντιδρά μεταβάλλοντας την ποσότητα και την ποιότητα των εκκρίσεων μέσω του ριζικού συστήματος. Αυτή η τροποποίηση του εδαφικού περιβάλλοντος έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των μικροβιακών κυττάρων και μάλιστα εκείνου του είδους το οποίο έχει την ικανότητα να διασπά τον ρυπαντή. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την μείωση της συγκέντρωσης του ρυπαντή σε αποδεκτές, από το φυτό, συγκεντρώσεις.



Εικόνα2.5, Υποθετικός μηχανισμός σύμφωνα με τον οποίο, η παρουσία του φυτού επηρεάζει την μικροβιακή δραστηριότητα, πηγή: Ζαμπετάκης, Λ., Μάνιο, Θ., Καρατζάς,Γ. [2005] Καινοτομικές μέθοδοι εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπογείων υδάτων. Η τεχνολογία της Φωτοεξυγίανσης. Πρακτικά συνεδρίου Heleco '05, Αθήνα. Φορέας διεξαγωγής ΤΕΕ

Τα φυτά ως υπερσυσσωρευτές βαρέων μετάλλων

Η τεχνολογία της Φυτοεξυγίανσης ανόργανων ρυπαντών εστιάζεται κυρίως στην επεξεργασία βαρέων μετάλλων και ραδιονουκλιδίων. Η Φυτοεξυγίανση βαρέων μετάλλων στηρίζεται στη χρησιμοποίηση φυτών τα οποία έχουν την ικανότητα να συσσωρεύουν υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων στη βιομάζα τους ως και 100 φορές περισσότερο σε σχέση με άλλα φυτά. Τα φυτά αυτά ονομάζονται υπερσυσσωρευτές (hyperaccumulators). Στον παρακάτω πίνακα 1.4 παρουσιάζεται ο αριθμός των γνωστών μέχρι σήμερα υπερσυσσωρευτών για 8 βαρέα μέταλλα καθώς και η φυτικές οικογένειες στις οποίες ανήκουν.

Η έρευνα σχετικά με την επεξεργασία ραδιενεργών ουσιών παρουσιάζει ενθαρρυντικά αποτελέσματα παρά το γεγονός ότι δεν έχουν αναφερθεί φυτά τα οποία έχουν την ικανότητα να συσσωρεύουν υψηλές συγκεντρώσεις ραδιονουκλεοτιδίων στη βιομάζα τους. Ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στην επεξεργασία ραδιενεργού ^{137}Cs και ^{90}Sr τα οποία παρουσιάζουν παρόμοια ατομική δομή με το K και το Ca αντίστοιχα, στοιχεία τα οποία προσλαμβάνονται σε μεγάλες ποσότητες από τα φυτά. Σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με το φυτό *Helianthus annuus* διαπιστώθηκε ότι η παρουσία του φυτού μείωσε σημαντικά τη συγκέντρωση ραδιενεργού ουρανίου σε υδατικό διάλυμα.

Βαρέα μέταλλα	No.	Οικογένεια
Κάδμιο (Cd)	1	Brassicaceae
Κοβάλτιο (Co)	26	Lamiaceae, Scrophulariaceae
Χαλκός (Cu)	24	Cyperaceae, Lamniaceae, Poaceae, Scrophulariaceae
Μαγγάνιο (Mn)	11	Apocynaceae, Cunoniaceae, Proteaceae
Νικέλιο (Ni)	290	Brassicaceae, Violaceae, Cunoniaceae, Proteaceae
Σελήνιο (Se)	19	Fabaceae
Θάλλιο (Tl)	1	Brassicaceae

Πίνακας 6, Αριθμός γνωστών υπερσυσσωρευτών για 8 βαρέα μέταλλα και οι οικογένειες στις οποίες απαντώνται πιο συχνά, πηγή: Ζαμπετάκης, Λ., Μάνιο, Θ., Καρατζάς,Γ. [2005] Καινοτομικές μέθοδοι εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπογείων υδάτων. Η τεχνολογία της Φωτοεξυγίανσης. Πρακτικά συνεδρίου Heleco '05, Αθήνα. Φορέας διεξαγωγής ΤΕΕ

Σχεδιασμός συστημάτων φυτοεξυγίανσης

Ο σχεδιασμός των συστημάτων της Φυτοεξυγίανσης ποικίλει ανάλογα με το είδος του ρυπαντή και το επιθυμητό επίπεδο μείωσης της συγκέντρωσης του, τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες και από τα φυτά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Για την εφαρμογή της τεχνολογίας της Φυτοεξυγίανσης αποτελεί κοινή πρακτική η πραγματοποίηση προκαταρκτικών εργαστηριακών ερευνών. Στόχος των ερευνών αυτών είναι να αποφασιστεί η χρήση των βιολογικών διαδικασιών της Φυτοεξυγίανσης απατώντας σε ερωτήσεις σχετικά με την βιοαποικοδόμηση των ρυπαντών, το ποσοστό βιοδιαθεσιμότητας τους στο έδαφος και το υπόγειο νερό και τέλος τον καθορισμό των βέλτιστων συνθηκών για την ανάπτυξη των φυτών. Γενικά, οι παράμετροι σχεδιασμού διαφέρουν ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται. Παρ'όλα αυτά είναι δυνατόν να προσδιοριστούν ορισμένοι παράμετροι σχεδιασμού, οι οποίοι είναι κοινοί σε όλες τις περιπτώσεις εφαρμογής της τεχνολογίας της Φυτοεξυγίανσης.

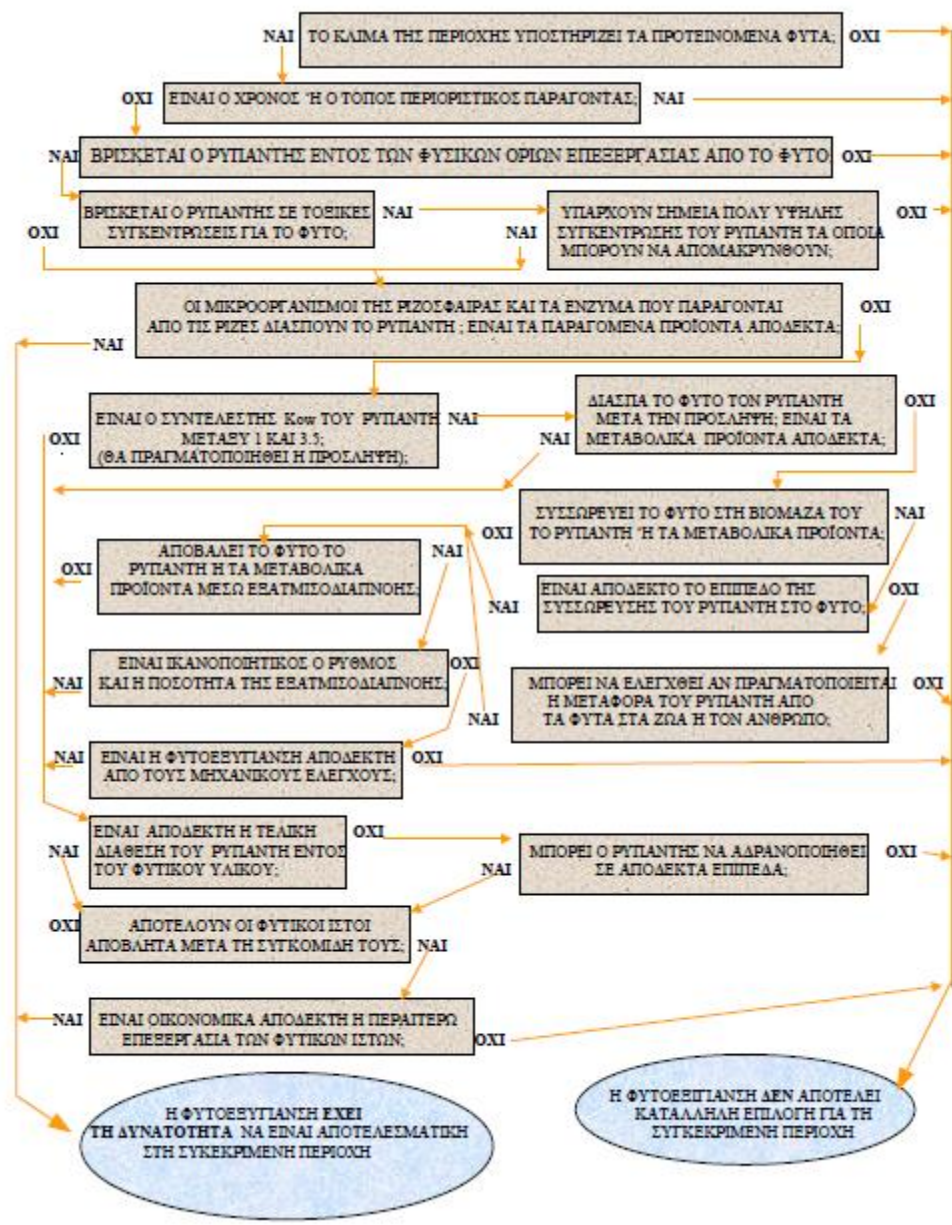
Οι παράμετροι σχεδιασμού είναι οι ακόλουθοι:

1. **Προσδιορισμό του επιπέδου της ρύπανσης:** Κατά το σχεδιασμό του συστήματος Φυτοεξυγίανσης, πρέπει να προσδιοριστεί το είδος και η συγκέντρωση των ρυπαντών καθώς και το βάθος στο οποίο εκτείνεται η ρύπανση. Στην περίπτωση οργανικών ρυπαντών θα πρέπει να υπάρχουν στοιχεία για τη δομή τους, τη λιποφιλικότητα τους ($\log K_{ow}$) καθώς και για τις ιδιότητες προσρόφησης τους.
2. **Επιλογή του φυτικού υλικού:** Τα φυτά τα οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθούν επιλέγονται με βάση τον επιθυμητό μηχανισμό Φυτοεξυγίανσης και το είδος του ρυπαντή. Στην περίπτωση του φυτομετασχηματισμού οργανικών ρυπαντών και της φυτοεξαγωγής βαρέων μετάλλων τα φυτά πρέπει να παρουσιάζουν γρήγορο ρυθμό ανάπτυξης, υψηλούς ρυθμούς εξατμισοδιαπνοής αρκετά βαθύ ριζικό σύστημα για την περίπτωση υπογείων υδάτων και να μετατρέπουν το ρυπαντή σε μη τοξικά παράγωγα.
3. **Έλεγχος της δυνατότητας χρησιμοποίησης των επιλεγμένων φυτών (Treatability tests):** Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται έλεγχος της τοξικότητας των ρυπαντών καθώς και προϊόντων που προκύπτουν από την εφαρμογή της Φυτοεξυγίανσης. Σε εργαστηριακά πειράματα εφαρμόζονται διαφορετικές συγκεντρώσεις του ρυπαντή στα προτεινόμενα φυτικά είδη και μελετώνται τα παραγόμενα προϊόντα του μεταβολισμού.
4. **Συντήρηση του συστήματος της Φυτοεξυγίανσης:** Η συντήρηση του συστήματος της Φυτοεξυγίανσης περιλαμβάνει την άρδευση των φυτών, προσθήκη κατάλληλων λιπασμάτων για τη γρήγορη ανάπτυξη τους και

σε ορισμένες περιπτώσεις την αντιμετώπιση βιολογικών εχθρών των φυτών.

5. **Συγκομιδή του φυτικού υλικού:** Όταν τα φυτά συσσωρεύσουν τον ρυπαντή πρέπει να πραγματοποιηθεί η συγκομιδή και η απομάκρυνση τους από την περιοχή. Η περαιτέρω επεξεργασία του φυτικού υλικού εξαρτάται από τη φύση των παραγόμενων προϊόντων μεταβολισμού καθώς και από την συγκέντρωσή τους στα φυτικά κύτταρα. Στην περίπτωση οργανικών ρυπαντών που διασπώνται σε μη τοξικές ουσίες δεν είναι απαραίτητη η περαιτέρω επεξεργασία του φυτικού υλικού. Στην περίπτωση που πραγματοποιείται σημαντική συσσώρευση στην περιοχή της ρίζας, τότε είναι απαραίτητη η περαιτέρω επεξεργασία των φυτικών ιστών. Η πιο συνηθισμένη διαδικασία επεξεργασίας του φυτικού υλικού είναι η ελεγχόμενη καύση (controlled incineration). Άλλες μέθοδοι που εφαρμόζονται είναι η κομποστοποίηση (composting) καθώς και διάθεση σε χωματερές (landfilling).

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής για την εφαρμογή της τεχνολογίας της Φυτοεξυγίανσης σε ρυπασμένα εδάφη και υπόγεια νερά. Από το διάγραμμα αυτό γίνεται αντιληπτό, ότι η εφαρμογή της τεχνολογίας της Φυτοεξυγίανσης πραγματοποιείται υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, οι οποίες καθορίζονται με τη βοήθεια εργαστηριακών αλλά και πιλοτικών περαμάτων στην περιοχή με το ρυπασμένο έδαφος. Το κόστος των ερευνών αυτών σε χρόνο και σε χρήμα, εμπεριέχονται στο ολικό κόστος της τεχνολογίας της Φυτοεξυγίανσης. Σίγουρα όμως είναι μικρότερο από το κόστος που θα είχε η εφαρμογή λανθασμένης τεχνικής Φυτοεξυγίανσης.



Διάγραμμα 2, Διάγραμμα ροής για την εφαρμογή της τεχνολογίας της Φυτοεξυγίανσης, πηγή: Ζαμπετάκης, Λ., Μάνιο, Θ., Καρατζάς,Γ. [2005] Καινοτομικές μέθοδοι εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπογείων υδάτων. Η τεχνολογία της Φυτοεξυγίανσης. Πρακτικά συνεδρίου Heleco '05, Αθήνα. Φορέας διεξαγωγής ΤΕΕ

Αξιολόγηση της τεχνολογίας της φυτοεξυγίανσης

Η Φυτοεξυγίανση αποτελεί μια αρκετά καινοτόμα τεχνολογία, η οποία συνδυάζει το χαμηλό κόστος οργάνωσης και λειτουργίας με τη δυνατότητα επεξεργασίας των ρυπαντών. Όσον αφορά το κόστος της Φυτοεξυγίανσης δεν υπάρχει επαρκής βιβλιογραφία ή δημοσιεύσεις από πανεπιστημιακά ιδρύματα ή κυβερνητικούς οργανισμούς, οι οποίες πραγματοποιούν συγκρίσεις με συμβατικές φυσικοχημικές διεργασίες επεξεργασίας. Τα περισσότερα στοιχεία είναι διαθέσιμα από ιδιωτικές εταιρείες.

Η Φυτοεξυγίανση για παράδειγμα, ρυπασμένων εδαφών με οργανικές ουσίες παρουσιάζει κόστος της τάξεως των 74-150 €ανά κυβικό μέτρο εδάφους ενώ για τις συμβατικές τεχνολογίες (κυρίως καύση και απόθεση σε χωματερές) το αντίστοιχο κόστος κυμαίνεται από 260-740€ανά κυβικό μέτρο. Αντίστοιχες διαφορές παρουσιάζονται και στην περίπτωση της εξυγίανσης ρυπασμένων υδροφορέων με οργανικές ουσίες. Συμβατικές τεχνολογίες όπως η άντληση και επεξεργασία (pumpandtreat), η εφαρμογή φραγμάτων σιδήρου (ironreactivebarrier), παρουσιάζουν κόστος της τάξεως των 7,4–11€ανά 1000 γαλόνια επεξεργασμένου νερού, ενώ το αντίστοιχο κόστος της Φυτοεξυγίανσης κυμαίνεται από 0,74–2,2€ανά 1000 γαλόνια.

Σημαντική είναι η συμβολή της Φυτοεξυγίανσης και στην επεξεργασία βαρέων μετάλλων, όπου τα στοιχεία τα οποία υπάρχουν είναι πολύ ενθαρρυντικά. Η αδυναμία ακριβούς καθορισμού του κόστους της Φυτοεξυγίανσης αντικατοπτρίζει τη μοναδική περίπτωση που αποτελεί η κάθε ρυπασμένη περιοχή, με βάση τις φυσικοχημικές και υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της τεχνικής της Φυτοεξυγίανσης είναι ότι έχει τη δυνατότητα να επιτυγχάνει την επεξεργασία των ρυπαντών σε απλούστερες και λιγότερο τοξικές ενώσεις. Οι περισσότερες από τις συμβατικές τεχνολογίες, όπως προσρόφιση σε ενεργό άνθρακα, απόθεση σε χωματερές, καθίζηση, απλά μεταφέρουν τους ρυπαντές σε άλλη περιοχή ή άλλη φάση. Αλλά πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα *in situ* επεξεργασίας χωρίς να προκαλεί περιβαλλοντικές διαταραχές με αποτέλεσμα να μην παρεμποδίζει τη λειτουργία εμπορικών ή βιομηχανικών δραστηριοτήτων, η αποδοχή της από την κοινή γνώμη και η δυνατότητα ανάκτησης των συσσωρευμένων στη φυτική βιομάζα, βαρέων μετάλλων, διαδικασία γνωστή ως Phytomining.

Στα μειονεκτήματα της Φυτοεξυγίανσης συγκαταλέγονται η δυσκολία πρόβλεψης της απόδοσης της, η εφαρμογή της σε σχετικά περιορισμένο βάθος ρύπανσης, η μεγάλη χρονική διάρκεια που απαιτείται για την ολοκλήρωση της, η εξάρτηση της από της φυσικοχημικές και περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής και τέλος η αρκετά συχνά μη επιτυχής μετάβαση από τις

εργαστηριακές έρευνες στις επικρατούσες συνθήκες στην περιοχή της ρύπανσης.⁶

2.1.2 Μέθοδος άντλησης και απορρύπανσης διαλυμένων ρυπαντών (pumpand treat)

Σε περιπτώσεις όπου η ρύπανση του εδάφους έχει προχωρήσει έως τα υπόγεια ύδατα και οι ρυπαντικές ουσίες είναι προσμείξεις οργανικών με ανόργανων ουσιών είναι δυνατή η άντληση τους από τον υδροφόρο ορίζοντα στην επιφάνεια του εδάφους. Τα επεξεργασμένα υπόγεια ύδατα μπορούν είτε να επιστραφούν στον υδροφόρο ορίζοντα είτε να χρησιμοποιηθούν ή ακόμα και να απορριφθούν. Η μέθοδος επεξεργασίας τους εξαρτάται από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του το της ρυπαντικής ουσίας που απομακρύνθηκε. Αυτή η μέθοδος είναι μέθοδος άντλησης και απορρύπανσης διαλυμένων ρυπαντών (Pump and Treat -PAT).

Ο σχεδιασμός του συστήματος αυτού (P&T) έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Περιέχει και ελέγχει υδραυλικά την κυκλοφορία των μολυσμένων υδάτων αποτρέποντας την επέκταση της μόλυνσης ζώνης.
- Μειώνει τη συγκέντρωση του ρυπαντή ώστε να συμμορφωθεί η συγκέντρωση με τις προκαθορισμένες τιμές και να αποκαταστήσει τον υδροφόρο ορίζοντα.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι ότι οι συμβατικές τεχνολογίες για νερό και επεξεργασία των λυμάτων μπορούν να εφαρμόζονται για την απορρύπανση

αντλούμενων υπόγειων υδάτων. Η βέλτιστη απόσταση των γεωτρήσεων απορρύπανσης είναι συνάρτηση της ταχύτητας ροής του υπόγειου νερού αλλά και ο όγκος του, το πάχος του υδροφόρου, της μεταβιβαστικότητας, του συνολικού αριθμού γεωτρήσεων και της παροχής



Εικόνα2.5, Τεχνολογία άντλησης και απορρύπανσης διαλυμένων ρυπαντών, πηγή: <http://www.epa.gov>, επίσκεψη 10/09/2011

⁶Brennan, M. A., and Shelley, M. L. (1999). A model of uptake, translocation and accumulation of lead by maize for the purpose of phytoextraction. Ecological Engineering, Vol. 2, pp. 271-297.

άντλησης καθεμιάς εξ' αυτών. Ο συνδυασμός γεωτρήσεων άντλησης-έκχυσης (εμπλουτισμού) δίνει καλύτερα αποτελέσματα, ιδιαίτερα όταν διατάσσονται κατάλληλα (εικόνα 2.6). Η πλέον αποτελεσματική διάταξη είναι αυτή στην οποία υπάρχουν δύο γεωτρήσεις άντλησης και μία γεώτρηση έκχυσης στο μέσο των δύο πρώτων, όλες σε ευθεία γραμμή (κεντροαξονική διάταξη). Επίσης, αυξάνεται σημαντικά η αποτελεσματικότητα αυτού του συστήματος όταν συνδυάζεται με μέτρα για την απομόνωση και απομάκρυνση του ρυπαντή ώστε να αποφευχθεί η περεταίρω εισροή του στα υπόγεια ύδατα.

Η τεχνολογία αυτή αν και είναι επιλέγεται πολύ συχνά δεν είναι πάντα τόσο αποτελεσματική καθώς εμφανίζει κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Κατ' αρχάς, η αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας αυτής εξαρτάται άμεσα από τη φύση του ρυπαντή ενώ επηρεάζεται σημαντικά από τα κατώτερα στρώματα του εδάφους. Σύμφωνα με έρευνα που έγινε ο βαθμός δυσκολίας απορρύπανσης του υδροφόρου ορίζοντα εξαρτάται από το αν τα στρώματα του υπεδάφους είναι κατακερματισμένα, ή ανομοιογενή ή ομοιογενή σε ένα ή πολλά επίπεδα.

Επιπλέον, το κόστος της τεχνολογίας εξαρτάται από τη χρονική διάρκεια που απαιτείται για την απορρύπανση συνεπώς μπορεί να είναι τόσο ψηλό ώστε να απαγορεύει την εφαρμογή της. Μια τέτοια διεργασία μπορεί να κοστίσει από 36.000 ευρώ έως και 3,6 εκατομμύρια ευρώ. Σημαντικός παράγοντας αποτελεί επίσης για την αποτελεσματικότητα η χρονική στιγμή όπου θα εντοπιστεί η ρύπανση. Εάν εντοπιστεί σε προχωρημένο στάδιο και ο ρυπαντής έχει επεκταθεί σημαντικά τότε μειώνεται η αποτελεσματικότητα.

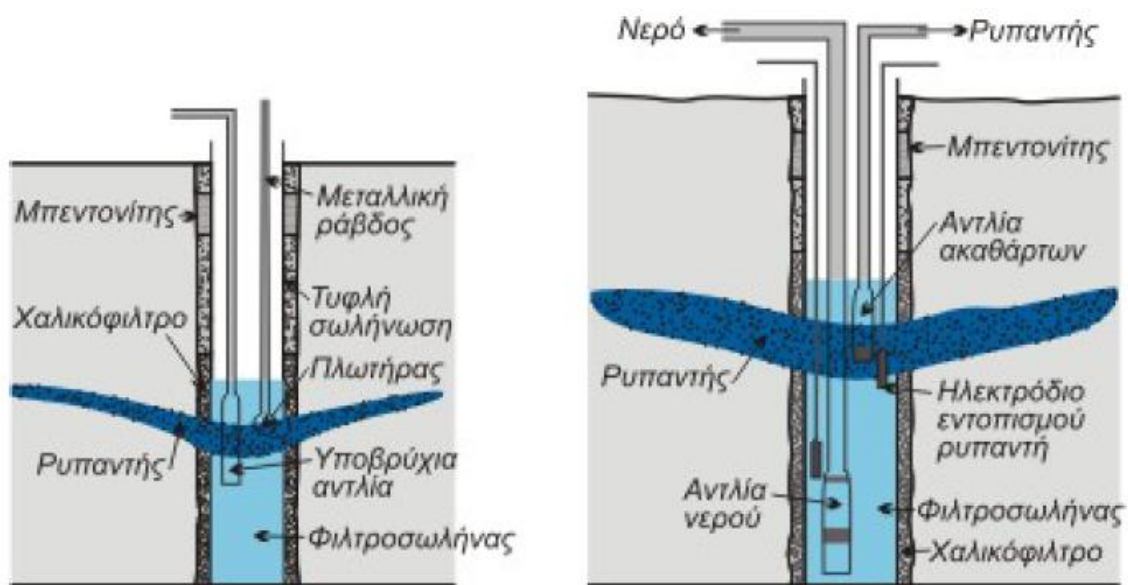
Αξίζει να σημειωθεί ότι πρόκειται επίσης για μια αρκετά μακροχρόνια διαδικασία καθώς η προσρόφηση μπορεί να διαρκέσει ακόμα και χιλιάδες χρόνια. Έχει παρατηρηθεί επίσης, ότι οι περιοχές όπου εφαρμόστηκε αυτή η μέθοδος οι συγκεντρώσεις των ρύπων δεν έχουν επανέλθει στις πρότυπες τιμές γεγονός ιδιαίτερα αποθαρρυντικό.

Τελειώνοντας, κάποια είδη ρυπαντών τα οποία δεν είναι σε υδατική φάση και δεν μπορούν να αναμειχθούν με το νερό, μπορούν όμως να απορροφηθούν και παρά την άντληση τους να συνεχιστεί η ρύπανση του εδάφους και των υπόγειων υδάτων. Αυτοί οι ρυπαντές ονομάζονται nonaqueous-phase liquids (NAPLs), χαρακτηριστικός ρυπαντής που ανήκει σε αυτή την κατηγορία αποτελεί το λάδι. Στις περισσότερες περιπτώσεις που εφαρμόστηκε αυτή η μέθοδος πάνω από τα 2/3 του ρυπαντή δεν απομακρύνθηκαν από τον υδροφόρο ορίζοντα.⁷

⁷ Voudrias E., [2001] Pump-Ana-Treat remediation of groundwater contaminated by hazardous waste: can it really be achieved?. Global Nest: the Int. J. Vol 3, No 1, pp 1-10

http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA_9.pdf

Moyers R., Nichols J. and Whitlock I. [1997] Disadvantages of Pump and Treat Remediation (<http://www.cee.vt.edu/ewr/environmental/teach/gwprimer/Pumptrt/Pumptrt.html>)



Εικόνα 2.6, Σύστημα «άντλησης-επεξεργασίας» για την ανάκτηση NAPL, γεώτρηση με μια και με διπλή αντλία, πηγή: http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA_9.pdf, επίσκεψη 10/09/2011

2.1.3 Αεροδιαχωρισμός (airstripping)

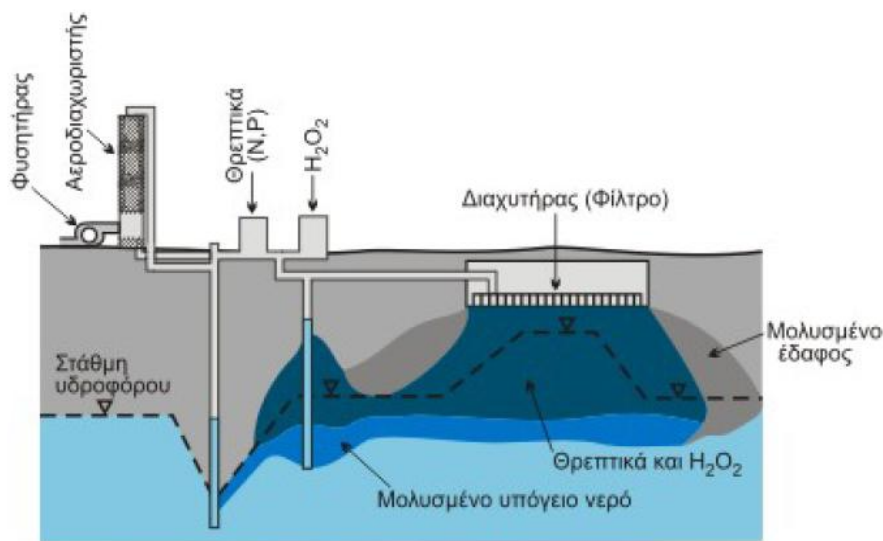
Ο αεροδιαχωρισμός αποτελεί μια τεχνολογία στην οποία πτητικές οργανικές ενώσεις διαχωρίζονται από τα υπόγεια ύδατα αυξάνοντας την επιφάνεια των μολυσμένων υδάτων που έρχεται σε επαφή με τον αέρα. Οι τύποι της μεθόδου του αερισμού περιλαμβάνουν ειδικούς πύργους, διάχυτο αερισμό, δοχείο αερισμού, καθώς και σύστημα εκτόξευσης αερισμού (spray). Η νοοτροπία αυτής της μεθόδου είναι η μαζική μεταφορά του ρυπαντή από το νερό στον αέρα. Για το λόγο αυτό υπάρχει αυξημένο ρίσκο να μολυνθεί η ατμόσφαιρα, συνεπώς αυτή η διαδικασία θα πρέπει να γίνεται πολύ προσεχτικά.

Φύκια, μύκητες, βακτήρια και άλλα σωματίδια είναι πιθανό να γεμίσουν τον εξοπλισμό εμποδίζοντας τη λειτουργία του γι' αυτό απαιτείται μια προεργασία ή ένας συστηματικός καθαρισμός του συστήματος.

Η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική μόνο για ύδατα που έχουν μολυνθεί από πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC) ή ημι-πτητικές συγκεντρώσεις. Ενώσεις με χαμηλή πτητικότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μπορεί να απαιτήσει προθέρμανση των υπόγειων υδάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η μέθοδος δημιουργεί οπτική όχληση χωροθετούνται σε κατοικήσιμη περιοχή.

Περιορισμοί τεχνολογίας:

- Πιθανή ύπαρξη ανόργανων ουσιών (π.χ. σίδηρο περισσότερο από 5ppm) η οποία κάνει επιτακτική την ανάγκη για συστηματικό καθαρισμό ή προεργασία
- Αποτελεσματικότητα τεχνολογίας μόνο όταν ο ρυπαντής είναι πτητική ουσία με συγκέντρωση μεγαλύτερη του 0.01 σύμφωνα με την κλίμακα του Henry⁸
- Απαιτείται μεγάλη ποσότητα ενέργειας άρα το κόστος είναι υψηλό⁹



Εικόνα 2.7, Μέθοδος βιοαποκατάστασης με αεροδιαχωρισμό, πηγή: Καββάδας Μ., Πανταζίδου Μ. [2007] «Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής», Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

2.1.4 Βιολογική αποκατάσταση (bio-remediation)

Βιολογική αποκατάσταση ονομάζεται η μέθοδος κατά την οποία πραγματοποιείται μια διαδικασία η οποία χρησιμοποιεί μικροοργανισμούς (βακτήρια, μύκητες κλπ) ή τα ένζυμα τους για να επαναφέρουν το περιβάλλον στην αρχική του κατάσταση απομακρύνοντας τους ρύπους. Οι μικροοργανισμοί

⁸ Ο νόμος του Henry είναι ένα μέτρο που δηλώνει το βαθμό που μια χημική ουσία ξεχωρίζει μεταξύ του νερού και του αέρα. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή, τόσο πιο πιθανό είναι οι ουσίες να εξατμιστούν αντί να παραμείνουν στο νερό. (<http://www.cpeo.org/techtree/glossary/H.htm#Henry%27s%20Law>, επίσκεψη 10/09/2011)

⁹ Καββάδας Μ., Πανταζίδου Μ. [2007] «Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής», Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-46.html>

αποσυνθέτουν τις οργανικές ενώσεις χρησιμοποιώντας ως καταλύτες κατάλληλα ένζυμα (πρωτεΐνες) τα οποία παράγουν οι ίδιοι. Το τελικό προϊόν της αποσύνθεσης των οργανικών ουσιών μέσω των μικρό-οργανισμών είναι ανόργανες ουσίες (διοξείδιο του άνθρακα και νερό) που συνήθως θεωρούνται λιγότερο επιβλαβείς από τις αρχικές ενώσεις, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις ατελούς αποσύνθεσης παράγονται και άλλες απλές ενώσεις όπως μεθάνιο, υδρόθειο, νιτρικά και θειικά άλατα.

Για να συντελεσθεί η αποσύνθεση των οργανικών ουσιών μέσω μικροοργανισμών απαιτούνται οι εξής προϋποθέσεις:

- Ø Η παρουσία κατάλληλων μικροοργανισμών, δηλαδή μικροοργανισμών που παράγουν ένζυμα κατάλληλα για τον μεταβολισμό της συγκεκριμένης οργανικής ουσίας.
- Ø Η παρουσία οργανικών ουσιών οι οποίες με την αποσύνθεσή τους θα παράσχουν
- Ø την απαιτούμενη ενέργεια στους μικροοργανισμούς για να αναπτυχθούν.
- Ø Η παρουσία θρεπτικών ουσιών (nutrients), όπως το άζωτο, ο φωσφόρος, το κάλιο, το θείο κλπ. που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών.
- Ø Η παρουσία δεκτών ηλεκτρονίων (electron acceptors), δηλαδή ατόμων ή ριζών τα οποία δέχονται τα ηλεκτρόνια που προκύπτουν κατά την οξειδωση των οργανικών ουσιών.
- Ø Η παρουσία κατάλληλων συνθηκών για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών και συγκεκριμένα:
 - ο κατάλληλη υγρασία, 50-70%
 - ο θερμοκρασία, μεταξύ 0-40 °C
 - ο pH, μεταξύ 6,5-7,5
 - ο οξυγόνο, σε επαρκή ποσότητα ώστε να επιτευχθεί η αερόβια βιοαποκατάσταση
 - ο απουσία ορισμένων χημικών ουσιών σε συγκεντρώσεις που είναι τοξικές για τους μικροοργανισμούς (και τους καταστρέφουν).¹⁰

Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντιμετωπιστούν συγκεκριμένοι ρύποι όπως χλωριούχα ζιζανιοκτόνα που έχουν υποβαθμιστεί από βακτήρια και γενικότερα σε περιπτώσεις πετρελαιοκηλίδας. Σε αυτή βέβαια την περίπτωση χρησιμοποιούνται πολλαπλές τεχνικές συμπεριλαμβάνοντας λιπάσματα για να διευκολύνουν την αποσύνθεση του αργού πετρελαίου από βακτήρια.

Παρ' όλα αυτά δεν είναι δυνατό να αντιμετωπιστούν όλες οι ρυπαντικές ουσίες με τη μέθοδο της βιοαποκατάστασης, για παράδειγμα τα βαρέα μέταλλα όπως το κάδμιο και το μόλυβδο δεν είναι εύκολο να απορροφηθούν ή να «πιαστούν» από μικροοργανισμούς. Η ενσωμάτωση των μετάλλων όπως ο

¹⁰<http://www.pollutionissues.com/A-Bo/Bioremediation.html>, επίσκεψη 10/09/2011

υδράργυρος στην τροφική αλυσίδα μπορούν να κάνουν πράγματα χειρότερα ως οργανισμοί που βιοσυσσωρεύονται τα μέταλλα αυτά.

Ωστόσο, η μέθοδος της βιολογικής αποκατάστασης έχει κάποια πλεονεκτήματα, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν πολύτιμο αρωγό σε περιοχές όπου δεν μπορεί να επιτευχθεί η βιοαποκατάσταση εύκολα χωρίς εκσκαφές. Για παράδειγμα, η διαρροή υδρογονάνθρακα (π.χ. βενζίνης) μπορεί να μολύνει τα υπόγεια ύδατα και κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Εισάγοντας τους κατάλληλους οργανισμούς σε συνδυασμό με ενώσεις οξυγόνου μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της συγκέντρωσης του ρύπου μετά από ένα χρονικό διάστημα. Αυτή η διαδικασία είναι σαφώς πιο οικονομική από την εκσκαφές και μειώνει έως και εξαλείφει την ανάγκη για άντληση και θεραπεία, την πιο διαδεδομένη μέθοδο για περιοχές όπου έχουν μολυνθεί από υδρογονάνθρακες.

Η βιολογική απορρύπανση εδαφών έχει εφαρμοσθεί με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα στην αποσύνθεση πολυαρωματικών υδρογονανθράκων (poly-aromatic hydrocarbons, PAH) πετρελαιοειδών και άλλων οργανικών ενώσεων. Η μέθοδος είναι αποτελεσματική για την απορρύπανση εδαφών πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα (δηλαδή στη μερικώς κορεσμένη ζώνη), επειδή στα κορεσμένα εδάφη δεν είναι ευχερής ο αερισμός και συνεπώς ευνοούνται συνθήκες αναερόβιας αποσύνθεσης που γενικώς δεν είναι επιθυμητή. Επίσης, η μέθοδος είναι αρκετά αποτελεσματική σε σχετικώς χονδρόκοκκα εδάφη επειδή και πάλι σε αυτά είναι ευχερής ο αερισμός (συνήθως χρησιμοποιείται σε εδάφη με διαπερατότητα $k > 10^{-3}$ cm/sec).

Η τεχνολογία της βιολογικής αποκατάστασης μπορεί να διαχωριστεί σε δυο κατηγορίες, την επιτόπου (in situ) βιοαποκατάσταση και την βιοαποκατάσταση στην περιοχή (ex situ). Στην In situ βιοαποκατάσταση «θεραπεύεται» ο ρύπος επιτόπου ενώ στην ex situ βιοαποκατάσταση απομακρύνεται ο ρύπος από κει που βρίσκεται ώστε να «θεραπευτεί». Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής της βιολογικής αποκατάστασης είναι οι αγροτικές εκτάσεις και η λιπασματοποίηση.

Η παρακολούθηση της αποδοτικότητας της μεθόδου αυτής γίνεται με έμμεσο τρόπο παρακολουθώντας τη μείωση της οξείδωσης ή τις αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στο έδαφος και τα υπόγεια ύδατα. Επίσης, με τη μέτρηση του pH, της θερμοκρασίας, τοξικότητα και της συγκέντρωσης προϊόντων που προέκυψαν από αντιδράσεις π.χ. διοξείδιο του άνθρακα. Η παρουσία δεκτών ηλεκτρονίων δείχνει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι τα ακόλουθα:

- Η βιολογική απορρύπανση απαιτεί γενικώς μακροχρόνια επεξεργασία που μπορεί να φθάσει σε ορισμένες

περιπτώσεις σταθερών ρύπων και τα 15-20 έτη. Επιπλέον, υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα ως προς τον απαιτούμενο χρόνο λόγω της εξάρτησης της δράσης των μικροοργανισμών από πολλούς παράγοντες.

- Όταν το έδαφος περιέχει πολλούς οργανικούς ρύπους, είναι πιθανόν οι πλέον τοξικοί για τον άνθρωπο να διασπώνται δυσκολότερα, και συνεπώς η απορρύπανση του εδάφους από τους ρύπους αυτούς να καθυστερήσει, λόγω ευχερέστερης διάσπασης των άλλων οργανικών ουσιών (οι οποίες όμως έχουν μικρότερο ενδιαφέρον από πλευράς ρυπαντικού φορτίου).

- Η μέθοδος είναι ευαίσθητη σε πολλούς παράγοντες (παρουσία δεκτών ηλεκτρονίων, θρεπτικών ουσιών, υγρασία, θερμοκρασία, pH κλπ), οι οποίοι θα πρέπει να ελέγχονται και να ρυθμίζονται διαρκώς ώστε να επιτυγχάνονται βέλτιστοι ρυθμοί δράσης των μικροοργανισμών και συνεπώς βέλτιστη απόδοση της βιολογικής αποδόμησης των ρύπων.

- Η μέθοδος είναι πρόσφορη για την αποδόμηση οργανικών κυρίως ρύπων, αν και ενίοτε χρησιμοποιείται και για την διάσπαση ανόργανων ουσιών (π.χ. την μετατροπή θεικών ριζών σε θειούχες με την επίδραση μικροοργανισμών).¹¹

2.1.5 Μέθοδος άντλησης επιπλεόντων ρυπαντών

Οι ελαφριοί ρύποι συνήθως κατακρατούνται στη μερικώς κορεσμένη ζώνη. Ωστόσο, όταν οι ρύποι αυτοί βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες διαφεύγουν στο υπόγειο νερό και δημιουργούν κηλίδες (plume). Η κηλίδα αυτή ακολουθεί τον υδροφόρο ορίζοντα μολύνοντας τον σε μεγάλη απόσταση από την πηγή. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται αρκετές φορές σε περιοχές όπου χωροθετούνται διυλιστήρια. Η έκταση αυτού του είδους της ρύπανσης μπορεί να εντοπιστεί μόνο με γεωτεχνικές έρευνες στο υπέδαφος.

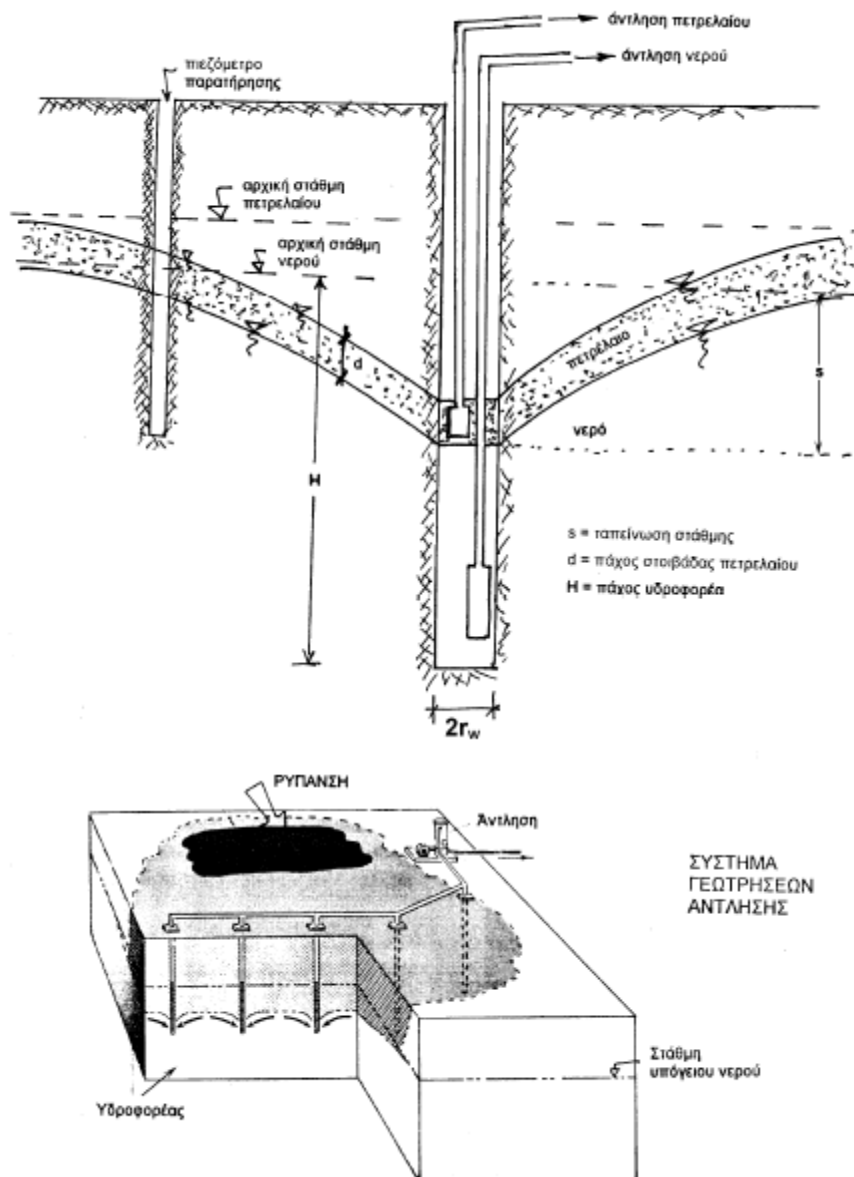
Για την απορρύπανση των επιπλεόντων ρυπαντών χρησιμοποιείται ένα σύστημα διπλής άντλησης (dualpumpfreeproductrecovery). Αρχικά γίνεται άντληση του νερού από τον υδροφόρο ορίζοντα μέσω γεώτρησης ώστε να δημιουργηθεί κώνος ταπείνωσης της στάθμης. Έτσι, ο επιπλέον ρύπος ακολουθεί την επιφάνεια του κώνου και κινείται προς τη γεώτρηση. Έπειτα, με τη χρήση της δεύτερης αντλίας αντλούνται οι ρύποι.

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής είναι ανάλογη των παροχών των δυο αντλιών. Σε κάθε περίπτωση όμως, θα πρέπει να γίνεται προσεχτική

¹¹ Καββάδας Μ., Πανταζίδου Μ. [2007] «Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής», Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
http://www.bionewsonline.com/w/what_is_bioremediation.htm

ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα ώστε να μην συγκροτούνται ρύποι στους πόρους του εδάφους.¹²

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η γεώτρηση που απαιτείται για την εφαρμογή της διαδικασίας αυτής καθώς και το σύστημα διπλής άντλησης. Η μια αντλία χρησιμοποιείται για την άντληση του νερού ενώ η δεύτερη για την άντληση του ρύπου δηλαδή του πετρελαίου όπως δείχνει το παράδειγμα στην εικόνα.



Εικόνα 2.8, Μέθοδος διπλής άντλησης για την απορρύπανση επιπλέοντων ρύπων, πηγή: Καββάδας Μ., Πανταζίδου Μ. [2007] «Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής», Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

¹² Καββάδας Μ., Πανταζίδου Μ. [2007] «Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής», Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
 Μαγκανάς Κ. [2004] «Εδαφική ρύπανση» (http://users.ntua.gr/mc05401/files/Soil_pollution.pdf)

2.1.6 Αφαίρεση βαρέων μετάλλων με εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος

Η απορρύπανση του εδάφους από βαρέα μέταλλα (υδράργυρος, μόλυβδος, κλπ) συνήθως γίνεται μέσω των μεθόδων φυσική εξασθένισης, με την προσρόφηση των ιόντων των βαρέων μετάλλων στην επιφάνεια των αργιλικών ορυκτών και την ακινητοποίησή τους. Η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική και κυρίως δεν έχει κόστος. Άλλη μια μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η απορρύπανση με εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος. Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι στις περιπτώσεις που εφαρμόστηκε αυτή η μέθοδος περίπου του 74% των ρυπαντικών ουσιών απομακρύνθηκε.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στα ηλεκτροκινητικά φαινόμενα τα οποία είτε με τον ένα είτε με τον άλλο τρόπο όλο και περισσότερο χρησιμοποιούνται στον τομέα της έρευνας τον τελευταίο αιώνα. Τα φαινόμενα αυτά συμβαίνουν όταν το έδαφος φορτίζεται με ηλεκτρισμό και έτσι προκαλούνται τα παρακάτω φαινόμενα:

- Ηλεκτροφόρηση: κίνηση των σωματιδίων του εδάφους στο πλαίσιο της υγρασίας του εδάφους ή των υπόγειων υδάτων
- Ηλεκτρο-ώσμωση: κίνηση της υγρασίας του εδάφους ή των υπόγειων υδάτων από την άνοδο στην κάθοδο
- Ηλεκτρόλυση: κίνηση των ιόντων και συμπλέγματα ιόντων στο εσωτερικό της υγρασίας του εδάφους ή των υπόγειων υδάτων

Εξ' αιτίας της ιδιαιτερότητας αυτή της μεθόδου, η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί όταν οι ρυπαντές είναι:

- Ανόργανα ανιόντα και κατιόντα
- Οργανικά καρβοξυλικά οξέα, φαινόλες
- Αλειφατικές και αρωματικές ενώσεις
- Απορρυπαντικά, φυτοφάρμακα

Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους:

1. In situ: τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται άμεσα στο έδαφος και επιτυγχάνεται η απορρύπανση με την ελάχιστη αναταραχή στην περιοχή.
2. Ex situ: η απορρύπανση γίνεται στην περιοχή βγάζοντας το μολυσμένο μέσο. Μπορεί να εφαρμοστεί από 2 έως και 7.400 m³
3. Ηλεκτροκινητικός φράχτης: χρησιμοποιεί μια αλυσίδα από ηλεκτροδίου ζεύγη που αναπτύσσονται στο έδαφος για να σταματήσει η

μετανάστευση των μολυσμένων υπογείων υδάτων από το σημείο που βρίσκεται η πηγή ρύπανσης

4. Ηλεκτροκινητικός βιο-φράχτης: εκτός από την αλυσίδα που προαναφέρθηκε, χρησιμοποιείται μια σειρά από φίλτρα με θρεπτικά στοιχεία η οποία τοποθετείται αντίθετα στα ηλεκτρόδια. Τα υπόγεια ύδατα μεταφέρουν τα διαλυμένα θρεπτικά στοιχεία στα ηλεκτρόδια. υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, τα φορτισμένα θρεπτικά στοιχεία διασκορπίζονται ομοιογενώς μεταξύ των ηλεκτροδίων ενισχύοντας την βιοαποικοδόμηση.¹³

2.1.7 Φυσική εξασθένησης της ρύπανσης

Σε ορισμένες περιπτώσεις οι φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή όπου εντοπίζονται οι ρύποι μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στην αφαίρεση των ρυπαντών χωρίς καμία ανθρώπινη παρέμβαση. Στην αφαίρεση των ρυπαντών μπορεί να συμπεριλαμβάνεται η αραίωση, η ραδιενεργός διάσπαση η ρόφηση, η πτητικοποίηση, φυσικές και χημικές αντιδράσεις. Όλα αυτά μπορούν είτε να σταθεροποιήσουν, είτε να καταστρέψουν ή ακόμα και να μετατρέψουν τους ρυπαντές. Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν γίνεται φυσική εξασθένηση της ρύπανσης.¹⁴

2.1.8 Διαπερατά αντιδραστικά διαφράγματα

Τα διαπερατά αντιδραστικά διαφράγματα αποτελούν μια *in situ* μεθοδολογία. Αποτελούνται από μια ζώνη από ενεργά υλικά τα οποία τοποθετούνται στο μολυσμένο υδροφόρο ορίζοντα έτσι ώστε οι συγκεντρώσεις από τους διαλυμένους ανόργανους ρύπους να μειώνονται. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς το νερό περνάει από το διάφραγμα όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Το διάφραγμα μπορεί να τοποθετηθεί απ' ευθείας στο υπέδαφος κατασκευάζοντας ένα αυλάκι.

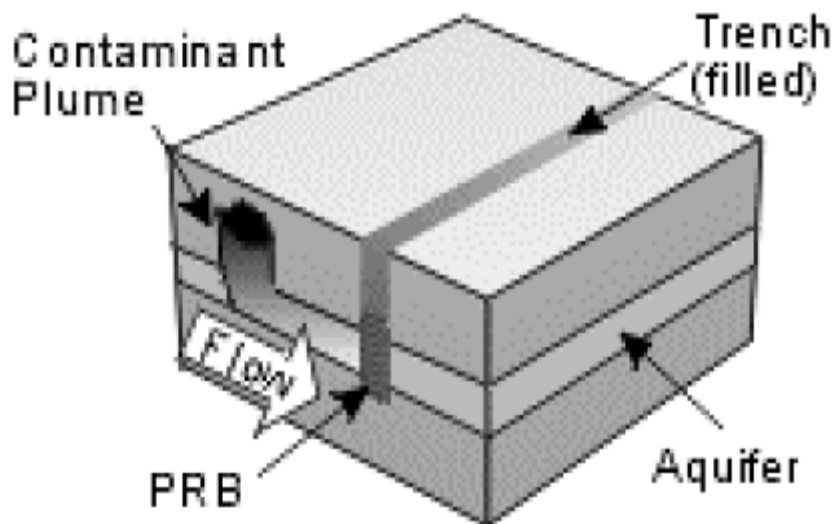
¹³Reinout L., Wieberen P. and Geert S.[1984], Electro-reclamation: theory and practice.

(Contaminated soil). Engineering magazines: Chemistry and Industry

Reinout L., Wieberen P. and Geert S [2004] Electro-reclamation, a versatile soil remediation solution. Engineering Geology 77 (2005) 191–201

ΜαγκανάςΚ. [2004] «Εδαφικήρύπανση» (http://users.ntua.gr/mc05401/files/Soil_pollution.pdf)

¹⁴ Παπαδιόχου Ο. και Τριανταφύλλου Μ. [2011]. Αποτίμηση της αξίας των νερών της λεκάνης του Ασωπού ποταμού με τη μέθοδο της υποθετικής αξιολόγησης. Διπλωματική εργασία του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.



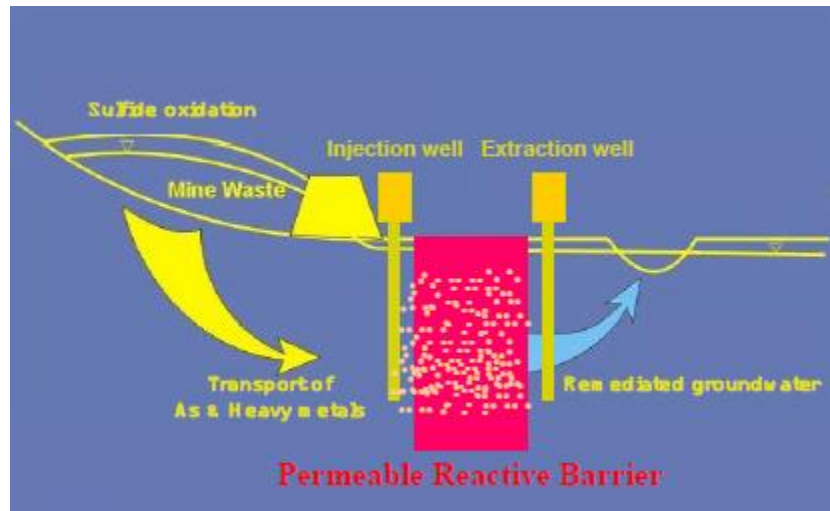
Εικόνα Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το 0 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.9, Διαπερατό αντιδραστικό διάφραγμα, πηγή: http://costperformance.org/pdf/Monticello_PeRTWall.pdf, επίσκεψη 13/09/2011

Τα διαφράγματα μπορούν να είναι είτε ένα συνεχόμενο τοίχιο είτε ένα χονί ή ένα πέρασμα το οποίο θα αποτελείται από τα ενεργά υλικά. Το όλο σύστημα αποκατάστασης αποτελεί ένα παθητικό σύστημα και είναι ικανό να μειώσει σε μεγάλο βαθμό τους ρύπους. Το πιο κοινό υλικό κατασκευής των διαφραγμάτων αυτών είναι ο σίδηρος μηδενικού σθένους (zero-valent iron – ZVI).

Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι τα ακόλουθα:

- Είναι ένα παθητικό σύστημα το οποίο παράγει ελάχιστα απόβλητα απ' ότι άλλες τεχνολογίες με ενεργητικά συστήματα
- Το κόστος κατασκευής της τεχνολογίας αυτή είναι πιο ακριβό από άλλες π.χ. μέθοδος άντλησης διαλυμένων ρύπων αλλά το κόστος συντήρησης είναι σημαντικά πιο χαμηλό.
- Δεν δημιουργεί σημαντική οπτική όχληση
- Η διάρκεια ζωής της κατασκευής μπορεί να είναι έως και 100 χρόνια περισσότερο από άλλες τεχνολογίες¹⁵

¹⁵ Μαγκανός Κ. [2004] «Εδαφική ρύπανση» (http://users.ntua.gr/mc05401/files/Soil_pollution.pdf) http://costperformance.org/pdf/Monticello_PeRTWall.pdf, επίσκεψη 13/09/2011



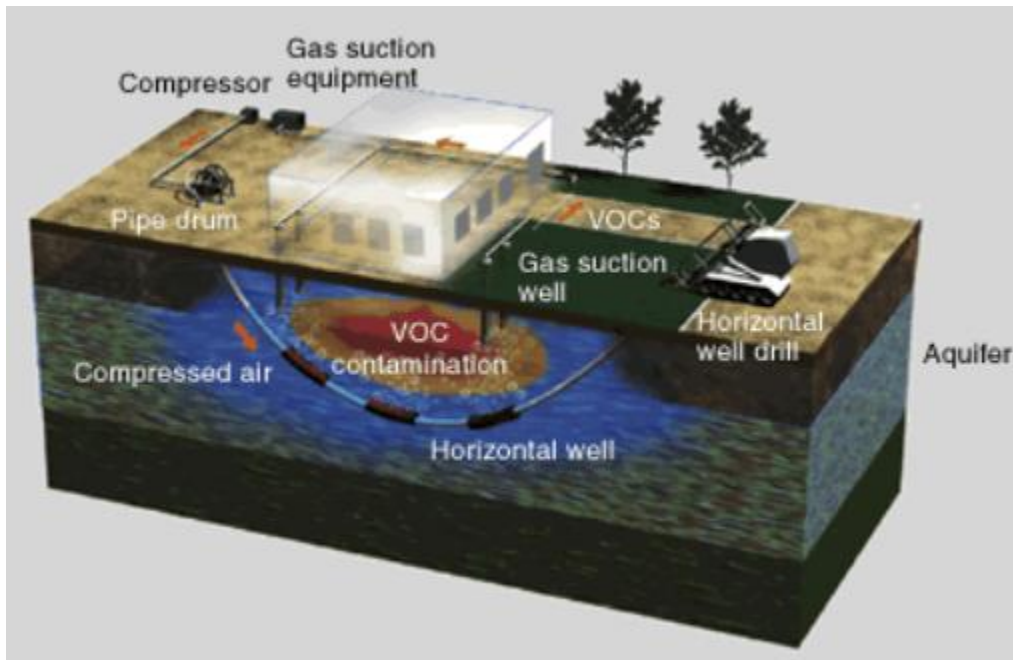
Εικόνα Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το 0 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.10, Διαπερατό αντιδραστικό διάφραγμα, πηγή: Μαγκανάς Κ. [2004] «Εδαφική ρύπανση» (http://users.ntua.gr/mc05401/files/Soil_pollution.pdf)

2.1.9 Αεροδιασπορά (airsparging)

Η τεχνολογία της αεροδιασποράς αποτελεί μια *insitu* μέθοδος αποκατάστασης η οποία μειώνει τη συγκέντρωση πτητικών συστατικών σε πετρελαιοειδή προϊόντα τα οποία προσροφούνται από το έδαφος και διαλύονται στα υπόγεια ύδατα. Κατά την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας γίνεται έγχυση του ρυπαντή με αέρα στο υπέδαφος της μολυσμένης περιοχής επιτρέποντας μια φάση μεταβίβασης των υδρογονανθράκων από τη διαλυμένη φάση σε φάση ατμών. Έτσι ο αέρας έχει διέξοδο σε όλη τη ακόρεστη ζώνη.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι τα ακόλουθα:

- Εύκολη εγκατάσταση απαραίτητου εξοπλισμού
- Εφαρμόζεται δημιουργώντας τη μικρότερη ταραχή στην περιοχή εφαρμογής
- Μικρής διάρκειας διαδικασία, εφαρμόζεται λιγότερο από μια φορά στα 3 χρόνια ανάλογα βέβαια και την κάθε περίπτωση
- Μικρότερο κόστος εφαρμογής από άλλες τεχνολογίες
- Δεν απαιτείται απομάκρυνση, θεραπεία και αποθήκευση ή απόρριψη των υπόγειων υδάτων
- Μπορεί να συνδυαστεί με τη μέθοδο της απομάκρυνσης υδρατμών από το έδαφος (Soil Vapor Extraction)



Εικόνα 2.11, Εφαρμογή μεθόδου αεροδιασποράς σε συνδυασμό με τη μέθοδο απομάκρυνσης υδρατμών από το έδαφος (SVE), πηγή: <http://employees.oneonta.edu/vislovt/mgp/excavation/air%20sparging.htm>, επίσκεψη: 10/09/2011

Παρ' όλα τα πλεονεκτήματα που εμφανίζει αυτή η τεχνολογία παρουσιάζει και κάποια πλεονεκτήματα που δεν την καθιστά ως βέλτιστη επιλογή. Τα **μειονεκτήματα** είναι τα ακόλουθα:

- Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποκατάσταση περιορισμένης έκτασης υδροφόρου ορίζοντα
- Η στρωματοποίηση του εδάφους μπορεί να συμβάλλει στη μείωση της αποδοτικότητας της τεχνολογίας
- Έλλειψη πεδίου έρευνας, εργαστηρίων και δεδομένων για τη βελτίωση της τεχνολογίας
- Απαιτείται ενδελεχή έρευνα και πρακτική σε πεδίο για να επιβεβαιωθεί η αποτελεσματικότητα του
- Πιθανή επέκταση ρύπων
- Το βάθος όπου εντοπίζεται ο ρύπος επηρεάζει άμεσα την τεχνολογία αυτή

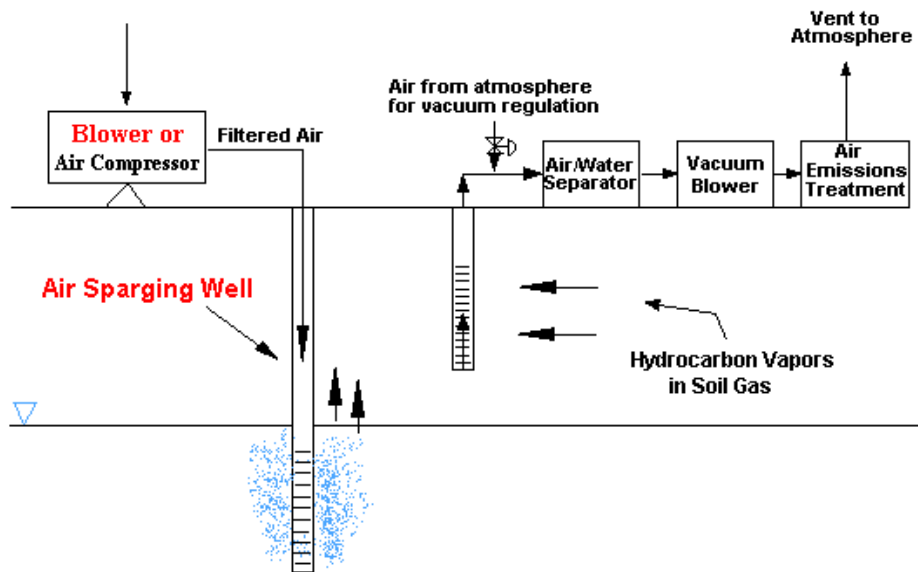
Σχετικά με το κόστος της τεχνολογίας αυτή εξαρτάται πρωτίστως από την επιφάνεια όπου εκτείνεται ο ρύπος και πρέπει να αποκατασταθεί και δευτερευόντως από το βάθος όπου εντοπίζεται ο ρύπος. Όσο αυξάνεται το βάθος, αυξάνεται και το κόστος.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται μια εκτίμηση του κόστους ανάλογα με την περιοχή και το επίπεδο δυσκολίας

	Σενάριο Α	Σενάριο Β	Σενάριο Γ	Σενάριο Δ
Έκταση περιοχής Βαθμός δυσκολίας	Μικρή		Μεγάλη	
	Μικρός	Μεγάλος	Μικρός	Μεγάλος
Κόστος/κυβικό μέτρο	60€	27€	17€	20€

Πίνακας 7, Εκτίμηση κόστους εφαρμογής της τεχνολογίας της αεροδιασποράς, πηγή: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-34.html>, επίσκεψη 11/09/2011

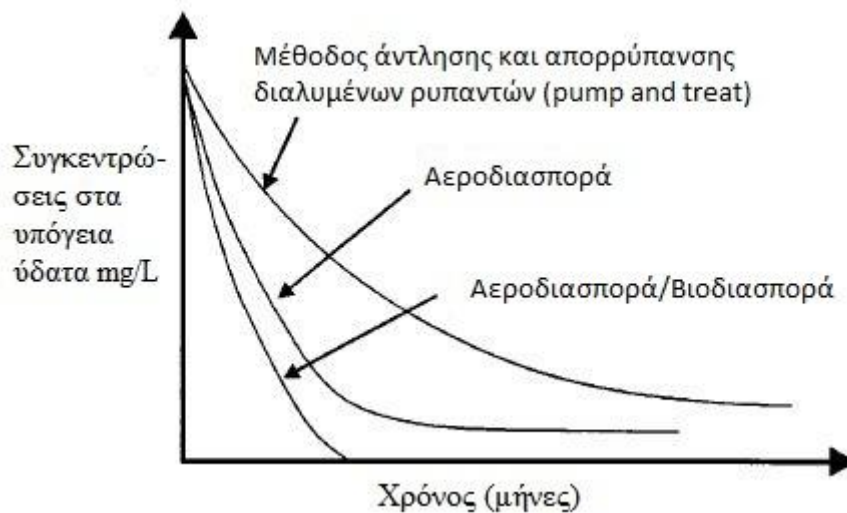
Όπως διαπιστώνεται από τον παραπάνω πίνακα όταν πρόκειται για μεγάλη έκταση το κόστος είναι μικρότερο. Η οικονομικότερη επιλογή είναι το Σενάριο Γ, δηλαδή μεγάλη έκταση με μικρό βαθμό δυσκολίας ενώ η ακριβότερη επιλογή είναι το Σενάριο Α. Όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω ένα από τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής είναι ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μικρή έκταση έτσι δικαιολογείται και το γεγονός ότι όταν πρόκειται για μεγάλη περιοχή το κόστος είναι μικρότερο.¹⁶



Εικόνα2.12, Παράδειγμα συστήματος αεροδιασποράς, πηγή: <http://www.kacweb.com/well/aswell.html>, επίσκεψη 10/09/2011

¹⁶ Suthan Ed. and Suthersan S. [1999], "IN SITU Air SPARGING" Boca Raton: CRC Press LLC
<http://www.cpeo.org/techtree/ttdescript/airspa.htm>, επίσκεψη 11/09/2011
http://www.epa.gov/oust/pubs/tum_ch7.pdf, επίσκεψη 11/09/2011
<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-34.html>, επίσκεψη 11/09/2011

Στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται μια συγκριτική αναπαράσταση της αποτελεσματικότητας τριών μεθόδων σε συνάρτηση με το χρόνο. Αναπαρίσταται οι συγκεντρώσεις διάφορων ρύπων με την πάροδο του χρόνου αποκαλύπτοντας ποια μέθοδος είναι αποτελεσματικότερη. Όπως διαπιστώνεται ο συνδυασμός της αεροδιασποράς με τη βιοδιασπορά έχει τα πιο άμεσα αποτελέσματα καθώς μειώνονται γρηγορότερα οι συγκεντρώσεις των ρύπων ενώ μετά από μήνες εξαλείφονται τελείως οι ρύποι. Είναι η μοναδική μεθοδολογία η οποία οδηγεί στην εξαφάνιση των ρύπων, οι άλλες δυο απλώς μειώνουν τις συγκεντρώσεις τους.

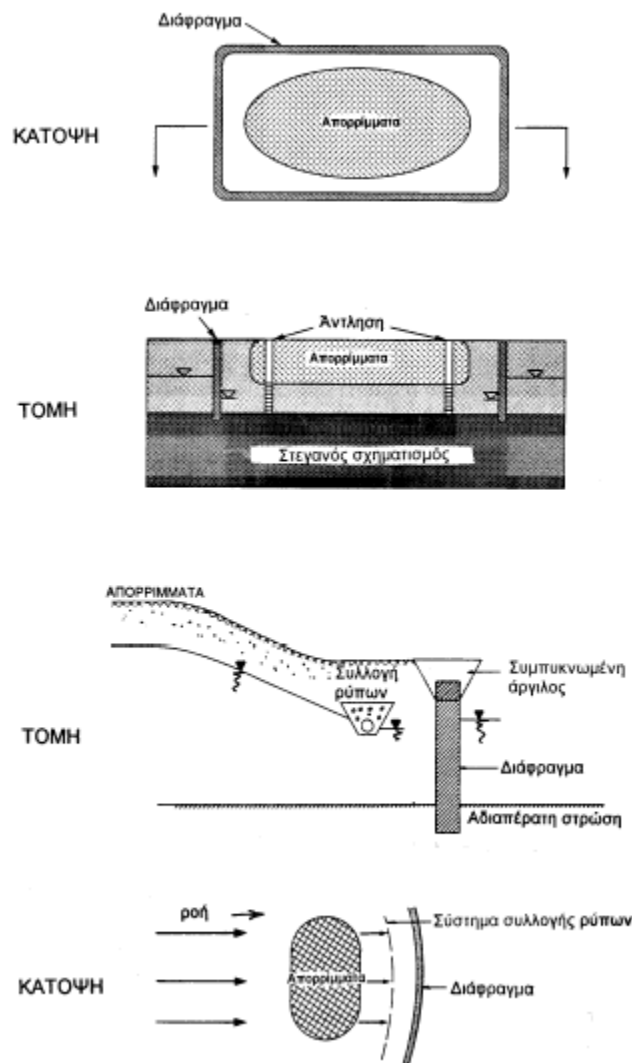


Διάγραμμα 3, Σύγκριση μεθοδολογιών απορρύπανσης ρυπασμένων εδαφών, πηγή: SuthanEd. and SuthersanS. [1999], "INSITU Air SPARGING" Boca Raton: CRC Press LLC

2.2 Μέθοδοι περιορισμού επέκτασης ρύπανσης

2.2.1 Μέθοδοι εγκιβωτισμού (διαφράγματα)

Τα διαφράγματα κατασκευάζονται από υλικά στεγανοποίησης (μπετονίτη, τσιμέντο), από σιδερένιους πασσάλους ή από γεωμεμβράνες. Τα διαφράγματα μπορούν να τοποθετηθούν υπόγεια ή και επιφανειακά για να εμποδίσουν τη διήθηση της βροχής. Αρχικά είναι απαραίτητη η οριοθέτηση της ρυπασμένης περιοχής και αυτό γίνεται με γεωτρήσεις δειγματοληψίας σε διαφορετικά βάθη. Στόχος αυτής της μεθόδου είναι να περιοριστεί ο ρυπαντής στην περιοχή που εντοπίστηκε με την κατασκευή των διαφραγμάτων.



Εικόνα 2.13, Τυπική διάταξη περιμετρικών διαφραγμάτων για την απομόνωση του εδάφους που έχει ρυπανθεί από επικίνδυνα ή τοξικά απόβλητα, πηγή: Παναζίδου Μ. «Μέθοδοι στερεοποίησης/σταθεροποίησης» Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων, Ε.Μ.Π.

Κατακόρυφα περιμετρικά διαφράγματα

Ο ρυπαντής μπορεί να αποθηκευτεί στο έδαφος και να μολύνει τα υπόγεια ύδατα επεκτείνοντας τη ρύπανση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το πυρηνικό ατύχημα του Chernobyl το Μάιο του 1986. Σε αυτές τις περιπτώσεις κατασκευάζονται κατακόρυφα περιμετρικά διαφράγματα για την απομόνωση του εδάφους κάτω από τη θέση διαρροής όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Τα διαφράγματα πρέπει να φθάνουν μέχρι κάποιο αδιαπέρατο υπόστρωμα και συνήθως κατασκευάζονται με τους ακόλουθους τρόπους:

1. Ως συμβατικά διαφράγματα πάχους 60-100 εκατοστά με τμηματική εκσκαφή και αφαίρεση του εδαφικού υλικού.

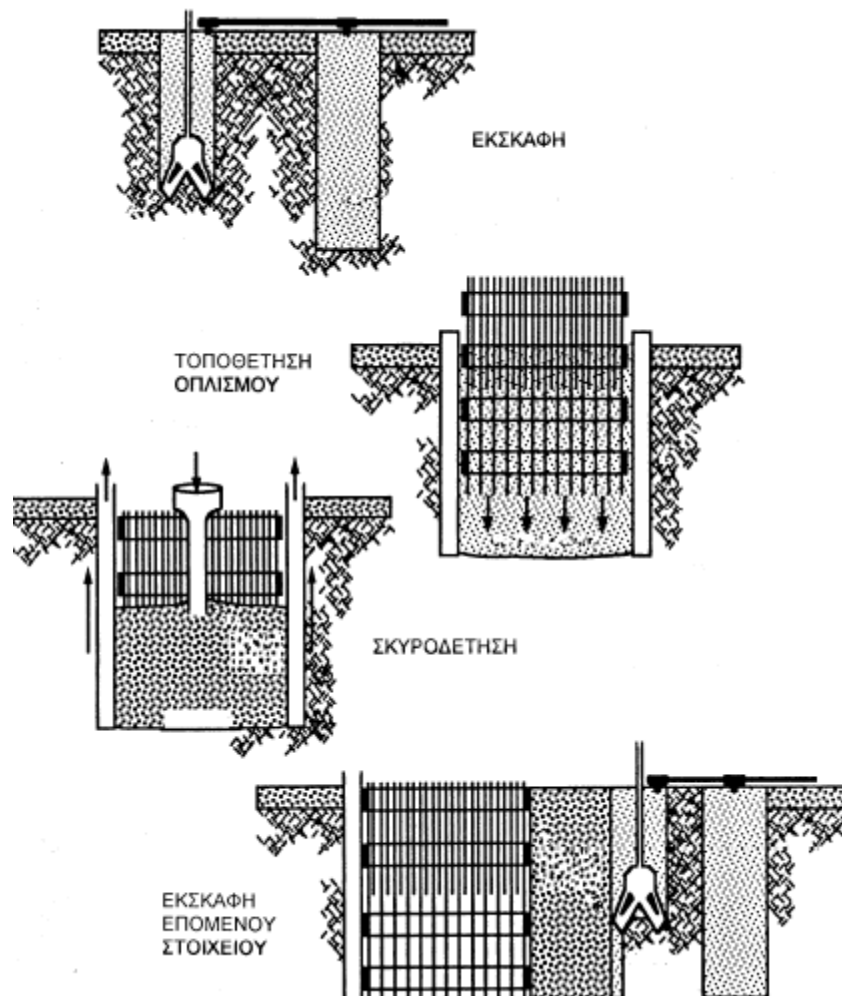
2. Ως συστήματα αλληλοτεμνόμενων πασσάλων από σκυρόδεμα. Το σύστημα αυτό αποτελείται από έγχυτους φρεατοπασσάλου όπου εφάπτονται μεταξύ τους. Συχνά υπάρχει και μικρή

επικάλυψη των διατομών των πασσάλων για την εξασφάλιση της στεγανότητας.

3. Ως διάφραγμα από προκατασκευασμένες μεταλλικές πασσαλοσανίδες, η στεγανότητα του οποίου βελτιώνεται με συστοιχία τσιμεντενέσεων ακριβώς ανάντη του διαφράγματος.

4. Ως διάφραγμα από τσιμεντενέσεις με εισπίεση ενέματος υπό υψηλή πίεση (highpressurejetgrouting) ή με ανάμιξη του εδαφικού υλικού με τσιμεντένεμα (deepmixingmethod).

5. Ως διάφραγμα που δημιουργείται μέσω της πήξης του υπόγειου νερού δια ψύξεως(groundfreezing). Είναι προφανές ότι ο τύπος αυτός του διαφράγματος χρησιμοποιείται μόνον ως προσωρινό μέτρο απομόνωσης (λόγω του κόστους διάτρησης της ψύξεως).



Εικόνα 2.14, Διαδοχικά στάδια κατασκευής περιμετρικού διαφράγματος, πηγή: Πανταζίδου Μ. «Μέθοδοι στερεοποίησης/σταθεροποίησης» Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων, Ε.Μ.Π.

Οριζόντια διαφράγματα βάσης

Η κατασκευή κατακόρυφων περιμετρικών διαφραγμάτων σε μια περιοχή που έχει ρυπανθεί περιορίζει τη δυνατότητα επέκτασης της ρύπανσης στην οριζόντια διεύθυνση. Τα διαφράγματα αυτά συνήθως φθάνουν μέχρι το βάθος κάποιας οριζόντιας εδαφικής στρώσης με μικρή διαπερατότητα, η οποία εξασφαλίζει τη στεγανότητα του συστήματος έναντι επέκτασης της ρύπανσης με κίνηση των ρύπων στην κατακόρυφη διεύθυνση. Εάν δεν υπάρχει κάποια πρακτικώς αδιαπέρατη εδαφική στρώση σε λογικό βάθος, μια λύση είναι η στεγάνωση της βάσης με τεχνητά μέσα. Οι μέθοδοι κατασκευής οριζόντιων στεγανωτικών διαφραγμάτων χωρίς αφαίρεση των υπερκείμενων εδαφικών υλικών είναι περιορισμένες, η στεγάνωση που προσφέρουν δεν είναι αξιόπιστη και επιπλέον έχουν υψηλό κόστος. Η μέθοδος που κυρίως εφαρμόζεται στις περιπτώσεις αυτές είναι η κατασκευή ενός διαφράγματος από οριζόντιες τσιμεντενέσεις με εισπίεση ενέματος υπό υψηλή πίεση (high pressure jet grouting).¹⁷

Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι τα ακόλουθα:

• Υπάρχει δυνατότητα απομόνωσης μεγάλης έκτασης ρυπαντικού φορτίου

• Αποτελεί μια οικονομική λύση σε περίπτωση εφαρμογής σε εκτεταμένες ρυπασμένες περιοχές

• Υπάρχει δυνατότητα ελέγχου στερεών, υγρών και αέριων ρυπαντικών ουσών

Αντίθετα, η μέθοδος αυτή μειονεκτεί στα παρακάτω σημεία:

- Δεν απομακρύνεται το ρυπαντικό φορτίο από τη συγκεκριμένη περιοχή
- Υπάρχει δυσκολία στη διασφάλιση κατασκευαστικής συνέχειας των διαφραγμάτων
- Υπάρχει δυσκολία τοποθέτησης σε περιπτώσεις ύπαρξης εδαφικών εμποδίων
- Η αντίληψη για την ακεραιότητα των διαφραγμάτων είναι ιδιαίτερα περιορισμένη
- Απαιτείται συνεχής παρακολούθηση

¹⁷ Πανταζίδου Μ. «Μέθοδοι στερεοποίησης/σταθεροποίησης» Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων, Ε.Μ.Π.

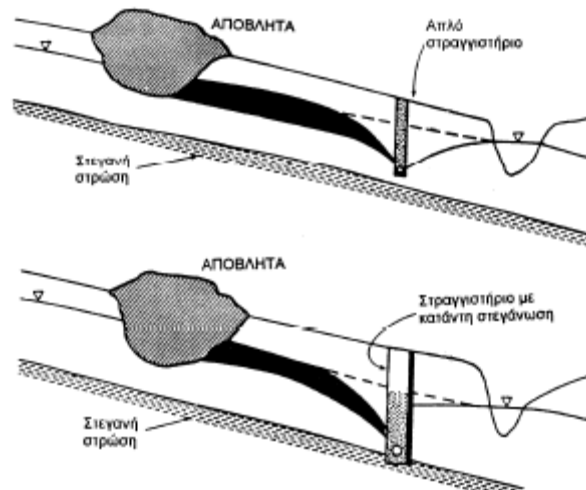
- Υπάρχει το ενδεχόμενο απαγόρευσης χρήσης αυτής της τεχνολογίας σε κάποια περιοχή¹⁸

2.2.2 Υδραυλικές μέθοδοι αναστροφής της κίνησης του υπόγειου νερού

Σε αυτή την περίπτωση γίνονται ρυθμίσεις στις στάθμη ώστε να αποφευχθεί η εκφόρτιση των ρυπασμένων νερών σε υδάτινους αποδέκτες (λίμνες, ποτάμια) ή αραίωση των ρύπων. Οι υδραυλικοί φραγμοί δημιουργούνται με τον συνδυασμό γεωτρήσεων άντλησης και εμπλουτισμού.

Τα συστήματα αυτά βασίζονται στην ουσία στην τροποποίηση της πιεζομετρίας του υπόγειου νερού με σκοπό τη μεταβολή της κατεύθυνσης κίνησής του. Έτσι, π.χ .συχνά γίνονται εκτεταμένες αντλήσεις σε κάποια περιοχή, ώστε να τροποποιηθεί το καθεστώς κίνησης του υπόγειου νερού και να μεταβληθεί η κατεύθυνση μετάδοσης της ρύπανσης. Επίσης, αρκετά συχνά, μεταξύ της πηγής γένεσης της ρύπανσης και του σημείου εκμετάλλευσης του υπόγειου νερού (πηγή, λίμνη κλπ) κατασκευάζεται επίμηκες στραγγιστήριο στο οποίο συγκεντρώνεται το υπόγειο νερό που προέρχεται από την πηγή της ρύπανσης όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Ουσιαστικά, η περίπτωση αυτή βασίζεται επίσης στην αντιστροφή της κίνησης του υπόγειου νερού. Πράγματι, πριν από την κατασκευή του στραγγιστηρίου, η κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού μεταξύ της θέσης του στραγγιστηρίου και της λίμνης ήταν από αριστερά προς τα δεξιά και ευνοούσε την επέκταση της ρύπανσης προς τη λίμνη ,ενώ μετά την κατασκευή του στραγγιστηρίου η κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού αναστράφηκε, με αποτέλεσμα τον περιορισμό επέκτασης της ρύπανσης προς τη λίμνη.

¹⁸ Λατινόπουλος Π. (2007), «Οικονομική του Περιβάλλοντος και των Φυσικών Πόρων», Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη
Μπαντής Σ. (2008), «Γεωτεχνική Περιβάλλοντος, Μέρος Β», Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη



Εικόνα2.15, Σύστημα προστασίας από τη ρύπανση με αντιστροφή της κίνησης του υπόγειου νερού, πηγή: Πανταζίδου Μ. «Μέθοδοι στερεοποίησης/σταθεροποίησης» Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων, Ε.Μ.Π.

2.2.3 Μέθοδος σταθεροποίησης του εδάφους (soil stabilization, solidification)

Η μέθοδος της στερεοποίησης και σταθεροποίησης (Σ/Σ, Solidification/Stabilization) αποτελούν τεχνικές κατεργασίας οι οποίες μειώνουν την κινητικότητα των ρύπων εγκλωβίζοντας ή ακινητοποιώντας τους με χημικό ή φυσικό τρόπο μέσα στο έδαφος. Οι διαδικασίες αυτές εφαρμόστηκαν αρχικά για την επεξεργασία ραδιενεργών αποβλήτων και τη σταθεροποίηση βιομηχανικών ιλύων (π.χ. ψευδάργυρος (Zn), χαλκός (Cu), νικέλιο (Ni), μόλυβδος (Pb), χρώμιο (Cr), κάδμιο (Cd)) και στη συνέχεια λόγω αλλαγών στην περιβαλλοντική νομοθεσία εφαρμόστηκαν και σε επικίνδυνα απόβλητα και ρυπασμένα εδάφη. Στη σταθεροποίηση/στερεοποίηση τα σταθεροποιητικά μέσα αναμιγνύονται ή εισάγονται με άλλους τρόπους στο ρυπασμένο έδαφος για την επίτευξη ενός ή περισσότερων από τους παρακάτω στόχους:

- τη μείωση της διαλυτότητας επικίνδυνων ρύπων που περιέχονται στα ρυπασμένα εδάφη λόγω της προσρόφησής τους στο έδαφος ή του σχηματισμού ενώσεων χαμηλής διαλυτότητας (π.χ., υδροξείδια, ανθρακικά άλατα, πυριτικά άλατα, φωσφορικά άλατα, ή θειούχες ενώσεις).
- τον περιορισμό της επαφής μεταξύ υδάτων και ρύπων με τη μείωση της διαπερατότητας του υλικού, ή το σχηματισμό ενός κρυστάλλινου, υαλώδους, ή πολυμερούς πλαισίου που περιβάλλει τα τεμαχίδια του υλικού.
- τη βελτίωση των φυσικών χαρακτηριστικών των ρυπασμένων εδαφών.

Η *στερεοποίηση* είναι η διεργασία κατά την οποία προστίθενται επαρκείς ποσότητες μέσω στερεοποίησης για να εγκλωβίσουν τα ρυπασμένα εδάφη σε ένα στερεό σώμα υψηλής αντοχής. Ο εγκλωβισμός μπορεί να αφορά μεμονωμένα λεπτομερή ρυπασμένα τεμαχίδια (microencapsulation) είτε μεγάλα μπλοκ ρυπασμένου υλικού (macroencapsulation). Το στερεό υλικό που προκύπτει και καλείται συχνά 'μονόλιθος' παρουσιάζει συνήθως αυξημένη αντοχή και μειωμένη διαπερατότητα. Η στερεοποίηση δεν περιλαμβάνει απαραίτητα και τη χημική αντίδραση μεταξύ των ρύπων και των αντιδραστηρίων στερεοποίησης. Η μετανάστευση ρύπων περιορίζεται με τη μείωση της επιφάνειας που εκτίθεται σε εκχύλιση ή και την απομόνωση του υλικού μέσα σε μια αδιαπέραστη μάζα.

Στη *σταθεροποίηση* χρησιμοποιούνται πρόσθετες ουσίες για να μειώσουν τον ενδεχόμενο κίνδυνο από ρυπασμένα εδάφη με τη μετατροπή των ρύπων στην ελάχιστη διαλυτή, διαθέσιμη, ή τοξική μορφή τους. Η σταθεροποίηση πρέπει να θεωρηθεί ως τεχνική κατεργασίας που μειώνει το ρυθμό μετανάστευσης των ρύπων στο περιβάλλον σε αποδεκτές τιμές..

Ο όρος στερεοποίηση / σταθεροποίηση (S/S) χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει και τις δύο τεχνικές. Η στερεοποίηση / σταθεροποίηση αποτελεί τη βέλτιστη διαθέσιμη τεχνολογία για την κατεργασία εδαφών και των ιλύων που ρυπαίνονται με βαρέα μέταλλα. Μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ανόργανα συνδετικά μέσα όπως το τσιμέντο και η ιπτάμενη τέφρα, οργανικά όπως η πίσσα και ανόργανων ή οργανικών ουσιών που αποσκοπούν στη μετατροπή των μετάλλων σε μια λιγότερο ευκίνητη μορφή. Η μορφή του τελικού προϊόντος (εδάφους ή απορρίμματος) των μεθόδων στερεοποίησης/σταθεροποίησης μπορεί να μεταβάλλεται από την μορφή απλού εδαφικού υλικού μέχρι τη δομή μονολίθων υψηλής μηχανικής αντοχής. Η ανάμιξη των ρυπασμένων εδαφών με τα σταθεροποιητικά / στερεοποιητικά μέσα μπορεί να γίνει στην περιοχή (*ex-situ* S/S), ή επί τόπου (*in-situ*) με τη χρήση του κατάλληλου εξοπλισμού.

Οι μέθοδοι Σ/Σ μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες: τις χημικές και φυσικές. Οι χημικές διεργασίες προϋποθέτουν ότι μια χημική αντίδραση πραγματοποιείται μεταξύ των προστιθέμενων αντιδραστηρίων και του ρυπασμένου εδάφους, ενώ οι φυσικές δεν περιλαμβάνουν μια τέτοια αντίδραση.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, αφενός το σχετικά χαμηλό επίπεδο της ρύπανσης και αφετέρου οι απαιτήσεις των χρήσεων γης μετά την κατεργασία επιβάλλουν τη μη χρήση τεχνικών στερεοποίησης για τη μετατροπή των εδαφών σε στερεή μάζα. Στις περιπτώσεις αυτές εφαρμόζονται τεχνικές σταθεροποίησης που συνήθως αναφέρονται και ως μέθοδοι χημικής σταθεροποίησης. Για τα ρυπασμένα με μέταλλα ή μεταλλοειδή εδάφη, η σταθεροποίηση αναφέρεται επίσης ως χημική ακινητοποίηση ή επί τόπου αδρανοποίηση και θεωρείται ως πολύ αποτελεσματική εναλλακτική λύση αποκατάστασης χαμηλού κόστους.

Για την αξιολόγηση της σταθεροποίησης είναι απαραίτητο να μετρηθούν οι φυσικές, μηχανικές και χημικές ιδιότητες του σταθεροποιημένου υλικού. Δεδομένου ότι οι τεχνικές Σ/Σ στοχεύουν κυρίως στη μείωση του ποσοστού μετανάστευσης ρύπων στο περιβάλλον, η πραγματοποίηση δοκιμών εκχύλισης θεωρείται κύριο κριτήριο για την αξιολόγηση της απόδοσης της μεθόδου. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται διάφορες δοκιμές που προέρχονται κυρίως από τον κλάδο των πολιτικών μηχανικών και αξιολογούν τις μηχανικές ιδιότητες των σταθεροποιημένων υλικών (αντοχή, συμπίεστικότητα, και διαπερατότητα).

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου σταθεροποίησης-στερεοποίησης είναι τα παρακάτω:

- Δυνατότητα εφαρμογής σε ανόργανες και οργανικές ουσίες
- Πιθανότητα ταχείας επεξεργασίας
- Ευκολία στην εφαρμογή ορισμένων εξ αυτών
- Δυνατότητα εφαρμογής σε μεγάλο εύρος εδαφών

Αντίστοιχα ακολουθούν τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής:

- Μη καταστροφή ή αποτοξίνωση των ρυπαντικών ουσιών
- Απαίτηση μετρήσεων διασφάλισης της ποιότητας
- Παραγωγή αερίων εκπομπών λόγω έκλυσης θερμότητας
- Αβεβαιότητα απόδοσης σε μακροπρόθεσμο στάδιο
- Απαίτηση συνεχούς παρακολούθησης (monitoring)

Μηχανισμοί στερεοποίησης/σταθεροποίησης

Οι μέθοδοι σταθεροποίησης κυρίως στοχεύουν στη μείωση της εκχυλισιμότητας ρύπων από το ρυπασμένο έδαφος και επομένως στην παρεμπόδιση μετανάστευσης τους στο ευρύτερο περιβάλλον. Είναι πολύ σημαντικό να γίνουν κατανοητοί οι μηχανισμοί που μπορεί να λάβουν χώρα κατά τη σταθεροποίηση έτσι ώστε να επιτευχθεί ο μέγιστος δυνατός βαθμός χημικής αδρανοποίησης των ρύπων. Οι βασικοί μηχανισμοί για την ακινητοποίηση των ρυπασμένων από βαρέα μέταλλα εδαφών είναι οι ακόλουθοι:

- **Έλεγχος pH**, με την προσθήκη αλκαλικών υλικών όπως άσβεστος, ασβεστόλιθος, ανθρακικό νάτριο, υδροξείδιο του μαγνησίου κ.α
- **Χημική καταβύθιση στη μορφή ενώσεων χαμηλής διαλυτότητας**, όπως π.χ, τα υδροξείδια, θειούχες ενώσεις σουλφίδια, πυριτικά και φωσφορικά

- **Σύμπλοκοποίηση με οργανικά**, όπου υλικά με οργανικές ρίζες μπορούν ναδράσουν συμπλοκοποιητικά και να δεσμεύσουν μεταλλικά ιόντα
- **Ρόφηση**, με τη χρήση φυσικών υλικών όπως ζεόλιθοι, ενεργός άνθρακας και οξείδια/υδροξείδια μετάλλων
- **Ιοντοεναλλαγή**, η οποία λαμβάνει μέχρι ενός ορισμένου βαθμού σε όλες τις μεθόδους σταθεροποίησης
- **Εγκλωβισμός** που περιλαμβάνει την πλήρη κάλυψη μικρών σωματιδίων ή μεγάλων ποσοτήτων ρυπασμένου εδάφους με υλικά όπως τσιμέντο, πολυμερή, άσφαλτο ή παρόμοια υλικά.

Ωστόσο, σε πολλά συστήματα είναι δύσκολο να γίνει σαφής διαχωρισμός του κύριου μηχανισμού που είναι υπεύθυνος για την ακινητοποίηση των βαρέων μετάλλων στα εδάφη, αφού αφενός περισσότερο από ένας μηχανισμοί λαμβάνουν χώρα και αφετέρου ο μηχανισμός ακινητοποίησης μπορεί να είναι διαφορετικός για δύο διαφορετικά στοιχεία.

Έλεγχος pH

Σε γενικές γραμμές, η εκχυλισιμότητα των μετάλλων εξαρτάται από το pH. Ο έλεγχος του pH μπορεί να πραγματοποιηθεί με την προσθήκη στο ρυπασμένο εδαφοξύζινων η και αλκαλικών υλικών. Τα πιο συνιθισμένα υλικά προσθήκης για τον έλεγχο του είναι η άσβεστος (CaO ή Ca(OH)_2), ο ασβεστόλιθος (CaCO_3), το ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3), καυστικό νάτριο και σε μικρότερο βαθμό, υδροξείδιο του μαγνησίου. Το τελευταίο, παρόλο που χρησιμοποιείται σπανίως στα εμπορικά συστήματα σταθεροποίησης, εξαιτίας της διαθεσιμότητας άλλων αλκαλικών υλικών σε χαμηλότερο κόστος, θεωρείται ως ένα ελκυστικό αντιδραστήριο όταν απαιτείται πιο ακριβής έλεγχος του pH αφού παρουσιάζει χαμηλή διαλυτότητα στο νερό και επομένως δεν αυξάνει αμέσως το pH. Τα περισσότερα από τα αντιδραστήρια στερεοποίησης είναι αλκαλικά και μπορούν να αντικαταστήσουν εν μέρει ή και εξολοκλήρου τα παραδοσιακά αλκαλικά υλικά, δρώντας ταυτόχρονα σαν ρυθμιστές του pH καθώς και επίσης και ως συνδετικό μέσο. Τα αλκαλικά συνδετικά υλικά περιλαμβάνουν το τσιμέντο Portland, σκόνη από την παραγωγή τσιμέντου και ασβέστου, ιπτάμενη τέφρα τύπου C και πυριτικό νάτριο.

Καταβύθιση

Η καταβύθιση ως ενώσεις χαμηλής διαλυτότητας και χαμηλής διαθεσιμότητας θεωρείται ένας πολύ σημαντικός μηχανισμός σταθεροποίησης μετάλλων στα ρυπασμένα εδάφη. Τα μέταλλα που περιέχονται στα εδάφη μπορεί να επανακαταβυθιστούν ως υδροξείδια, θειούχες ενώσεις, ανθρακικά, πυριτικά και φωσφορικά και να παραμείνουν έτσι στο σταθεροποιημένο έδαφος.

Από πρακτικής άποψης, χρησιμοποιούνται επαρκείς ποσότητες σταθεροποιητικών μέσων για την ακινητοποίηση συγκεκριμένων μετάλλων. Αυτά τα πρόσθετα υλικά μπορεί να παραμείνουν στο σύστημα μέχρι να εξαντληθούν στις αντιδράσεις όπου είναι απαραίτητα εκτός και αν οι αντιδράσεις σταθεροποίησης είναι πολύ γρήγορες. Η καταβύθιση μετάλλων μπορεί να γίνει με τη μορφή υδροξειδίων. Φωσφορικών ενώσεων, θειούχων ενώσεων και πυριτικών ενώσεων.¹⁹

Εγκλωβισμός

Ο εγκλωβισμός βασίζεται κυρίως στην στερεοποίηση και στοχεύει στην πρόληψη της επαφής του ρυπασμένου εδάφους με πιθανά εκχυλιστικά μέσα όπως το νερό. Περιλαμβάνει την ολική επικάλυψη ή επίστρωση του ρυπασμένου υλικού με συνδετικά υλικά όπως τσιμέντο, πολυμερή άσφαλτο ή παρόμοια υλικά. Όπως έχει ήδη αναφερθεί υπάρχει μία σαφής διαφοροποίηση μεταξύ του μικροεγκλωβισμού που αναφέρεται στον εγκλωβισμό μεμονωμένων τεμαχίων και τον μακροεγκλωβισμό που αναφέρεται στον εγκλωβισμό μεγάλων τμημάτων ρυπασμένου εδάφους ή μικροεγκλωβισμένου υλικού.

Ο μικροεγκλωβισμός είναι ο μηχανισμός με τον οποίο τα ρυπασμένα υλικά εγκλωβίζονται φυσικά μέσα στην κρυσταλλική δομή της στερεοποιημένης μήτρας σε μικροσκοπικό επίπεδο. Η διαδικασία μικροεγκλωβισμού περιλαμβάνει την ανάμειξη του ρυπασμένου εδάφους με το μέσο εγκλωβισμού πριν από τη στερεοποίηση. Καθώς οι ρυπαντές έχουν εγκλωβιστεί φυσικά στη στερεοποιημένη δομή και δεν είναι χημικά τροποποιημένοι ή δεσμευμένοι, ο ρυθμός αποδέσμευσης των ρυπαντών από την στερεοποιημένη μάζα μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση της εκτιθέμενης επιφάνειας. Όμως, αντίθετα από τον μικροεγκλωβισμό, ακόμα και αν το επεξεργασμένο υλικό διασπαστεί, οι ρυπαντές παραμένουν ακόμα εγκλωβισμένοι. Το τσιμέντο Portland, οι ποζολάνες ή ο ασβέστης/υδράσβεστος και τα οργανικά πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον μικροεγκλωβισμό των ρυπαντών σε ρυπασμένα εδάφη. Τα οργανικά πολυμερή παρουσιάζουν ένα κύριο πλεονέκτημα σε σχέση με τα περισσότερα ανόργανα συστήματα: από τη στιγμή που στερεοποιούνται έχουν χαμηλότερη διαπερατότητα και τείνουν να παραμείνουν σε μονολιθική μορφή λόγω της αντοχής και της ελαστικότητας του πολυμερούς. Όπως και στα θερμοπλαστικά συστήματα, τα περισσότερα από αυτά τα προϊόντα είναι υδρόφοβα μετά τη στερεοποίηση και τείνουν να παραμείνουν ανθεκτικά στην εκχύλιση ακόμα και αν σπάσουν σε μικρότερα τεμάχια. Έτσι, είναι αποτελεσματικά στη συγκράτηση υψηλά τοξικών μετάλλων και οργανικών

¹⁹ Πανταζίδου Μ. «Μέθοδοι στερεοποίησης/σταθεροποίησης» Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων, Ε.Μ.Π. Σαχινίδης Σ., Χριστοφορίδης Αχ, και Φώσκολος Αν. «Εφαρμογή της μεθόδου σταθεροποίησης-στερεοποίησης για τα απόβλητα μιας βιομηχανίας επιμεταλλώσεως. Μηχανισμοί και αποτελεσματικότητα της μεθόδου». ScientificJournalArticles

συστατικών. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των συστημάτων οργανικών πολυμερών είναι ότι μπορεί να επιτευχθεί γρήγορη ζελατινοποίηση και ανάπτυξη της φυσικής αντοχής αν αυτό είναι επιθυμητό.

Ο μακροεγκλωβισμός είναι ο μηχανισμός ο οποίος επιτρέπει το φυσικό εγκλωβισμό επικίνδυνων συστατικών σε μεγαλύτερες δομικές μήτρες. Το επικίνδυνο υλικό συγκρατείται σε ασυνεχείς πόρους εντός του υλικού στερεοποίησης. Έχουν προταθεί και εφαρμοστεί αρκετά μέσα για το μακροεγκλωβισμό ρυπασμένων εδαφών συμπεριλαμβανομένων του τσιμέντου, οργανικών υλικών, (πολυαιθυλένιο, πολυεστέρας, κ.λπ.), θειούχων τσιμέντων κ.λπ. Η διαδικασία μακροεγκλωβισμού περιλαμβάνει απόχυση του εγκλωβιστικού μέσου πάνω και γύρω από μία μεγάλη μάζα ρυπασμένου εδάφους, εγκλωβίζοντάς το σε ένα στερεοποιημένο μπλοκ. Τα εγκλωβισμένα υλικά συνήθως παρουσιάζουν υψηλή συγκράτηση ρύπων κάτω από εκχύλιση με διάφορα υδατικά διαλύματα και μπορούν να αντέξουν σε υψηλή μηχανική καταπόνηση. Εντούτοις ορισμένες φυσικές/περιβαλλοντικές πιέσεις, όπως για παράδειγμα κύκλοι υγρασίας/ξηρασίας ή παγετού/καύσωνα μπορεί να προκαλέσουν φυσική αποσύνθεση του στερεοποιημένου υλικού. Έτσι, το ρυπασμένο υλικό μπορεί να εκτεθεί σε εκχύλιση και οι περιεχόμενοι ρυπαντές να κινητοποιηθούν.

Εκτίμηση των μεθόδων σταθεροποίησης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο πρωταρχικός στόχος της επεξεργασίας του εδάφους με μεθόδους σταθεροποίησης είναι η μείωση της κινητικότητας των ρύπων. Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου στερεοποίησης/σταθεροποίησης είναι δυνατό να εφαρμοστούν διάφορα είδη δοκιμών που εξαρτώνται κάθε φορά από την κατεργασία που εφαρμόζεται. Υπάρχουν φυσικο-γεωτεχνικές δοκιμές που προσδιορίζουν ιδιότητες όπως κοκκομετρία, υγρασία, υδραυλική αγωγιμότητα, κ.λπ. και δοκιμές εκχυλισιμότητας που παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την εκχυλισιμότητα και τη βιοδιαθεσιμότητα των ρύπων κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος. Συνοπτικά αναφέρονται οι ακόλουθες δοκιμές:

- Γεωτεχνικές δοκιμές
- Δοκιμές Εκχύλισης
- Δυναμικές δοκιμές²⁰

2.3 Μέθοδοι απορρύπανσης ακόρεστης ζώνης εδάφους

²⁰ Πανταζίδου Μ. «Μέθοδοι στερεοποίησης/σταθεροποίησης» Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων, Ε.Μ.Π.

2.3.1 Μέθοδοι βιολογικής απορρύπανσης

Σε αυτή την περίπτωση γίνεται αποδόμηση με τη δράση βακτηρίων και μυκήτων. Ο ρυθμός της βιολογικής διάσπασης των οργανικών ουσιών εξαρτάται από το είδος των βακτηριδίων που προκαλούν την αποδόμηση και τις συνθήκες του περιβάλλοντος (π.χ. θερμοκρασία, pH) που συχνά αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την δράση των μικροοργανισμών. Αρκετές συνήθειες βιολογικές διασπάσεις ακολουθούν τον γνωστό εκθετικό νόμο των πυρηνικών διασπάσεων (κινητική πρώτης τάξεως - Monodkinetics), κατά τον οποίο ο ρυθμός της διάσπασης είναι ανάλογος του διαθέσιμου για διάσπαση αριθμού μορίων.

Ο ρυθμός της βιολογικής διάσπασης ακολουθεί τον εκθετικό νόμο:

$$C=C_0 e^{-kt}$$

όπου: C= η συγκέντρωση μετά χρόνο t,
C₀= η αρχική συγκέντρωση και
k= η σταθερά διάσπασης.

Η σταθερά **k** ισούται με $k=0,693/t(1/2)$, όπου $t(1/2)$ είναι ο χρόνος ημιζωής δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για τη διάσπαση του ημίσεως των μορίων της οργανικής ένωσης. Σύμφωνα με τα ανωτέρω, δοθέντος αρκετού χρόνου (και προφανώς με τις κατάλληλες λοιπές συνθήκες) θα αναπτυχθούν μικροοργανισμοί που μπορούν να διασπάσουν και τις πλέον σταθερές συνθετικές οργανικές ενώσεις.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τυπικές τιμές του χρόνου ημιζωής ορισμένων από τις οργανικές ενώσεις που συνήθως υπάρχουν στα βιομηχανικά απόβλητα. Λόγω της εξάρτησης του ρυθμού των βιολογικών διασπάσεων από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία, pH κλπ), οι παρακάτω χρόνοι ημιζωής είναι ενδεικτικοί και αναφέρονται σε μετρήσεις που έγιναν σε εργαστήριο κάτω από “συνήθειες” συνθήκες περιβάλλοντος, ενώ στην πραγματικότητα μπορεί να διαφέρουν σημαντικά. Πάντως από τις τιμές του παρακάτω πίνακα υπάρχουν όμως και πολλοί τύποι βιολογικής αποδόμησης που δεν ακολουθούν τον εκθετικό νόμο, όπως π.χ. οι περισσότερες διασπάσεις που προκαλούνται από μικρόβια (microbialkinetics)

Τυπικοί χρόνοι ημιζωής οργανικών ενώσεων κατά την βιολογική αποδόμηση υπό συνθήκες κινητικής πρώτης τάξεως

Οργανική Ένωση

Χρόνος ημιζωής (ημέρες)

Βενζόλιο	1
Τολουόλιο	6.4
Ανθρακένιο	30
Ξυλόλιο	40
Πυρένιο	40
Ναφθαλένιο	95
Βενζο-φθορο-ανθένιο	1290
Βενζο-πυριλένιο	360
Ιδενο-πυρένιο	600

Πίνακας 8, Τυπικοί χρόνοι ημιζωής οργανικών ενώσεων κατά την βιολογική αποδόμηση υπό συνθήκες κινητικής πρώτης τάξεως, πηγή: Καββάδας Μ., Πανταζίδου Μ. [2007] «Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής», Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Η βιολογική επεξεργασία μπορεί να διευκολυνθεί με αερισμό της ακόρεστης ζώνης (βιοαερισμός).²¹

Οι μέθοδοι της βιολογικής επεξεργασίας μπορούν να συνδυαστούν με άλλες μεθόδους για καλύτερα αποτελέσματα. Έπειτα, το κόστος ορισμένων απλών μεθόδων είναι χαμηλό άρα και εύκολα εφαρμόσιμο καθώς μπορεί να εφαρμοστεί για πολλές κατηγορίες οργανικών ουσιών.

Τα **μειονεκτήματα** των βιολογικών μεθόδων αποκατάστασης είναι τα ακόλουθα:

- Υψηλό κόστος σύνθετων μεθόδων
- Αρκετά χρονοβόρα διαδικασία
- Πιθανότητα σχηματισμού επικίνδυνων ενδιάμεσων προϊόντων
- Αναχαίτιση διαδικασίας λόγω παρουσίας συγκεκριμένων ρυπαντικών ουσιών
- Δυσκολία αποδόμησης των περισσοτέρων ανόργανων ουσιών
- Δυσκολία αποδόμησης ορισμένων σύνθετων οργανικών ουσιών

2.3.2 Θερμική επεξεργασία εδάφους

²¹ Καββάδας Μ., Πανταζίδου Μ. [2007] «Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής», Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Η μέθοδος της θερμική επεξεργασίας του εδάφους για την απορρύπανση του συνήθως γίνεται σε κλιβάνους. Σκοπός της διαδικασία αυτής είναι η αφαίρεση πτητικών ρύπων σε αυξημένη θερμοκρασία (π.χ .πετρελαιοειδή, κυανιούχα, πολυκυκλικές αρωματικές ενώσεις, αμίαντος κλπ). Εάν η θερμοκρασία αυξηθεί σημαντικά προκαλείται καύση (incineration) των περισσότερων οργανικών ουσιών. Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί για την απορρύπανση εδαφών μολυσμένα με PCBs. Ο τρόπος θέρμανσης θα πρέπει να ελέγχεται απόλυτα επειδή υπό ορισμένες συνθήκες είναι δυνατόν να παραχθούν δηλητηριώδη αέρια (π.χ. αέρια που περιέχουν διοξίνες) και να διαφύγουν στην ατμόσφαιρα. Μια άλλη μέθοδος θερμικής επεξεργασίας του εδάφους επιτόπου είναι η παροχή υπέρθερμου ατμού στο έδαφος (steamstripping) μέσω γεωτρήσεων. Με τον τρόπο αυτό, εξατμίζονται οι πτητικοί ρύποι και συλλέγονται με άλλες γεωτρήσεις, στις οποίες ασκείται αναρρόφηση και οι ρύποι διαλύονται στο νερό του ατμού και αφαιρούνται μαζί με το νερό με σύστημα αποστράγγισης.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί με δυο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι εκσκαφή του εδάφους με επεξεργασία του μέσα σε κλίβανος (exsitu). Ο δεύτερος τρόπος είναι με παροχή υπέρθερμου ατμού στην περιοχή όπου το έδαφος είναι μολυσμένο (insitu).²²

2.3.3 Χημική επεξεργασία

Οι χημικές μέθοδοι αποβλέπουν είτε στη διάσπαση των μολυσμένων ουσιών, είτε στη μετατροπή τους σε λιγότερο επιβλαβείς μορφές. Κατάλληλα χημικά αντιδραστήρια προστίθενται στο έδαφος προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή κάθε φορά χημική αντίδραση, ενώ η θέρμανση και η αναμόχλευση του εδάφους αποτελούν σε πολλές των περιπτώσεων απαραίτητες προϋποθέσεις για την πραγματοποίηση μιας χημικής αντίδρασης. Ορισμένες από τις πιο συχνά εφαρμοζόμενες μεθόδους της κατηγορίας αυτής θεωρούνται η οξείδωση, η αποχλωρίωση, η υδρόλυση, η χημική απόσπαση, η μεταβολή του pH κ.α.

Με την εφαρμογή της χημικής επεξεργασίας δίνεται η δυνατότητα εφαρμογής σε μεγάλη έκταση και σε ποικίλα εδάφη. Ωστόσο, για να είναι αποτελεσματική απαιτείται καλή ανάμιξη αντιδραστηρίων με το έδαφος. Αρνητικό σημείο αποτελεί το γεγονός ότι οι μη-αντιδρώντες αντιδραστήρες παραμένουν στο έδαφος και ότι παράγονται επιβλαβή ενδιάμεσα ή τελικά

²² Καββάδας Μ., Πανταζίδου Μ. [2007] «Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής», Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
Μαγκανάς Κ. [2004] «Εδαφική ρύπανση» (http://users.ntua.gr/mc05401/files/Soil_pollution.pdf)

προϊόντα. Τέλος, ακόμα ένα μειονέκτημα αποτελεί η απαίτηση προετοιμασίας του εδάφους με την αφαίρεση φερτών υλών.²³

Τα πλεονεκτήματα της χημικής επεξεργασίας είναι:

- Δυνατότητα πλήρους καταστροφής των ρυπαντικών ουσιών
- Δυνατότητα εφαρμογής σε μεγάλο εύρος εδαφών
- Ύπαρξη κινητών εργαστηριακών μονάδων σε μερικές από αυτές
- Πιθανότητα επαναχρησιμοποίησης του εδάφους σε περίπτωση μη υπερβολικών θερμοκρασιών

Ωστόσο τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι περισσότερα και σημαντικότερα:

- Υψηλό κόστος ορισμένων μεθόδων εξαιτίας των υψηλών ποσοτήτων ενέργειας
- Πιθανή μη απομάκρυνση των βαρών μετάλλων
- Δυνατότητα δημιουργίας επιβλαβών προϊόντων καύσης
- Απαίτηση ελέγχου των αερίων εκπομπών και των υδροποιημένων μετάλλων
- Πιθανότητα καταστροφής των εδαφών από τις υψηλές θερμοκρασίες
- Πιθανή απαίτηση έγκρισης εφαρμογής τους από εξουσιοδοτημένη αρχή²⁴

2.3.4 Έκπλυση εδάφους

Η έκπλυση του εδάφους είναι μία τεχνολογία φυσικού ή/και χημικού διαχωρισμού κατά την οποία γίνεται εκσκαφή και πλύση του εδάφους έτσι ώστε να απομακρυνθούν οι περιεχόμενοι ρύποι. Η μέθοδος είναι εφαρμόσιμη για την κατεργασία ενός μεγάλου εύρους ανόργανων και οργανικών ρύπων που περιλαμβάνουν βαρέα μέταλλα, ραδιονουκλίδια, κυανιούχα, αρωματικές ενώσεις, φυτοφάρμακα και πολυχλωριωμένες φαινόλες (PCBs). Η έκπλυση του εδάφους απομακρύνει τους ρύπους με τους ακόλουθους τρόπους:

²³ Λατινόπουλος Π. (2007), «Οικονομική του Περιβάλλοντος και των Φυσικών Πόρων», Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

²⁴ Λατινόπουλος Π. (2007), «Οικονομική του Περιβάλλοντος και των Φυσικών Πόρων», Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

- 1) Συγκεντρώνει τους ρύπους σε μικρότερο όγκο εδάφους, εφαρμόζοντας τεχνικές επεξεργασίας μεταλλευμάτων
- 2) Διαλύει τους ρύπους στο διάλυμα έκπλυσης

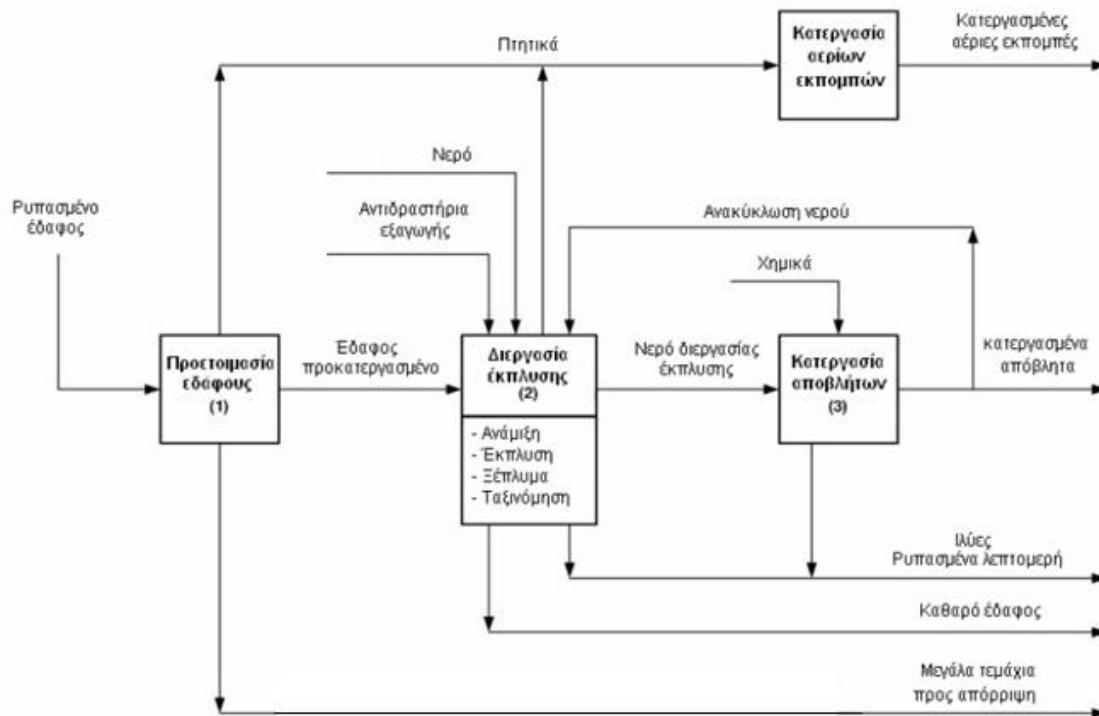
Στον πρώτο τρόπο, τα σωματίδια καθαρού και ρυπασμένου εδάφους διαχωρίζονται εκμεταλλευόμενοι τις φυσικές τους ιδιότητες, όπως η επιλεκτική τους ρόφηση στα λεπτομερή τεμάχια αργίλου του εδάφους, διαφοροποιήσεις στο ειδικό βάρος, τις μαγνητικές και επιφανειακές ιδιότητές τους. Επιστημονικές μελέτες έχουν αποδείξει ότι ένα μεγάλο ποσοστό της ρύπανσης του εδάφους, ιδιαίτερα από οργανικές ενώσεις, σχετίζεται ή συγκρατείται από τα πολύ μικρά (άργιλος και ιλύς) σωματίδια του εδάφους. Σε αυτές τις περιπτώσεις ένας φυσικός διαχωρισμός των μεγάλων σωματιδίων (άμμος και χαλίκια) από την ιλύ, την άργιλο και τα χουμικά υλικά, συγκεντρώνει ικανοποιητικά τους ρύπους στο λεπτομερές κλάσμα.

Η δεύτερη τεχνική έκπλυσης περιλαμβάνει τη χημική επεξεργασία με τη χρήση νερού ή χημικών αντιδραστηρίων και στοχεύει στην επιλεκτική εκχύλιση των ρύπων από τα σωματίδια του εδάφους, ή την ολική διαλυτοποίηση των ρυπασμένων σωματιδίων. Η χημική επεξεργασία εφαρμόζεται κυρίως για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων με τη χρήση διαφορετικών αντιδραστηρίων εκχύλισης, όπως ανόργανα οξέα (υδροχλωρικό οξύ, θειϊκό οξύ, $\text{pH} < 2$), οργανικά οξέα (οξικό, γαλακτικό, κιτρικό οξύ, $\text{pH} \geq 4$), αντιδραστήρια συμπλοκοποίησης όπως EDTA, και Νιτριλο-τριοξικό οξύ (NTA), και συνδυασμός αυτών των αντιδραστηρίων. Στην περίπτωση οργανικών ρύπων η χρήση αντιδραστηρίων επιφανειακής ενεργοποίησης θα πρέπει να γίνεται με προσοχή αφού τα αντιδραστήρια αυτά αυξάνουν τη διαλυτότητα των οργανικών στα υδατικά διαλύματα.

Η διαδικασία της έκπλυσης του εδάφους περιλαμβάνει τρεις κύριες εργασίες:

1. Εντατική ανάμιξη του ρυπασμένου εδάφους με το υγρό έκπλυσης
2. Διαχωρισμός των καθαρών σωματιδίων εδάφους
3. Επεξεργασία της υδατικής φάσης που περιέχει τους διαλελυμένους ή εναιωρήσει ρύπους.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα γενικό διάγραμμα ροής μίας μεθόδου έκπλυσης εδάφους



Διάγραμμα 4, Τυπικό διάγραμμα ροής κυκλώματος έκπλυσης ρυπασμένων εδαφών, πηγή: Πανταζίδου Μ. «Μέθοδοι στερεοποίησης/σταθεροποίησης» Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων, Ε.Μ.Π.

Σε πρώτο στάδιο, το ρυπασμένο έδαφος κοσκινίζεται για να απομακρυνθούν μεγάλα κομμάτια ξύλου, ρίζες, πέτρες, κ.λπ. Το μέγιστο επιτρεπόμενο μέγεθος εξαρτάται από τον εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί και κυμαίνεται από 10 έως 50 mm.

Το κύριο στάδιο έκπλυσης του εδάφους περιλαμβάνει την ανάμιξη, την έκπλυση, το ξέπλυμα και την ταξινόμηση του υλικού. Στο στάδιο της έκπλυσης του εδάφους λαμβάνουν χώρα δύο κύριοι μηχανισμοί. Ο πρώτος είναι η διασπορά των λεπτομερών ρυπασμένων σωματιδίων τα οποία υπάρχουν ως συσσωματώματα ή καλύπτουν την επιφάνεια των σωματιδίων εδάφους. Για καλύτερη διασπορά χρησιμοποιούνται υδροξείδιο του νατρίου και άλλα αντίστοιχα αντιδραστήρια ή υλικά. Ο δεύτερος μηχανισμός είναι η αλατοποίηση των ρύπων στο υδατικό διάλυμα, η οποία μπορεί να ενταθεί με την προσθήκη των κατάλληλων χημικών αντιδραστηρίων όπως ανόργανα ή οργανικά οξέα, μέσα συμπλοκοποίησης και τροποποιητικά επιφανειακών ιδιοτήτων συν-διαλυτικά, εξαρτώμενη από τον τύπο των ρύπων. Η έντονη επαφή μεταξύ των κόκκων εδάφους και του διαλύματος έκπλυσης έχει ως αποτέλεσμα τη αλατοποίηση των ρύπων του εδάφους και τη διασπορά τους στο νερό.

Μετά από ανάμιξη για κατάλληλο χρονικό διάστημα, τα καθαρά σωματίδια του εδάφους και το νερό έκπλυσης το οποίο περιέχει τους διαλυμένους ρυπαντές διαχωρίζονται. Οι τεχνικές διαχωρισμού στα συστήματα έκπλυσης εδάφους είναι όμοια με αυτά που εφαρμόζονται στη βιομηχανία επεξεργασίας μεταλλευμάτων. Οι πιο κοινές τεχνικές διαχωρισμού είναι οι ακόλουθες:

- **Υδροκυκλώνες.** Ο διαχωρισμός σωματιδίων στους υδροκυκλώνες στηρίζεται στην αρχή της φυγόκεντρου δύναμης. Ο πολφός που περιέχει το καθαρό έδαφος και τα ρυπασμένα σωματίδια διαχωρίζεται σε ένα ρεύμα κατερχόμενης ροής, στο οποίο συλλέγεται το χονδρομερές κλάσμα και ένα ρεύμα υπερχείλισης στο οποίο περιέχεται το λεπτομερές κλάσμα. Για την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος, μπορούν να τοποθετηθούν πολλοί υδροκυκλώνες σε σειρά. Είναι επίσης δυνατός ο επιλεκτικός διαχωρισμός για σωματίδια με μέγεθος κόκκων μεγαλύτερο από 10-20 μm .

- **Σύστημα διαχωρισμού ρευστοστερεάς κλίνης.** Το συγκεκριμένο σύστημα διαχωρισμού βασίζεται στη διαφορετική βαρυτομετρική ταχύτητα καθίζησης μεταξύ των λεπτομερών ρυπασμένων σωματιδίων και του χονδρομερούς κλάσματος των καθαρών σωματιδίων εδάφους. Ο πολφός που περιέχει τα ρυπασμένα και καθαρά σωματίδια εδάφους τροφοδοτείται από το ανώτερο σημείο μία κατακόρυφης στήλης αντίθετα προς τη ροή του διαλύματος εκχύλισης. Ο ρυθμός έγχυσης του διαλύματος στη στήλη ρυθμίζεται ώστε να είναι δυνατή η καταβύθιση των χονδρομερών σωματιδίων του εδάφους. Το διάλυμα έκπλυσης που περιέχει τα ρυπασμένα σωματίδια απομακρύνεται από το ανώτερο τμήμα της στήλης. Με το σύστημα αυτό επιτυγχάνεται ο επιλεκτικός διαχωρισμός για σωματίδια με μέγεθος κόκκων μεγαλύτερο από 50 μm .

- **Βαρυτομετρικά συστήματα διαχωρισμού,** όπως υδροσυγκεντρωτές, δονούμενες τράπεζες, σπειροειδείς συγκεντρωτές τύπου Humphrey, κ.λπ.

- **Επίπλευση.** Σε αρκετές περιπτώσεις, οι ρύποι που προσροφώνται στην επιφάνεια σωματιδίων αργίλου, ή ρύποι που είναι διακριτοί στο έδαφος, παρουσιάζουν διαφορετικές επιφανειακές ιδιότητες σε σχέση με τα καθαρά σωματίδια εδάφους. Με την προσθήκη ειδικών χημικών ουσιών, είναι δυνατή η δημιουργία υδρόφοβης επιφάνειας στα ρυπασμένα σωματίδια. Ο αερισμός του πολφού έχει ως αποτέλεσμα την προσάρτηση των υδρόφοβων ρυπασμένων σωματιδίων στην επιφάνεια των σχηματιζόμενων φυσαλίδων αέρα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η επιλεκτική επίπλευση των συγκεκριμένων σωματιδίων. Σε αντίθεση με τις μεθόδους βαρυτομετρικού διαχωρισμού, η επίπλευση παρέχει τη δυνατότητα διαχωρισμού ρυπασμένων και μη-ρυπασμένων σωματιδίων του ίδιου

μεγέθους κόκκων και της ίδιας πυκνότητας αλλά διαφορετικών επιφανειακών ιδιοτήτων.

Μετά από το στάδιο διαχωρισμού, το χονδρομερές κλάσμα του εδάφους διαβρέχεται με καθαρό νερό για την απομάκρυνση τυχόν ρύπων που παραμένουν σε αυτό ή λεπτομερών σωματιδίων εδάφους τα οποία μπορεί να είναι προσκολλημένα.

Η έκπλυση του εδάφους δεν αποτελεί τις περισσότερες φορές μία μέθοδο που εφαρμόζεται ανεξάρτητα. Στην πραγματικότητα, τόσο το λεπτομερές κλάσμα του εδάφους(άργιλος και ιλύς) όσο και το νερό μετά την έκπλυση υφίστανται περαιτέρω επεξεργασία και απόθεση, με τον καταλληλότερο τρόπο, για να ολοκληρωθεί ο καθαρισμός.

Για την απογύμνωση του διαλύματος έκπλυσης, το οποίο περιέχει τους διαλελυμένους ρυπαντές και τεμάχια λεπτομερούς ρυπασμένου εδάφους, εφαρμόζονται μία σειρά από φυσικές και χημικές μεθόδους. Οι διαλελυμένοι ρυπαντές μπορεί να απομακρυνθούν με την εφαρμογή χημικών μεθόδων όπως για παράδειγμα εξουδετέρωση, καταβύθιση, ιονανταλλαγή, κ.λπ. ενώ τα εν αιωρήσει σωματίδια που έχουν προκύψει από το ρυπασμένο έδαφος ή έχουν παραχθεί κατά τη διάρκεια της κατεργασίας του διαλύματος έκπλυσης μπορεί να απομακρυνθούν με την εφαρμογή φυσικών τεχνικών όπως κροκίδωση, πάχυνση και διήθηση. Το σύνολο, ή ένα μέρος του διαυγασμένου νερού ανακυκλώνεται στο στάδιο έκπλυσης του εδάφους.

Η λάσπη που παράγεται από το στάδιο απογύμνωσης του διαλύματος έκπλυσης αφυδατώνεται σε φυγόκεντρο, φιλτρόπρεσα ή ταινιόπρεσσα. Η ποσότητα της παραγόμενης λάσπης αποτελεί έναν καθοριστικό παράγοντα για την εκτίμηση του κόστους και της αποτελεσματικότητας της έκπλυσης του εδάφους. Η λάσπη αυτή αποτελείται κυρίως από σωματίδια αργίλου. Παρά το γεγονός ότι το κλάσμα των ρυπασμένων συστατικών είναι σχετικά χαμηλό, η ολική συγκέντρωση των ρύπων είναι σχετικά υψηλή με αποτέλεσμα η λάσπη να χαρακτηρίζεται συνήθως ως επικίνδυνο απόβλητο. Η τελική της διαχείριση μπορεί να περιλαμβάνει είτε διάθεση σε χώρο απόθεσης επικίνδυνων αποβλήτων, η περαιτέρω επεξεργασία με τη χρήση θερμικών τεχνικών καθώς και τεχνικών σταθεροποίησης.

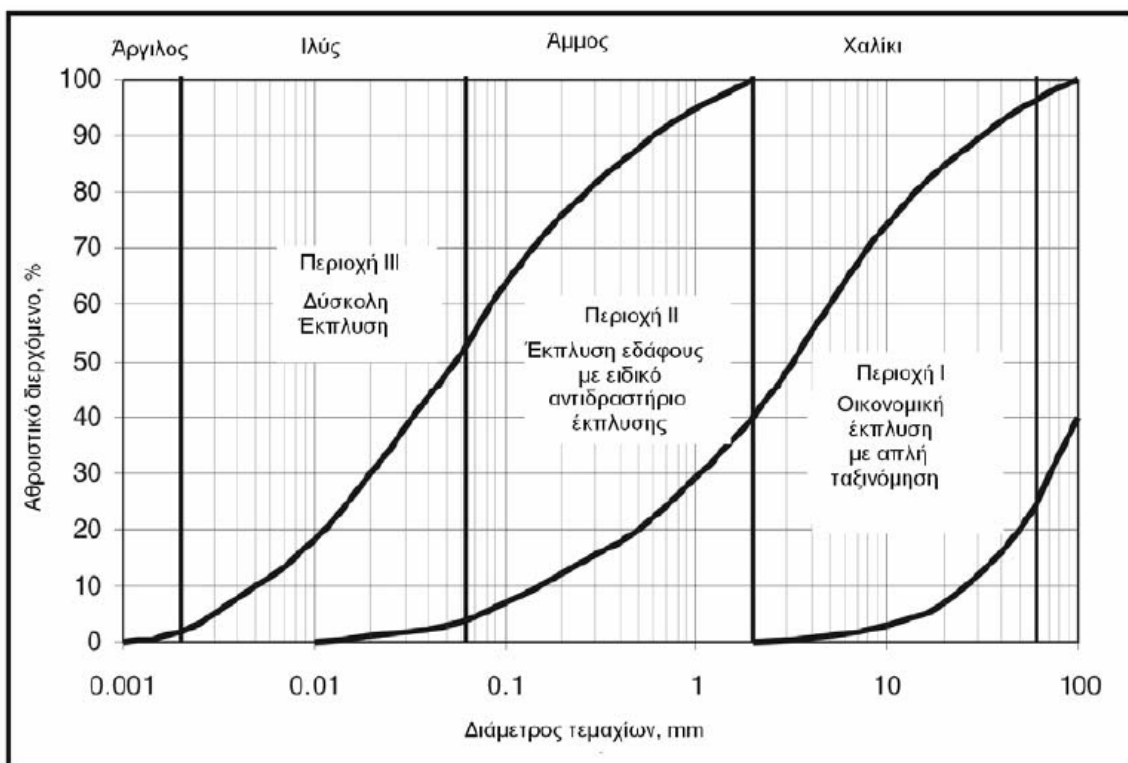
Στη μέθοδο έκπλυσης του εδάφους που περιγράφηκε μπορεί να παραχθούν παράπλευρα ρεύματα, όπως εκπομπές αέρα, χρησιμοποιημένα διαλυτικά, εξαντλημένες ρητίνες, κ.λπ. που να χρήσουν κατάλληλης διαχείρισης.

Παράμετροι Σχεδιασμού

Οι παράμετροι που κυρίως επηρεάζουν την οικονομικότητα της έκπλυσης του εδάφους περιλαμβάνουν τις φυσικοχημικές παραμέτρους του εδάφους

(κοκκομετρία ,ικανότητα ανταλλαγής ιόντων, ποσοστό αργίλου, ιλύος ή οργανικού υλικού), και τον τύπο και τη συγκέντρωση των ρυπαντών.

Τα εδάφη που χαρακτηρίζονται από υψηλά ποσοστά άμμου και χαλικιού ανταποκρίνονται καλλίτερα στην έκπλυση από τα λεπτομερή εδάφη. Υψηλά ποσοστά αργίλου και ιλύος μειώνουν την ικανότητα απομάκρυνσης. Πρακτικά, η έκπλυση του εδάφους είναι καταλληλότερη για εδάφη που περιέχουν τουλάχιστον 50% άμμο/χαλίκι, δηλ. παραθαλλάσια και παραποτάμια εδάφη και εδάφη με πλειστόκαινες αποθέσεις. Τα εδάφη που είναι πλούσια σε άργιλο και ιλύ αποδεικνύονται ανεπαρκή για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος έχουν εξετασθεί σε εργαστηριακή κλίμακα τροποποιημένες τεχνικές έκπλυσης εδαφών πλούσια σε άργιλο και ιλύ, όμως δεν είναι ακόμα αποδεδειγμένη η εφαρμοσιμότητά τους σε κλίμακα πεδίου. Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται τα διαφορετικά επίπεδα δυσκολίας στην εφαρμογή των μεθόδων έκπλυσης του εδάφους για διαφορετική κοκκομετρία ρυπασμένου εδάφους σύμφωνα με την εκτίμηση του Γραφείου Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α.



Διάγραμμα 5, Αποτελεσματικότητα τεχνικών έκπλυσης για διάφορους τύπους εδαφών, πηγή: Πανατζίδου Μ. «Μέθοδοι στερεοποίησης/σταθεροποίησης» Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων, Ε.Μ.Π.

Η ικανότητα ανταλλαγής ιόντων (Cation exchange capacity, CEC) υπολογίζει την τάση του εδάφους να ανταλλάσει ασθενώς δεσμευμένα κατιόντα στα σωματίδια του εδάφους με κατιόντα που περιέχονται στο διάλυμα

έκπλυσης. Εδάφη με σχετικά χαμηλές τιμές CEC (μικρότερες από 50 έως 100 meq/kg) ανταποκρίνονται καλύτερα στην έκπλυση από εδάφη με υψηλότερες τιμές CEC. Επιπλέον, η υψηλή περιεκτικότητα χουμικών στο έδαφος δυσκολεύει σημαντικά το διαχωρισμό των ρυπαντών. Τα χουμικά δημιουργούνται από την αποσύνθεση απορριμμάτων και υπολειμμάτων φυτικών και ζωικών οργανισμών και παρέχουν θέσεις δέσμευσης για τη συσσώρευση τόσο οργανικών ενώσεων όσο και μετάλλων. Ένας αρχικός χαρακτηρισμός αυτών των παραμέτρων και της μεταβλητότητά τους παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για μία αρχική εκτίμηση της έκπλυσης του εδάφους ως εναλλακτικής μεθόδου επεξεργασίας.

Άλλοι παράγοντες που θα πρέπει να διερευνηθούν περιλαμβάνουν τις χημικές και φυσικές ιδιότητες του ρύπου. Η διαλυτότητα στο νερό (ή και σε άλλα υγρά έκπλυσης) είναι ένα από τα σημαντικότερα φυσικά χαρακτηριστικά. Οι υδρόφοβοι ρύποι μπορεί να είναι δύσκολο να διαχωριστούν από τα σωματίδια του εδάφους σε ένα υδατικό διάλυμα έκπλυσης. Η αντιδραστικότητα με το διάλυμα έκπλυσης, σε κάποιες περιπτώσεις, μπορεί επίσης να αποτελέσει ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη. Άλλα χαρακτηριστικά του ρύπου όπως η πτητικότητα και η πυκνότητα μπορεί να είναι σημαντικά για το σχεδιασμό των μελετών επιλογή της μεθόδου αποκατάστασης και των σχετικών συστημάτων διαχείρισης των αποβλήτων.

Πολύπλοκα μίγματα ρυπαντών στο έδαφος, όπως για παράδειγμα μίγμα μετάλλων, μη πτητικών οργανικών, ημιπτητικών οργανικών, κ.λπ., δυσκολεύουν την επιλογή ενός μοναδικού διαλύματος έκπλυσης το οποίο θα απομακρύνει όλα τα διαφορετικά είδη ρυπαντών από το έδαφος. Έτσι συνήθως απαιτούνται σταδιακές εκπλύσεις με τη χρήση διαφορετικών προσθέτων. Στην πραγματικότητα, κάθε είδος ρυπασμένου εδάφους απαιτεί και μία ειδική μέθοδο επεξεργασίας, η οποία καθορίζεται με τη διεξαγωγή εργαστηριακών ή πιλοτικών δοκιμών, προκειμένου να προσδιοριστούν οι πιθανές τροποποιήσεις του συστήματος και οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας.

Οι συχνές αλλαγές στο είδος του ρύπου και την συγκέντρωσή του στο προς επεξεργασία έδαφος μπορεί να περιορίσει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας έκπλυσης. Για να αντιμετωπιστούν οι αλλαγές στη χημική ή φυσική σύνθεση του προς επεξεργασία εδάφους, απαιτούνται διαφοροποιήσεις στη σύνθεση του διαλύματος έκπλυσης και τις συνθήκες λειτουργίας. Εναλλακτικά, μπορεί να απαιτηθεί η ανάμιξη εδαφών πριν από την επεξεργασία προκειμένου να επιτευχθεί ομοιόμορφη τροφοδοσία υλικού όσον αφορά τη συγκέντρωση των ρύπων.

Πρόσθετα όπως τα surfactants είναι πιθανό να απαιτηθούν για να βελτιώσουν την ικανότητα απομάκρυνσης. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν πρόσθετα είναι δυνατόν να απαιτηθούν μεγαλύτερες ποσότητες διαλύματος έκπλυσης. Χημικά αντιδραστήρια, surfactants, διαλύτες

και άλλα πρόσθετα είναι συχνά δύσκολο και οικονομικά ασύμφορο να ανακτηθούν από το χρησιμοποιημένο διάλυμα έκπλυσης και να ανακυκλωθούν στη διαδικασία έκπλυσης του εδάφους. Η παρουσία των προσθέτων δυσκολεύει την επεξεργασία του χρησιμοποιημένου διαλύματος έκπλυσης με τις παραδοσιακές μεθόδους όπως καθίζηση, χημική καταβύθιση, ή επεξεργασία με ενεργό άνθρακα. Επιπρόσθετα, η παρουσία προσθέτων στο ρυπασμένο έδαφος και τη λάσπη επεξεργασίας, είναι δυνατό να δυσχεράνει τη διάθεσή τους.²⁵

2.3.5 Εκσκαφή εδάφους

Μια μέθοδος αντιμετώπισης αποτελεί η αφαίρεση (με εκσκαφή) του εδάφους που έχει ρυπανθεί και η μεταφορά και απόρριψή του σε ελεγχόμενους αποδέκτες με σύγχρονα συστήματα προστασίας από την επέκταση της ρύπανσης (συστήματα στεγάνωσης του πυθμένα, συστήματα συλλογής και απομάκρυνσης του υγρού στραγγίσματος, συστήματα κάλυψης κλπ). Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις (κυρίως σε περιπτώσεις εντοπισμένης ρύπανσης) και παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα, τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- Η πιθανή διαφυγή ρύπων κατά την εκσκαφή και μεταφορά των εδαφικών υλικών προς τους χώρους απόρριψης (κυρίως με τη μορφή σκόνης και υγρού στραγγίσματος).
- Νομικοί περιορισμοί ως προς τη δυνατότητα μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων από ορισμένους δρόμους.
- Πολύ μεγάλο κόστος, ιδίως στις περιπτώσεις που οι ποσότητες των εδαφικών υλικών που πρέπει να αφαιρεθούν είναι μεγάλες.
- Δεν αποτελεί λύση του προβλήματος, αλλά απλή μεταφορά του σε άλλη θέση.
- Η έλλειψη κατάλληλων χώρων επαρκούς χωρητικότητας για την απόρριψη των ρυπανθέντων υλικών αλλά και το υψηλό κόστος κατασκευής των μέτρων προστασίας από την επέκταση της ρύπανσης στους χώρους αυτούς.

Για τους ανωτέρω λόγους η μέθοδος αυτή δεν χρησιμοποιείται παρά μόνον σε περιπτώσεις ρύπανσης με πολύ περιορισμένη έκταση.

²⁵ Πανταζίδου Μ. «Έκπλυση εδάφους» Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων, Ε.Μ.Π.

2.3.6 Εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Για την εξαέρωση πτητικών υδρογονανθράκων εφαρμόζεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υψηλής συχνότητας. Η εξαέρωση επιτυγχάνεται από τη θέρμανση του εδάφους σε θερμοκρασίες 150 °C για χρονικό διάστημα δύο εβδομάδων²⁶.

²⁶ Πανταζίδου Μ. «Εκπλυση εδάφους» Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων, Ε.Μ.Π.

3. Κριτήρια επιλογής τεχνολογιών απορρύπανσης ρυπασμένων εδαφών

Ύστερα από την μελέτη και ανάλυση των διαθέσιμων τεχνολογιών απορρύπανσης ρυπασμένων εδαφών στο κεφάλαιο 2 διαπιστώνεται ότι υπάρχουν πολλές επιλογές για κάθε περίπτωση. Ωστόσο δεν είναι δυνατή η εφαρμογή της κάθε μεθόδου σε κάθε περίπτωση. Η επιλογή της τεχνολογίας πρέπει να γίνεται βάσει κάποιων κριτηρίων. Ενδεικτικά, παρακάτω αναλύονται κάποια κριτήρια επιλογής και αξιολόγησης τεχνολογιών.

- **Δυνατότητα εφαρμογής – Χαρακτηριστικά περιοχής:** Η τεχνολογία απορρύπανσης που επιλέγεται οφείλει να είναι εφαρμόσιμη τόσο για την περίπτωση των ρυπογόνων ουσιών (είτε αυτές βρίσκονται σε στερεή είτε σε υγρή ή αέρια φάση) όσο και σχετικά με το είδος του μέσου που μελετάται κάθε φορά (είτε πρόκειται για εδαφικό υλικό είτε για υπόγεια νερά).
- **Τύπος – Συγκέντρωση ρύπου:** Σημαντικό παράγοντα επιλογής αποτελεί η φυσική υπόσταση του ρύπου, βάσει της οποίας πραγματοποιείται η κατηγοριοποίηση τους, καθώς και αν αυτός ο ρύπος που εμφανίζεται είναι τοξικός ή όχι. Στο ίδιο μήκος κύματος κινείται και ο παράγοντας της συγκέντρωσης του ρύπου, εφόσον κάποιες από τις διαθέσιμες τεχνολογίες δεν ενδείκνυνται για μεγάλη έκταση ρυπαντικού φορτίου.
- **Αξιοπιστία:** Αποτελεί υψίστης σημασίας κριτήριο επιλογής, καθώς η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία οφείλει να εξασφαλίσει το απαιτούμενο επίπεδο αποτελεσματικότητας και συγχρόνως να παρέχει αποτελέσματα αξιόπιστα, τα οποία συμβαδίζουν με τους στόχους που έχουν τεθεί πρωταρχικά.
- **Απαιτούμενος χρόνος:** Άξιο αναφοράς θεωρείται ο παράγοντας του χρόνου, καθώς συνδέεται άμεσα τόσο με το είδος των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων που υφίστανται στη συγκεκριμένη περιοχή και επιτάσσουν την άμεση ή βραδεία επαναχρησιμοποίηση της, όσο και με το μέγεθος και την επικινδυνότητα της υφιστάμενης ρύπανσης που αξιώνουν την άμεση ή βραδεία απομάκρυνση της.
- **Απαιτούμενα δεδομένα:** Προκύπτουν από τις διάφορες διαδικασίες μετρήσεων που λαμβάνουν χώρα και προσδίδουν το είδος και το επίπεδο της ρύπανσης, προκειμένου να αποκτηθεί το απαραίτητο υπόβαθρο και να επιλεγεί η αρμόζουσα μέθοδος αποκατάστασης.

- **Κόστος:** Θεωρείται, πιθανόν, ο σημαντικότερος μη-τεχνικής φύσεως παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη, προκειμένου να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος αποκατάστασης. Παρόλα αυτά, αποτελεί παράγοντα δύσκολα υπολογίσιμο εξαιτίας των ποικίλων παραμέτρων που υπεισέρχονται στον υπολογισμό του, αλλά και των διαφόρων δυσκολιών που παρουσιάζονται κατά τον χαρακτηρισμό των ρυπασμένων περιοχών.
- **Ασφάλεια:** Πρόκειται για αρκετά αξιοπρόσεχτο παράγοντα επιλογής, καθώς αναφερόμαστε σε διαδικασίες αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών από επικίνδυνες ουσίες, όπου οι επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό λόγω της έκθεσης του σε αυτές, ενδέχεται να είναι αρκετά σοβαρές.
- **Περιβαλλοντικές επιπτώσεις:** δεν θα μπορούσε να παραληφθεί ο περιβαλλοντικός παράγοντας, ο οποίος συνίσταται είτε στα διάφορα τεχνικά έργα που υλοποιούνται και μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά τον περιβάλλοντα χώρο είτε στα διάφορα υπολείμματα και παραπροϊόντα που ενδέχεται να προκύψουν ως αποτέλεσμα της εφαρμογής συγκεκριμένων τεχνολογιών.²⁷

²⁷ Ζαλίδης Γ. «Ρύπανση και Προστασία Περιβάλλοντος» Διδακτικές Σημειώσεις Ενίσχυση Προγράμματος Μαθημάτων Επιλογής Τμήματος Γεωπονίας

4.Στρατηγική για την αειφορική αποκατάσταση των εδαφών

Για την επίτευξη της αποκατάστασης των εδαφών όπου εντοπίζονται αυξημένοι ρύποι δεν είναι αρκετό να επιλεγεί μια τεχνολογία απορρύπανσης. Θα πρέπει να ακολουθηθεί μια αειφορική διαχειριστική πρακτική ώστε να υπάρξουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Παρακάτω περιγράφεται συνοπτικά η πορεία που πρέπει να ακολουθηθεί ώστε να αποκατασταθούν τα εδάφη και να αποκτήσουν ξανά τον πολυλειτουργικό τους χαρακτήρα.

1. **Περιγραφή του προβλήματος:** αρχικά απαιτείται η περιγραφή της παρούσας κατάστασης ως προς τέσσερις συνιστώσες, την περιβαλλοντική, την κοινωνική την οικονομική και τα πιθανά αίτια που προκάλεσαν αυτή την κατάσταση. Επίσης, απαιτείται η περιγραφή των επιπτώσεων της παρούσας κατάστασης στην υγεία των κατοίκων, στην οικολογική ισορροπία αλλά και στην περαιτέρω κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη. Όπως διαπιστώνεται, η ρύπανση του εδάφους αποτελεί σημαντικό τροχοπέδη στη βιώσιμη ανάπτυξη μιας περιοχής καθώς επηρεάζει αρνητικά και τους τρεις πυλώνες της (οικονομική ανάπτυξη, προστασία περιβάλλοντος και κοινωνική συνοχή). Έπειτα, απαιτείται μια οικονομική ποσοτικοποίηση όλων των επιπτώσεων της υφιστάμενης κατάστασης εφόσον βέβαια είναι δυνατό να υπολογιστούν. Για όσες επιπτώσεις δεν είναι δυνατό να υπολογιστούν μπορεί να γίνει μια απλή αρίθμηση.

2. **Προτεινόμενες λύσεις:** οι προτεινόμενες λύσεις προκύπτουν μέσα από την ταυτόχρονη σύνθεση των περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών παραμέτρων του προβλήματος της αποκατάστασης των λειτουργιών των χερσαίων οικοσυστημάτων. Κάθε μια από τις προτεινόμενες λύσεις οφείλει να φανερώνει τις πιθανές θετικές ή αρνητικές περιβαλλοντικές και κοινωνικό-οικονομικές συνέπειες. Επίσης, επιβάλλεται να καταδεικνύει τις ανάγκες και τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για την πραγματοποίηση της και που θα αφορούν αλλαγές στην τεχνολογία, στις δυνατότητες παραγωγής, στο εργατικό δυναμικό, στις επενδύσεις, στα νομοθετικά και οικονομικά μέτρα, καθώς και στο κόστος όλων αυτών.

3. **Σύστημα παρακολούθησης και σχέδιο διαχείρισης του χερσαίου οικοσυστήματος μετά την αποκατάσταση:** Για την

αξιολόγηση της επιτυχίας της εφαρμογής κάποιου προγράμματος αποκατάστασης, αλλά και για την μετέπειτα ορθολογική διαχείριση του, καθίσταται απαραίτητος ο καθορισμός κάποιων φυσικών, χημικών και βιολογικών δεικτών που συνδέονται άμεσα με τη δομή και τη λειτουργία του και οι οποίοι θα παρακολουθούνται διεξοδικά με ένα αξιόπιστο σύστημα ελέγχου. Τέλος, θεωρείται απαραίτητη η εκπόνηση ενός διαχειριστικού σχεδίου, το οποίο θα λαμβάνει υπόψη του περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές παραμέτρους με σκοπό της διατήρησης της βιωσιμότητας του.²⁸

²⁸ Λατινόπουλος Π. (2007), «Οικονομική του Περιβάλλοντος και των Φυσικών Πόρων», Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη
Μπαντής Σ. (2008), «Γεωτεχνική Περιβάλλοντος, Μέρος Β», Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

Ζαλίδης Γ. «Ρύπανση και Προστασία Περιβάλλοντος» Διδακτικές Σημειώσεις Ενίσχυση Προγράμματος Μαθημάτων Επιλογής Τμήματος Γεωπονίας

Ζαμπετάκης, Λ., Μάνιο, Θ., Καρατζάς, Γ. [2005] Καινοτομικές μέθοδοι εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπογείων υδάτων. Η τεχνολογία της φωτοεξυγίανσης. Πρακτικά συνεδρίου Heleco '05, Αθήνα. Φορέας διεξαγωγής ΤΕΕ

Καββάδας Μ., Πανταζίδου Μ. [2007] «Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής», Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Λατινόπουλος Π. (2007), «Οικονομική του Περιβάλλοντος και των Φυσικών Πόρων», Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

Μαγκανάς Κ. [2004] «Εδαφική ρύπανση» (http://users.ntua.gr/mc05401/files/Soil_pollution.pdf)

Μπαντής Σ. (2008), «Γεωτεχνική Περιβάλλοντος, Μέρος Β», Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη
Πανταζίδου Μ. «Έκπλυση εδάφους» Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων, Ε.Μ.Π.

Πανταζίδου Μ. «Μέθοδοι στερεοποίησης/σταθεροποίησης» Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων, Ε.Μ.Π.

Πανταζίδου Μ. «Μέτρα και τεχνολογίες Αποκατάστασης» Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων, Ε.Μ.Π.

Παπαδιόχου Ο. και Τριανταφύλλου Μ. [2011]. Αποτίμηση της αξίας των νερών της λεκάνης του Ασωπού ποταμού με τη μέθοδο της υποθετικής αξιολόγησης. Διπλωματική εργασία του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.

Σαχινίδης Σ., Χριστοφορίδης Αχ, και Φώσκολος Αν. «Εφαρμογή της μεθόδου σταθεροποίησης-στερεοποίησης για τα απόβλητα μιας βιομηχανίας επιμεταλλώσεως. Μηχανισμοί και αποτελεσματικότητα της μεθόδου».
ScientificJournalArticles

Ξενόγλωσση

Brennan, M. A., and Shelley, M. L. (1999). A model of uptake, translocation and accumulation of lead by maize for the purpose of phytoextraction. Ecological Engineering, Vol. 2, pp. 271-297

Moyers R., Nichols J. and Whitlock I. [1997] Disadvantages of Pump and Treat Remediation

(<http://www.cee.vt.edu/ewr/environmental/teach/gwprimer/Pumptrt/Pumptrt.html>)

Reinout L., Wieberen P. and Geert S.[1984], Electro-reclamation: theory and practice. (contaminated soil). Engineering magazines: Chemistry and Industry

Reinout L., Wieberen P. and Geert S [2004] Electro-reclamation, a versatile soil remediation solution. Engineering Geology 77 (2005) 191–201

Suthan Ed. and Suthersan S. [1999], “IN SITU Air SPARGING” Boca Raton: CRC Press LLC

Voudrias E., [2001] Pump-Ana-Treat remediation of groundwater contaminated by hazardous waste: can it really be achieved?. GlobalNest: the Int. J. Vol 3, No 1, pp 1-10

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

Φορέας Προστασίας Περιβάλλοντος Ηνωμένων Εθνών: <http://www.epa.gov>

Φορέας Περιβάλλοντος και Διαχείρισης Ενέργειας Γαλλίας:

<http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=17583#tit1>

<http://www.cpeo.org/techtree/ttdescript/airspa.htm>

<http://www.kacweb.com/well/aswell.html>

<http://employees.oneonta.edu/vislovt/mgp/excavation/air%20sparging.htm>

<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-34.html>

http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA_9.pdf

<http://www.pollutionissues.com/A-Bo/Bioremediation.html>

<http://www.greenbelt.gr/gr/solutions.php?action=view&id=24>

<http://www.buzzle.com/articles/soil-pollution-causes-and-effects.html>

<http://visual.merriam-webster.com/earth/environment/land-pollution.php>

http://costperformance.org/pdf/Monticello_PeRTWall.pdf

http://maps.grida.no/go/graphic/soil_polluting_activities_from_selected_sources