

ΜΙΚΡΟΒΙΑΚΗ ΒΙΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Γιώργος Ζερβάκης

*Επίκουρος Καθηγητής
Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Μικροβιολογίας,
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών*

Το βασικό πρόβλημα: Παραγωγή επικίνδυνων χημικών ενώσεων

- Τεράστιες ποσότητες οργανικών και ανόργανων ενώσεων παράγονται κάθε χρόνο ως αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητα
- Η παραγωγή αυτή μπορεί να οφείλεται σε:
 - Προγραμματισμένους και καλά ελεγχόμενους ρύπους (π.χ. βιομηχανικές εκπομπές)
 - Τυχαία και σε μεγάλο βαθμό αναπόφευκτα συμβάντα/ατυχήματα (π.χ. πετρελαιοκηλίδες, διαρροή χημικών)

Βιοαποκατάσταση ('Bioremediation')

- Είναι η εφαρμογή βιολογικών διαδικασιών/μεθόδων επεξεργασίας υπογείων υδάτων, εδάφους ή ιλύος που έχουν επιβαρυνθεί από τοξικούς ρυπαντές
- Απαιτεί τον έλεγχο και τη ρύθμιση/διαχείριση της μικροβιακής βιομάζας και της ανάπτυξης της σε επιφανειακούς ή υπόγειους βιοαντιδραστήρες (φυσικούς ή τεχνητούς)

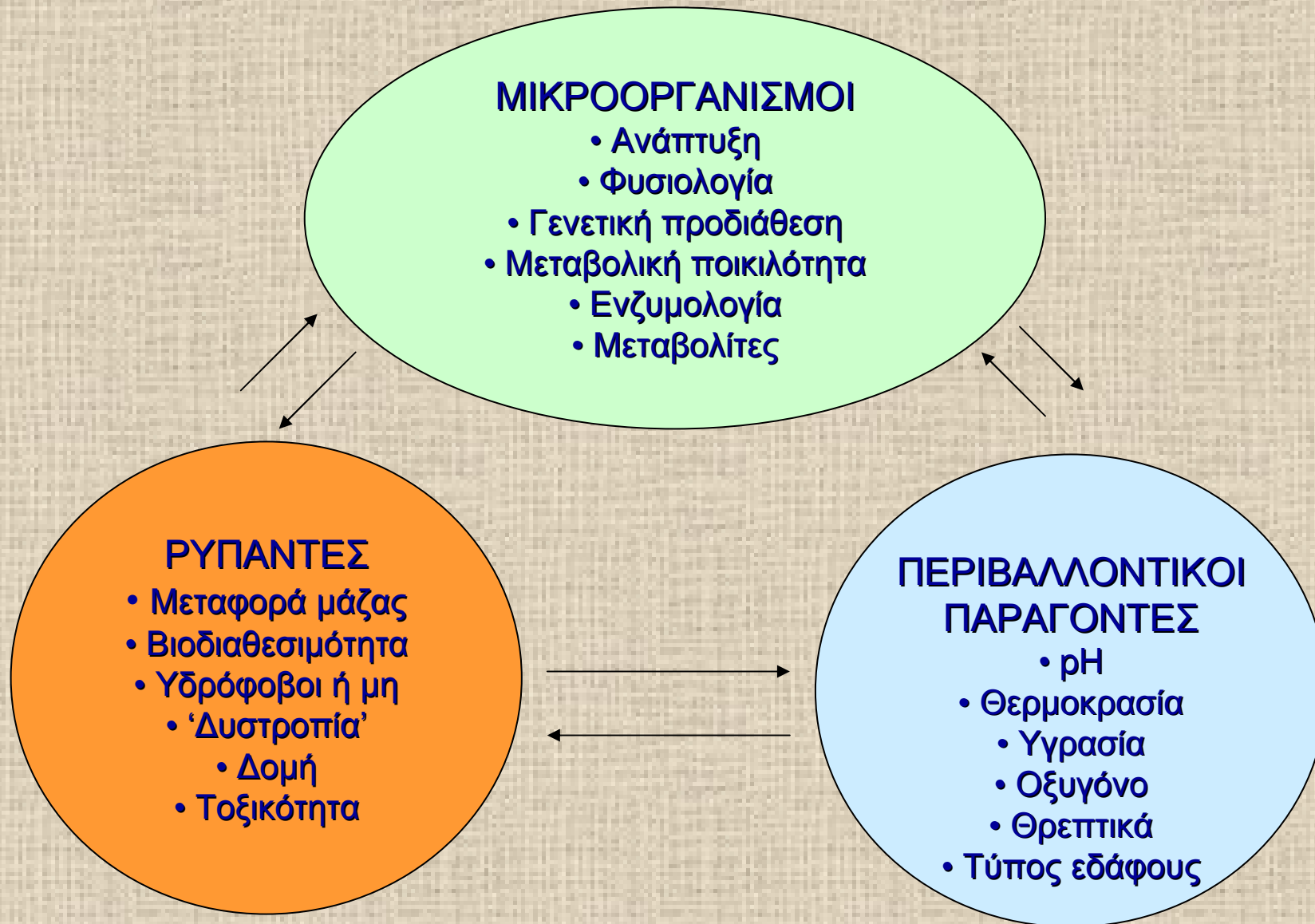


- Η σχετική τεχνολογία προάγει την ανάπτυξη και αναπαραγωγή αυτόχθονων (ή την εισαγωγή αλλόχθονων) μικροοργανισμών ώστε να επιτευχθεί ή/και να επιταχυνθεί η αποδόμηση οργανικών ενώσεων στη ζώνη ρύπανσης
- Επιτυγχάνει την αποδόμηση οργανικών ρυπαντών που έχουν διαλυθεί σε υπόγεια ύδατα και έχουν προσροφηθεί στην περιοχή γύρω από τον υδροφόρο ορίζοντα
- Γενικώς απαιτεί την εξασφάλιση της ύπαρξης ενός μηχανισμού που θα επάγει και θα διατηρεί τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών, όπως π.χ. την προσθήκη ενός δέκτη ηλεκτρονίων (οξυγόνο, νιτρικά), θρεπτικών ουσιών (άζωτο, φώσφορο) και μιας πηγής ενέργειας (άνθρακα)

Βιοαποκατάσταση ('Bioremediation')

- Οι ρυπαντές μπορούν να βιοαποδομηθούν in situ ή να απομακρυνθούν και να υποστούν επεξεργασία αλλού
- Αρχή λειτουργίας:
 - Απομόνωση ή προώθηση μεταβολικής δραστηριότητας μικροοργανισμών που μπορούν να βιοαποδομήσουν συγκεκριμένες κατηγορίες ρυπαντών
 - Δημιουργία κατάλληλων περιβαλλοντικών συνθηκών, ώστε η εν λόγω βιοαποδόμηση να συμβεί αποδοτικά και οικονομικά

Συστήματα βιοαποδόμησης στη βιοαποκατάσταση

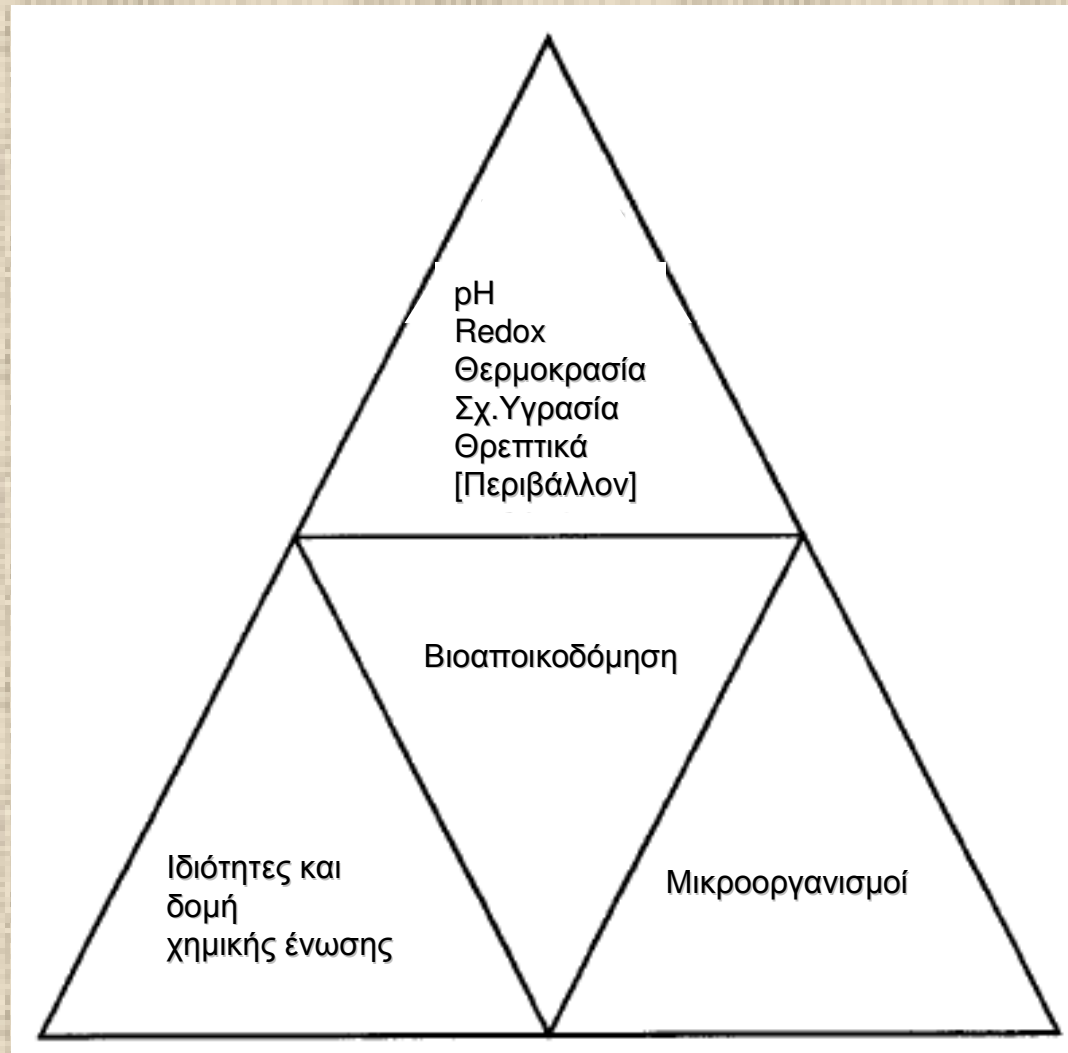


Βιοαποδόμηση ('Biodegradation')

- Η αποδόμηση των οργανικών ενώσεων (ρυπαντών) πραγματοποιείται από μικροοργανισμούς
- Ο σχεδιασμός της διαδικασίας βιοαποδόμησης εστιάζεται στη βελτιστοποίηση και στη διαχείριση συγκεκριμένων σταδίων των βιοχημικών κύκλων. Η βιοχημική δραστηριότητα κατά την οποία επιτυγχάνεται διάσπαση των ρυπαντών απαιτεί την παρουσία καταλυτών. Οι μικροοργανισμοί παράγουν τους καταλύτες, δηλ. ένζυμα που επάγουν καταβολικές αντιδράσεις αποδόμησης ενώσεων και παρέχουν ενέργεια και προϊόντα βιοσύνθεσης επιπλέον μικροβιακών κυττάρων
- Πως οι μικροοργανισμοί διασπούν τοξικές οργανικές ενώσεις?
 - Με απευθείας ανοργανοποίηση της ένωσης με τη μετατροπή της σε ανόργανα μόρια όπως διοξείδιο του άνθρακα ή μεταλλικά άλατα
 - Με παραγωγή ενζύμων που διασπούν την τοξική ένωση σε άλλη απλούστερη και μη τοξική
 - Με τη μετατροπή της αρχικής ένωση σε άλλη πιθανά ανάλογα τοξικής και μη επιδεκτικής περαιτέρω βιοαποδόμησης



Βιοαποδόμηση

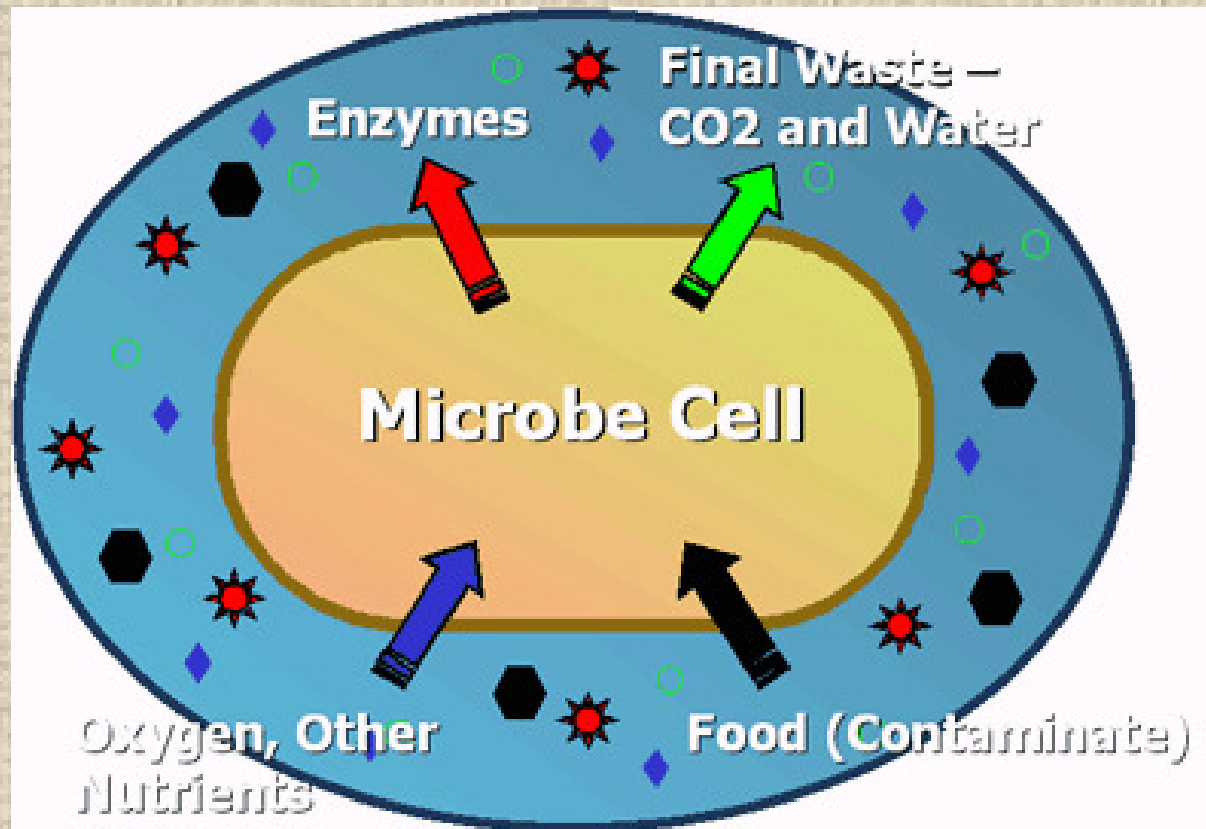


«Τρίγωνο βιοαποδόμησης»

Προϋποθέσεις για εφαρμογές βιοαποκατάστασης



Στη βιοαποκατάσταση, ο πρωταγωνιστικός ρόλος ανήκει στους μικροοργανισμούς



- Οι μικροοργανισμοί αποτελούν τους παράγοντες-κλειδιά για τη βιοαποκατάσταση
- Αποδομούν οργανικούς ρυπαντές χρησιμοποιώντας τους για την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό τους
- Οι οργανικοί ρυπαντές αποτελούν πηγές:
άνθρακα, δομικών συστατικών των κυττάρων,
ηλεκτρονίων και ενέργειας

Μικροβιακός μεταβολισμός

- Απαιτεί άζωτο, φώσφορο, θείο και ιχνοστοιχεία επιπλέον του άνθρακα
- Η συγκέντρωση άνθρακα αποτελεί συνήθως τον περιοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη μικροοργανισμών στα περισσότερα φυσικά οικοσυστήματα
- Η περίοδος εγκλιματισμού (ή στάδιο προσαρμογής ή φάση υστέρησης) είναι η περίοδος εκείνη κατά την οποία δεν παρατηρείται αποικοδόμηση της χημικής ένωσης
- Η διάρκεια της περιόδου αυτής ποικίλει από 1 ώρα έως πολλούς μήνες
- Η προσαρμογή ενός μικροβιακού πληθυσμού στην ανάπτυξη σε ένα συγκεκριμένο υπόστρωμα (δηλ. στην αποικοδόμηση μιας οργανικής ένωσης) συνήθως συνεπάγεται και τη δυνατότητα αποικοδόμησης άλλων συγγενών ενώσεων

- Αερόβιος: Οι μετατροπές λαμβάνουν χώρα παρουσία μοριακού οξυγόνου (λειτουργεί ως δέκτης ηλεκτρονίων) στα πλαίσια της αερόβιας αναπνοής
- Αναερόβιος: Οι μετατροπές λαμβάνουν χώρα απουσία οξυγόνου και διακρίνονται σε
 - Ζύμωση, όπου οι οργανικές ενώσεις λειτουργούν ως δέκτες και ως δότες ηλεκτρονίων
 - Ζύμωση μεθανίου, όπου συμβαίνουν διαδοχικές βιοχημικές μετατροπές των οργανικών ενώσεων σε CH_4 και CO_2
 - Αναερόβια αναπνοή, που πραγματοποιείται με άλλους δέκτες ηλεκτρονίων (πλην του οξυγόνου), όπως
 - νιτρικά (απονιτροποιητές και αναγωγικοί νιτρικών μικροοργανισμοί), ή
 - θειικά (αναγωγικοί θειικών μικροοργανισμοί), ή
 - CO_2 από μεθανογόνους μικροοργανισμούς, ή
 - χλωριωμένες οργανικές ενώσεις

Κύριες μεταβολικές αντιδράσεις μικροοργανισμών

Reductant electron donor	Oxidant electron acceptor	End products
Aerobic respiration		
Organic substrates (benzene, toluene, phenol)	O_2	CO_2, H_2O
NH_4	O_2	NO_2^- , NO_3^- , H_2O
Fe^{2+}	O_2	Fe^{3+}
S^{2-}	O_2	SO_4^{--}
Anaerobic respiration		
Organic substrates (benzene, toluene, phenol, trichloroethylene)	NO_3^-	N_2, CO_2, H_2O, Cl^-
Organic substrates (benzene, trichloroethylene)	SO_4^{2-}	S^{2-}, H_2O, CO_2, Cl^-
H_2	SO_4^{2-}	S_2^{--}, H_2O
H_2	CO_2	CH_4, H_2O
Fermentation		
Organic substrates	Organic compounds	Organic compounds CO_2, CH_4

Κατάλυση αντιδράσεων με συμμετοχή μικροοργανισμών

- *Dechlorination*—the chlorinated compound becomes an electron acceptor; in this process, a chlorine atom is removed and is replaced with a hydrogen atom.
- *Hydrolysis*—frequently conducted outside the microbial cell by exoenzymes. Hydrolysis is simply a cleavage of an organic molecule with the addition of water.
- *Cleavage*—cleaving of a carbon–carbon bond is another important reaction. An organic compound is split or a terminal carbon is cleaved off an organic chain.
- *Oxidation*—breakdown of organic compounds using an electrophilic form of oxygen.
- *Reduction*—breakdown of organic compounds by a nucleophilic form of hydrogen or by direct electron delivery.
- *Dehydrogenation*—an oxidation–reduction reaction that results in the loss of two electrons and two protons, resulting in the loss of two hydrogen atoms.
- *Dehydrohalogenation*—similar to dechlorination, results in the loss of a hydrogen and chlorine atom from the organic compound.
- *Substitution*—these reactions involve replacing one atom with another.

Αναγωγική αποχλωρίωση

Αφυδρογόνωση

Αφυδροαλογόνωση

Reaction	Example
• Dehalogenation	$\text{Cl}_2\text{C} = \text{CHCl} + \text{H}^+ \rightarrow \text{ClHC} = \text{CHCl} + \text{Cl}^-$
• Hydrolysis	$\text{RCO} - \text{OR}' + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{RCOOH} + \text{R}'\text{OH}$
• Cleavage	$\text{RCOOH} \rightarrow \text{RH} + \text{CO}_2$
• Oxidation	$\text{CH}_3\text{CHCl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{CCl}_2\text{OH} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
• Reduction	$\text{CCl}_4 + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CHCl}_3 + \text{Cl}^-$
• Dehydrohalogenation	$\text{CCl}_3\text{CH}_3 \rightarrow \text{CCl}_2\text{CH}_2 + \text{HCl}$
• Substitution	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Br} + \text{HS}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{SH} + \text{Br}^-$

Περιορισμοί στη βιοαποδόμηση

- Επαρκείς συγκεντρώσεις μικροβιακών πληθυσμών (μολονότι, οι μικροβιακοί πληθυσμοί γενικώς αυξάνουν όταν υπάρχουν τα κατάλληλα υποστρώματα ανάπτυξης)
- Δέκτες ηλεκτρονίων
- Θρεπτικές ουσίες (π.χ. άζωτο και φώσφορος)
- Μη τοξικές συνθήκες
- Πηγή άνθρακα

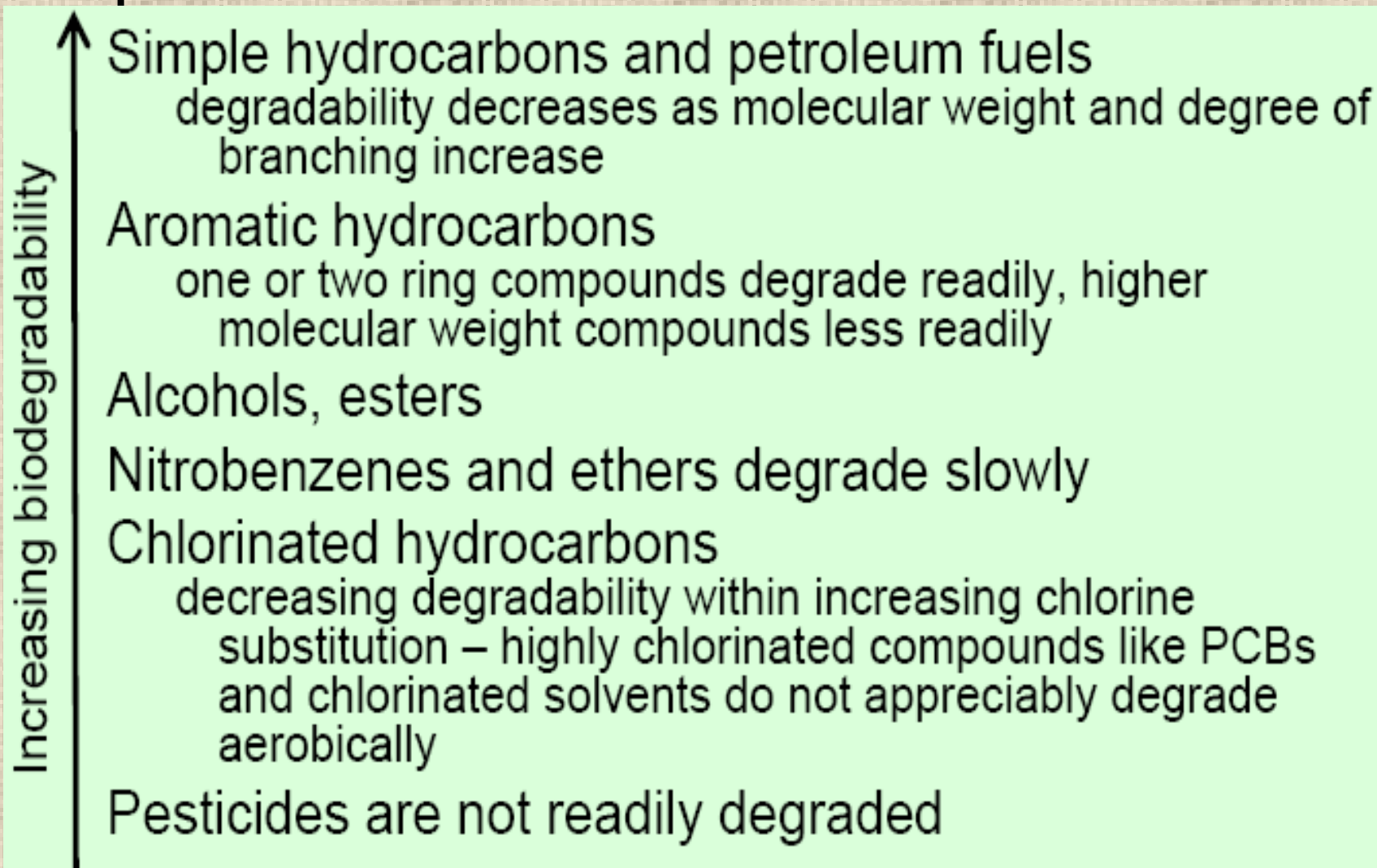
Περιβαλλοντικές συνθήκες που ευνοούν τη βιοαποκατάσταση με χρήση μικροοργανισμών

Parameters	Condition required for microbial activity	Optimum value for an oil degradation
Soil moisture	25–28% of water holding capacity	30–90%
Soil pH	5.5–8.8	6.5–8.0
Oxygen content	Aerobic, minimum air-filled pore space of 10%	10–40%
Nutrient content	N and p for microbial growth	C:N:P = 100:10:1
Temperature (°C)	15–45	20–30
Contaminants	Not too toxic	Hydrocarbon 5–10% of dry weight of soil
Heavy metals	Total content 2000 ppm	700 ppm
Type of soil	Low clay or silt content	

Ρυπαντές που μπορούν να αντιμετωπιστούν στα πλαίσια μεθοδολογιών βιοαποκατάστασης

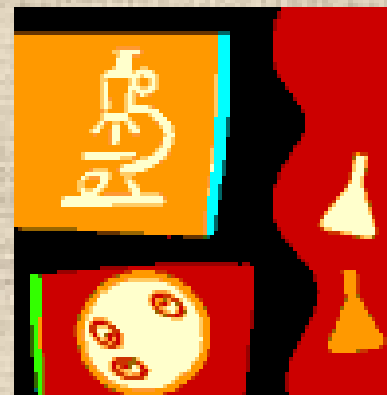
Class of contaminants	Specific examples	Aerobic	Anaerobic	More potential sources
Chlorinated solvents	Trichloroethylene Perchloroethylene		+	Drycleaners Chemical manufacture
Polychlorinated biphenyls	4-Chlorobiphenyl 4,4-Dichlorobiphenyl		+	Electrical manufacturing Power station Railway yards
Chlorinated phenol	Pentachlorophenol		+	Timber treatment Landfills
“BTEX”	Benzene Toluene Ethylbenzene Xylene	+	+	Oil production and storage Gas work sites Airports Paint manufacture Port facilities Railway yards Chemical manufacture
Polyaromatic hydrocarbons (PAHs)	Naphthalene Anthracene Fluorene Pyrene Benzo(a)pyrene	+		Oil production and storage Gas work sites Coke plants Engine works Landfills Tar production and storage Boiler ash dump sites Power stations
Pesticides	Atrazine Carbaryl Carbofuran Coumpos Diazinon Glycophosphate Parathion Propham 2,4-D	+	+	Agriculture Timber treatment plants Pesticide manufacture Recreational areas Landfills

Σχετική βιοαποικοδομησιμότητα



Τύποι βιοαποκατάστασης

- in situ
- ex situ
- φυτοαποκατάσταση



In Situ βιοαποκατάσταση

- In situ βιοαποκατάσταση ορίζεται ως ο καθαρισμός – εξυγίανση της ρύπανσης ακριβώς στη θέση/περιοχή που αυτή έγινε
- Γενικά είναι η πιο αποδοτική και φθηνή στο κόστος μορφή βιοαποκατάστασης
- Διακρίνεται σε εγγενή βιοαποκατάσταση και επιταχυνόμενη βιοαποκατάσταση

Εγγενής ('intrinsic') βιοαποκατάσταση (φυσική εξασθένιση, 'natural attenuation')

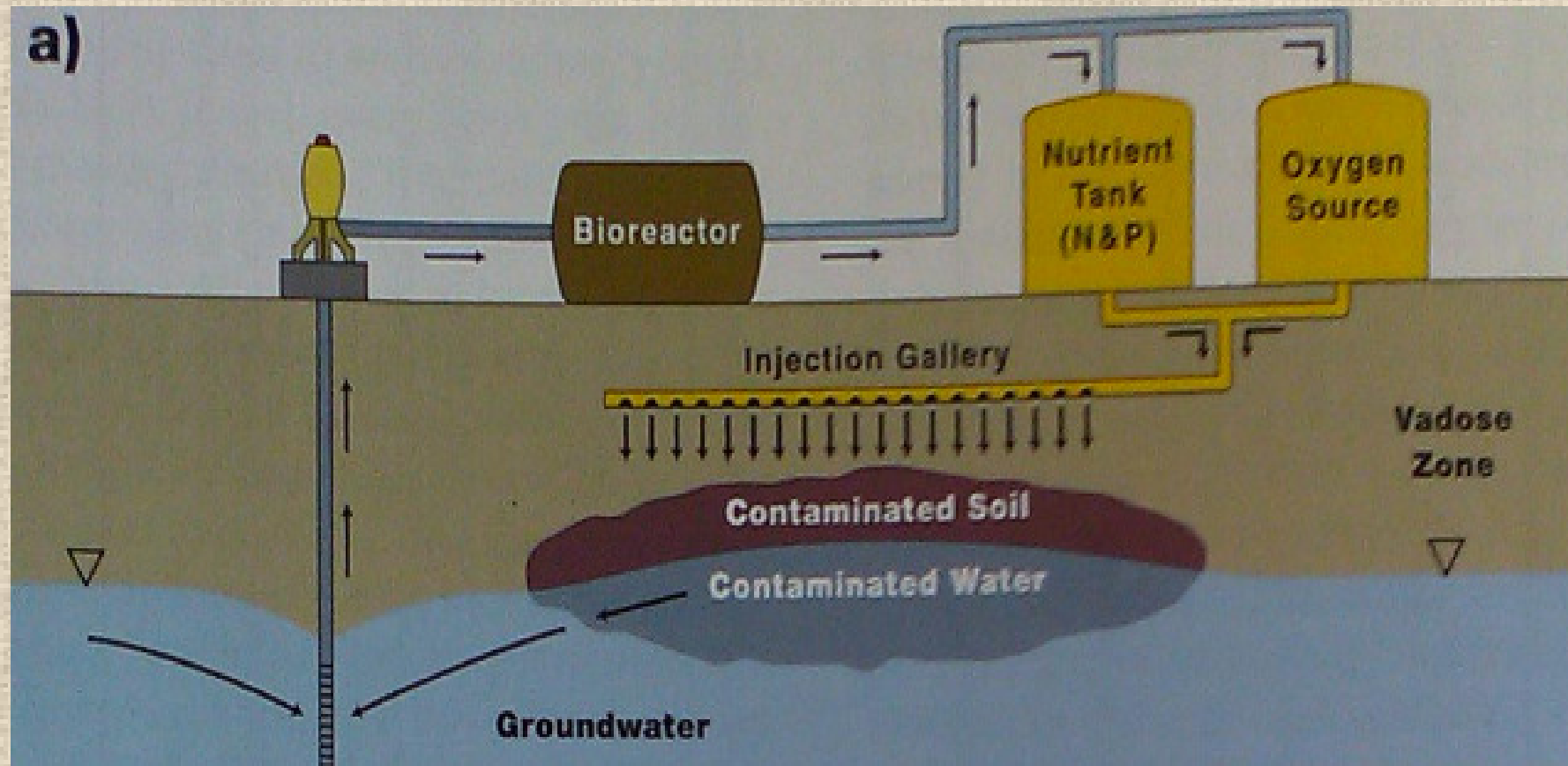
- Η ενδογενής βιοαποκατάσταση κάνει χρήση αυτόχθονων μικροοργανισμών για τη βιοαποικοδόμηση των ρυπαντών.
- Δεν υπάρχει ανθρώπινη παρέμβαση στη διαδικασία (ή είναι ήπια – συνήθως περιορίζεται στην επιτήρηση – παρακολούθηση της), το κόστος της είναι εξαιρετικά περιορισμένο και χρησιμοποιείται ευρέως
- Στηρίζεται στην παροχή οξυγόνου, θρεπτικών ουσιών και άλλων απαραίτητων παραγόντων, ώστε να διαμορφωθεί από τους μικροοργανισμούς μια βιολογικά ενεργή ζώνη, η οποία θα αποτρέψει την μετανάστευση των ρυπαντών μακριά από τη πηγή ρύπανσης

Επιταχυνόμενη ('Accelerated') βιοαποκατάσταση

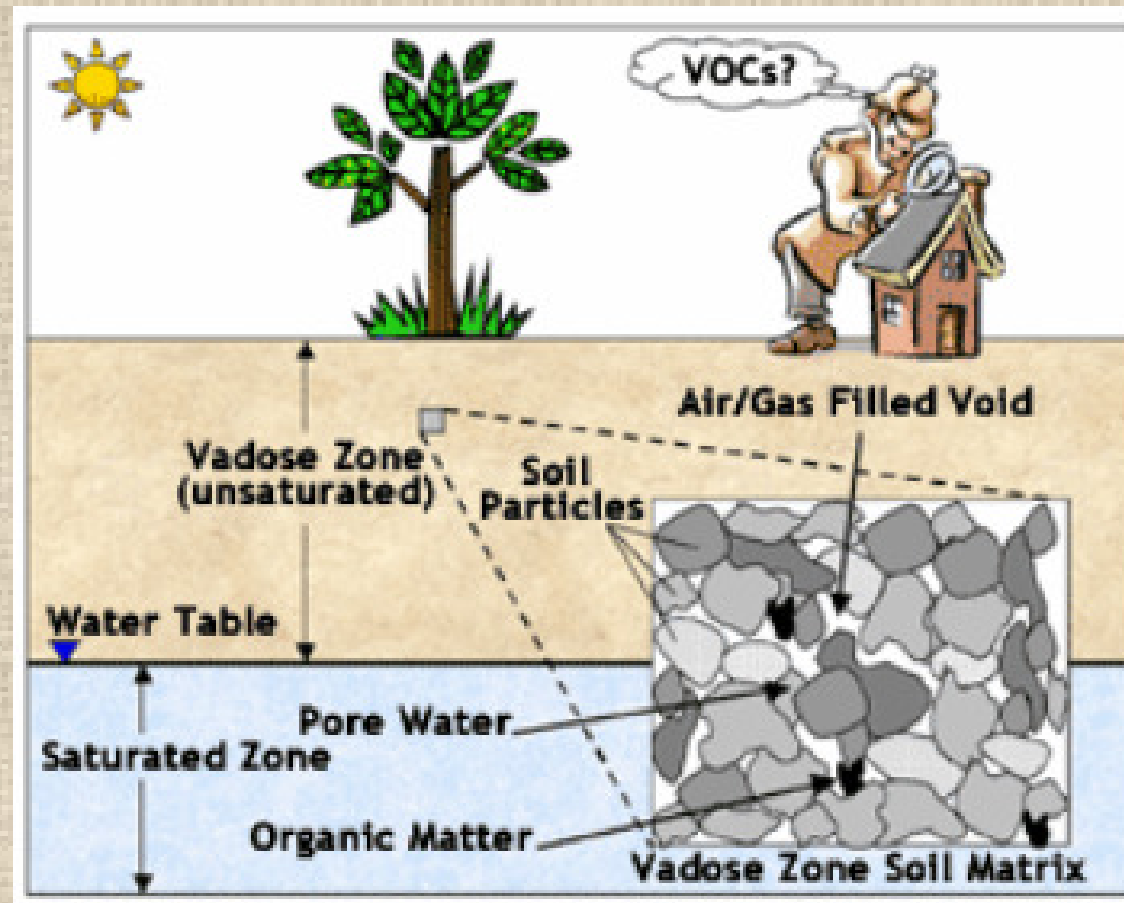
- Στην επιταχυνόμενη βιοαποκατάσταση, οξυγόνο και υποστρώματα ή θρεπτικές ουσίες παρέχονται μέσω της κυκλοφορίας υδατικών διαλυμάτων στα επιβαρυμένα με ρυπαντές εδάφη ώστε να διευκολυνθεί – επιταχυνθεί η βιοαποικοδόμηση των ρυπαντών από τους αυτόχθονες μικροοργανισμούς
- Ορισμένες φορές επιλέγεται και η πρακτική της προσθήκης αποδοτικών αλλόχθονων μικροοργανισμών για να μεγιστοποιηθούν τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα (βιοαύξηση-βιοενίσχυση, 'bioaugmentation')

- Το κύριο πλεονέκτημα της in situ βιοαποκατάστασης είναι η ελαχιστοποίηση της όχλησης στην επιβαρυμένη θέση-περιοχή, στοιχείο που είναι πολύ σημαντικό όταν η ρύπανση έχει διεισδύσει κάτω από μόνιμες κατασκευές
- Ο μεγαλύτερος περιορισμός εφαρμογής της είναι η αδυναμία αποδοτικής αντιμετώπισης επιμολύνσεων από μέταλλα που έχουν αναμιχθεί με τις οργανικές ενώσεις
- Ο βασικός στόχος της διαδικασίας είναι η επιτυχής διαχείριση του υπεδάφιου περιβάλλοντος ώστε να βελτιστοποιηθεί η μικροβιακή βιοαποικοδόμηση

In Situ επιταχυνόμενη βιοαποκατάσταση



Διευκρίνιση:



Ακόρεστη ζώνη του εδάφους (vadose zone)

In Situ βιοαποκατάσταση

- Χειρισμοί στο έδαφος:

Ο βιοαερισμός ('bioventing') αποτελεί την πιο κοινά εφαρμοζόμενη in situ διαδικασία που συνίσταται στη διοχέτευση αέρα και θρεπτικών στοιχείων διαμέσου υπεδάφινων κατακόρυφων σωληνώσεων στο επιβαρυμένο έδαφος (ακόρεστη ζώνη) ώστε να προωθηθεί-ενισχυθεί η δράση αυτόχθονων μικροοργανισμών (κυρίως βακτηρίων).

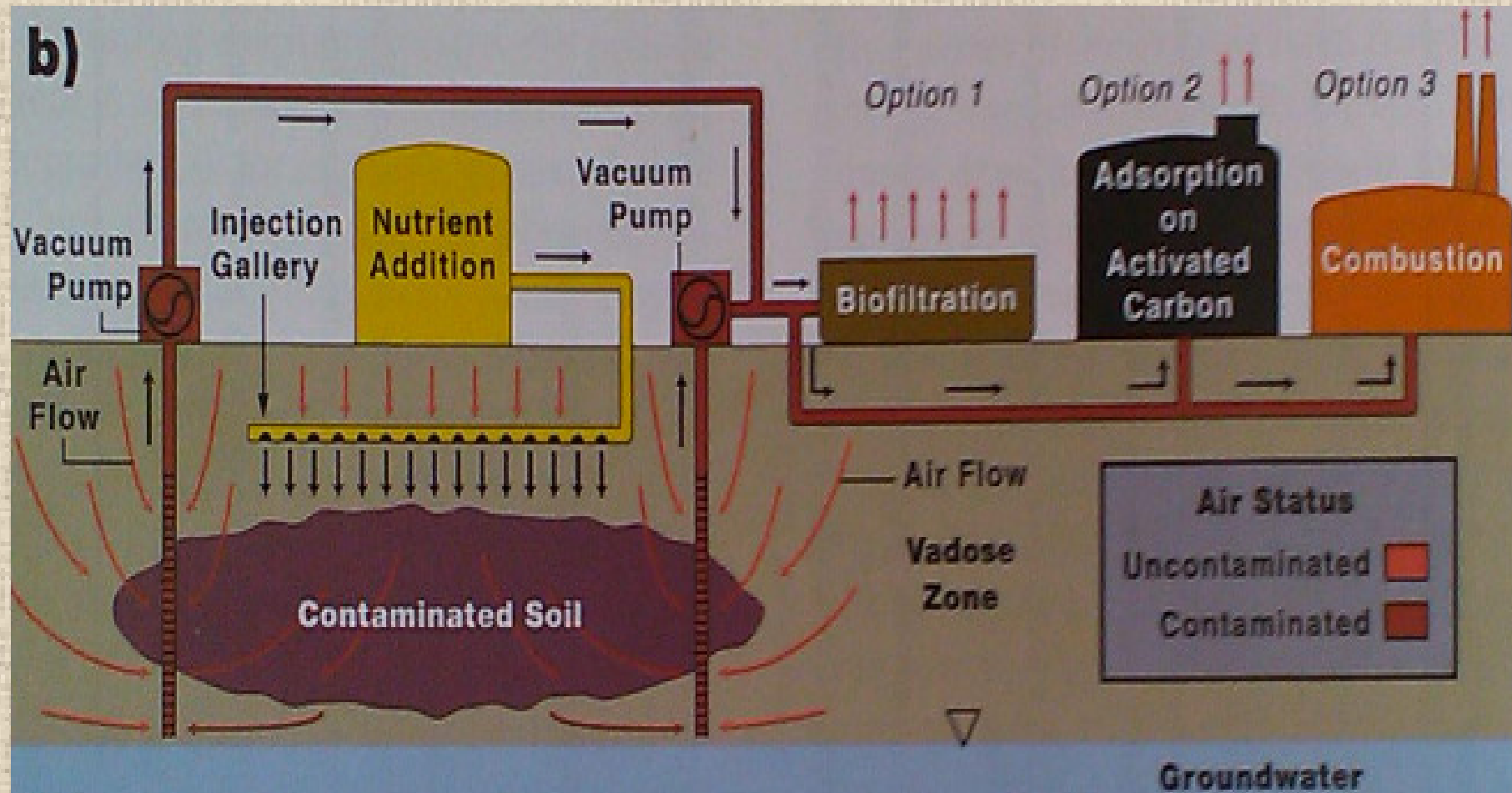
Οι ρυπαντές είναι παγιδευμένοι στην ακόρεστη ζώνη πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα και ο πιο απλός τρόπος παροχέτευση αέρα είναι με αναρρόφηση του αέρα που υπάρχει στο υπέδαφος

Για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιούνται αντλίες κενού που δημιουργούν αρνητική πίεση, η οποία τραβάει αέρα από το υπέδαφος διαμέσου του επιβαρυμένου με ρυπαντές τμήματος.

Όμως απαιτείται προσοχή ώστε αυτή η διέλευση του αέρα να μην αφαιρέσει το απαραίτητο ποσοστό υγρασίας για τη συνέχιση της μικροβιακής δραστηριότητας

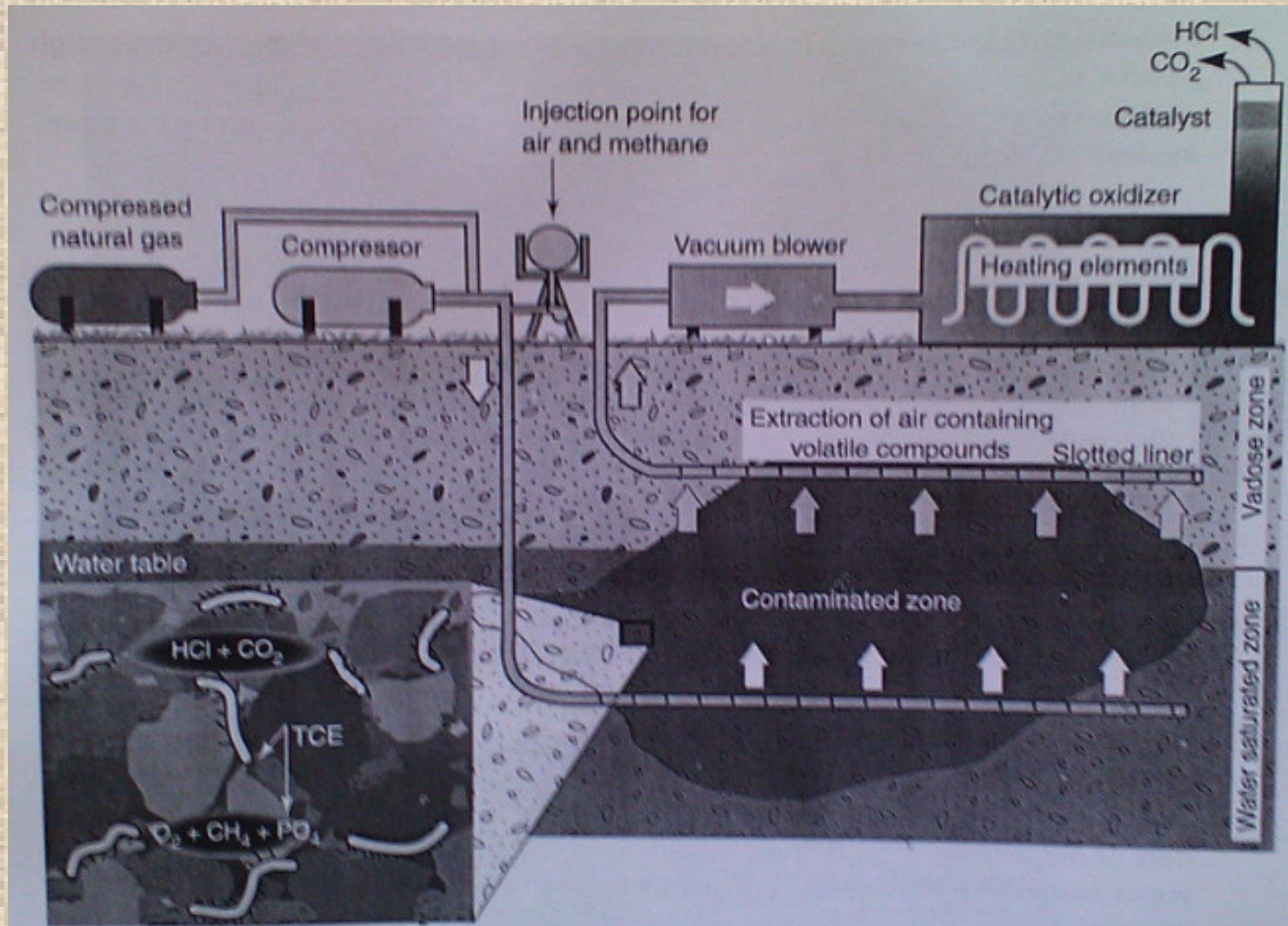
In Situ βιοαποκατάσταση

Βιοαερισμός ('Bioventing')



In Situ βιοαποκατάσταση

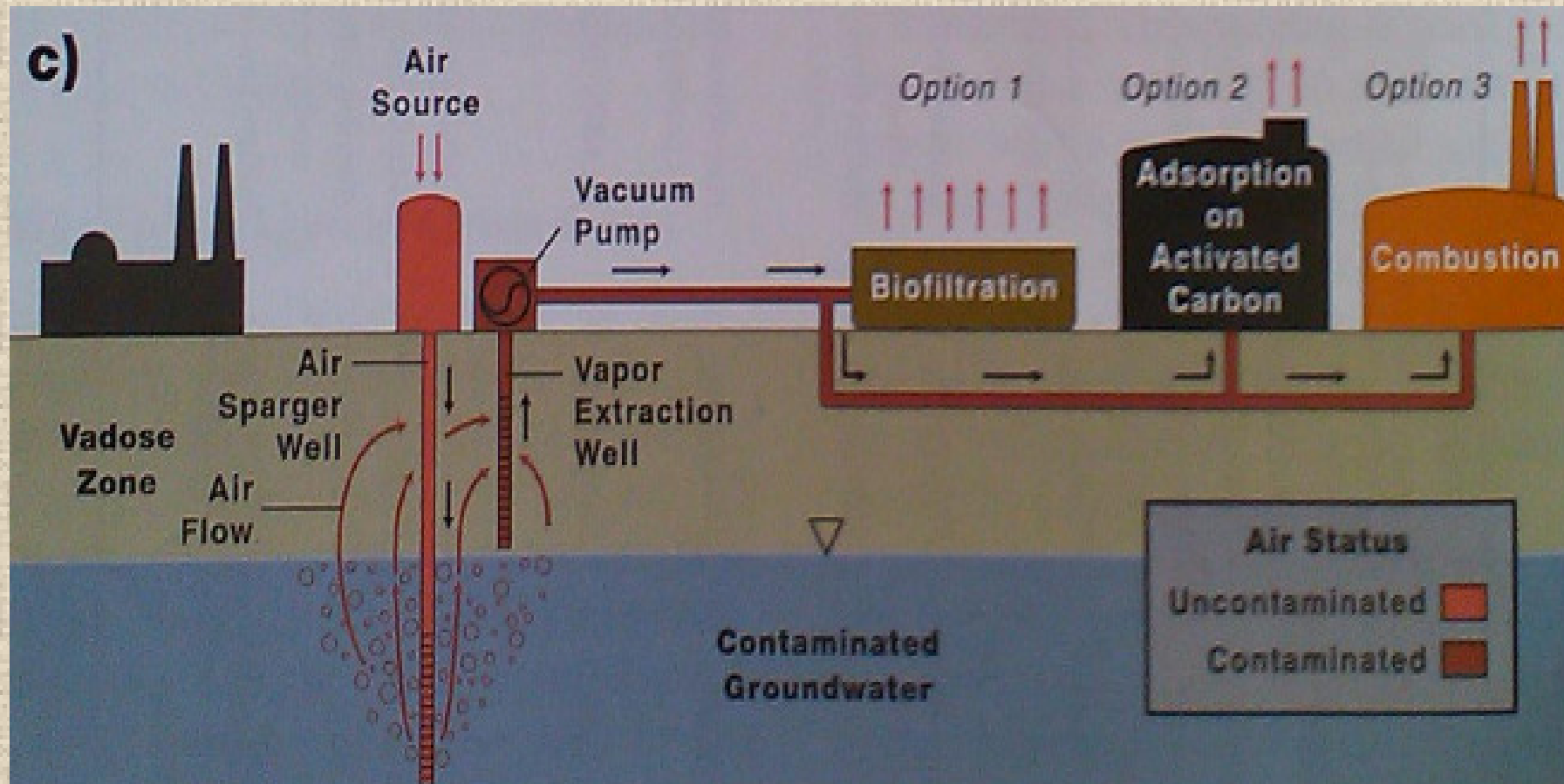
Βιοαερισμός ('Bioventing')



- Η μέθοδος της βιοεμφύσησης «biosparging» αφορά στη διοχέτευση αέρα υπό πίεση κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα ώστε να αυξηθούν οι συγκεντρώσεις οξυγόνου στο υπέδαφος με στόχο την αύξηση του ρυθμού βιολογικής αποικοδόμησης ρυπαντών από αυτόχθονες μικροοργανισμούς (κυρίως βακτήρια).
- Με τη διαδικασία αυτή αυξάνεται η επιφάνεια επαφής εδάφους και υπόγειων υδάτων και βελτιώνεται η φυσική βιοαποδόμηση.
- Αρχικά είχε αναπτυχθεί στην Ευρώπη, αλλά αργότερα εξελίχθηκε στις ΗΠΑ για εφαρμογές αυστηρά αερόβιας βιοαποδόμησης
- Με την εφαρμογή της, πτητικοί ρυπαντές απομακρύνονται από ζώνες κορεσμού του υπεδάφους και οδηγούνται σε μη κεκορεσμένες ζώνες και σε ειδικά συστήματα παγίδευσης αερίων
- Η εν λόγω μέθοδος δεν είναι αποτελεσματική όταν υπάρχουν μη περατά γεωλογικά στρώματα στο υπέδαφος τα οποία ή εγκλωβίζουν είτε εκτρέπουν τον παρεχόμενο αέρα

In Situ βιοαποκατάσταση

Διοχέτευση αέρα ('Air sparging')



Ex Situ Βιοαποκατάσταση

- Πρόκειται για μεταφορά-απομάκρυνση της επιβαρυμένης από ρυπαντές επιφάνειας (γης-εδάφους) από τη θέση ρύπανσης, για να καθαριστεί-εξυγιανθεί από μικροοργανισμούς.
- Εφαρμόζεται μόνο όταν η ευρύτερη περιοχή απειλείται από κάποια σοβαρή αιτία (π.χ. ατύχημα που έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις) και για μικρές σε έκταση θέσεις με πολύ σημαντική επιβάρυνση. Η διαδικασία κοστίζει πολύ, είναι επικίνδυνη για τους εργαζόμενους και προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στην περιοχή επειδή απομακρύνεται τμήμα του εδάφους από την επιβαρυμένη περιοχή

Ex Situ βιοαποκατάσταση

Η καλλιέργεια της γης ('Landfarming') αποτελεί μια σχετικά απλή διαδικασία κατά την οποία επιβαρυμένο με ρυπαντές έδαφος ανασκάπτεται, μεταφέρεται και απλώνεται σε μια ειδικά προετοιμασμένη κλίνη, όπου αναμιγνύεται με το επιφανειακό έδαφος, προστίθεται νερό και θρεπτικές ουσίες και περιοδικά κατεργάζεται μηχανικά (φρεζάρεται) μέχρι να αποδομηθούν οι ρυπαντές



Ex Situ βιοαποκατάσταση

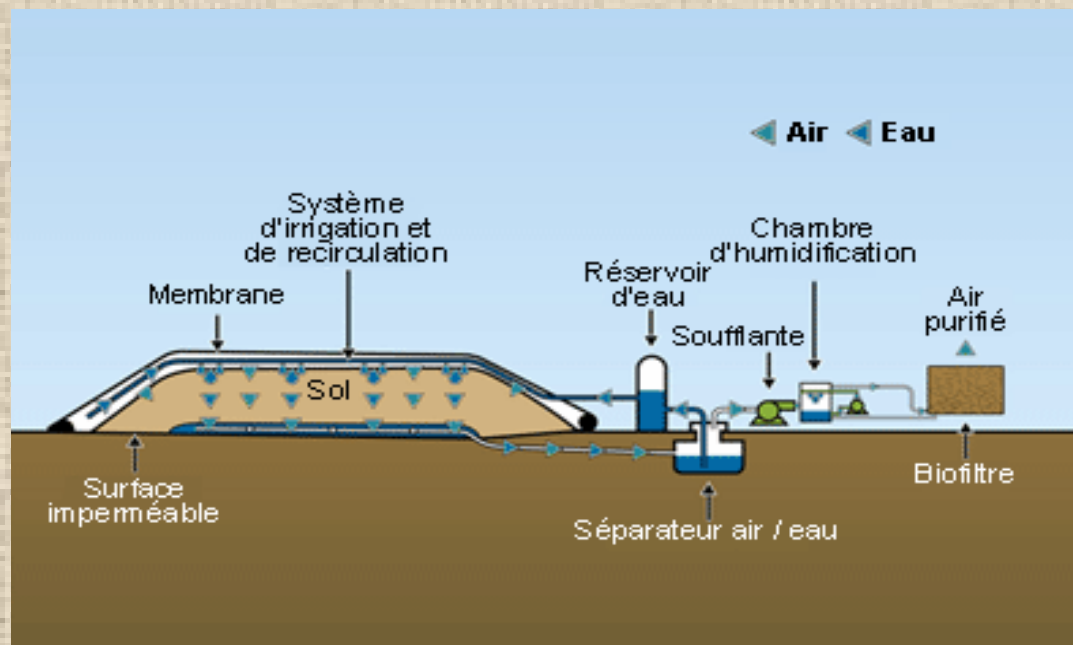
Η κομποστοποίηση ('Composting') είναι μια ελεγχόμενη αερόβια μικροβιακή διαδικασία η οποία συνίσταται στην ανάμιξη επιβαρυμένου υποστρώματος (π.χ. εδάφους) με γεωργικά υπολείμματα ή αγρο-βιομηχανικά παραπροϊόντα κλπ. Η παρουσία τέτοιων οργανικών υλικών υποστηρίζει την ανάπτυξη μικροβιακών πληθυσμών και αυξημένων θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια μιας ζύμωσης στερεάς φάσης ('solid-state fermentation') κατά τη διάρκεια της οποίας αποδομούνται οι ρυπαντές και εξυγιαίνεται το επιβαρυμένο υπόστρωμα



- ο Βιοαντιδραστήρες ('Bioreactors') είναι αντιδραστήρες-ζυμωτήρες ιλύος ή υγρών που χρησιμοποιούνται για την *ex situ* επεξεργασία επιβαρυμένου εδάφους ή υδάτων που έχουν αντληθεί από τη θέση της ρύπανσης



- ο Η βιοαποκατάσταση σε αντιδραστήρες αφορά στην επεξεργασία επιβαρυμένων με ρυπαντές στερεών (εδάφους, ιζήματος, ιλύος) ή υδάτων μέσω ενός ειδικά σχεδιασμένου συστήματος περιορισμού των αποβλήτων



Δομή συστήματος
‘ενεργών σειραδίων’
“biopiles”



Φυτοαποκατάσταση (‘Phytoremediation’)

- Αφορά στη χρήση φυτών για τον καθαρισμό – εξυγίανση θέσεων που έχουν επιβαρυνθεί με ρυπαντές
- Τα φυτά (σε συνέργεια με μικροοργανισμούς εδάφους) αποικοδομούν-διασπούν τοξικές οργανικές ενώσεις ή δεσμεύουν βαρέα μέταλλα



Σύνοψη στρατηγικών βιοαποκατάστασης

Technology	Examples	Benefits	Limitations	Factors to consider
<i>In situ</i>	<i>In situ</i> bioremediation Biosparging Bioventing Bioaugmentation	Most cost efficient Noninvasive Relatively passive Natural attenuation processes Treats soil and water	Environmental constraints Extended treatment time Monitoring difficulties	Biodegradative abilities of indigenous microorganisms Presence of metals and other inorganics Environmental parameters Biodegradability of pollutants Chemical solubility Geological factors Distribution of pollutants
<i>Ex situ</i>	Landfarming Composting Biopiles	Cost efficient Low cost Can be done on site	Space requirements Extended treatment time Need to control abiotic loss Mass transfer problem Bioavailability limitation	See above
Bioreactors	Slurry reactors Aqueous reactors	Rapid degradation kinetic Optimized environmental parameters Enhances mass transfer Effective use of inoculants and surfactants	Soil requires excavation Relatively high cost capital Relatively high operating cost	See above Bioaugmentation Toxicity of amendments Toxic concentrations of contaminants

Πλεονεκτήματα βιοαποκατάστασης

- Πρόκειται για φυσική διαδικασία, η οποία είναι αντιληπτή από το κοινό ως μια αποδεκτή μέθοδος διαχείρισης αποβλήτων ή ρύπανσης
- Πολλές ενώσεις που θεωρούνται επικίνδυνοι ρύποι μπορούν να βιομετατραπούν σε αβλαβή τελικά προϊόντα
- Αντί να μεταφέρονται ρυπαντές από ένα περιβάλλον σε άλλο, είναι δυνατή η πλήρης διάσπαση των ρυπαντών στην επιβαρυμένη θέση/περιοχή

Πλεονεκτήματα βιοαποκατάστασης

- Μπορεί να πραγματοποιηθεί in situ, χωρίς να προκαλέσει μεγάλη όχληση – παρεμπόδιση στις συνήθεις δραστηριότητες της περιοχής με το πρόβλημα ρύπανσης
- Είναι πιο οικονομική

Μειονεκτήματα βιοαποκατάστασης

- Περιορίζεται σε ενώσεις (ρύπους) που είναι βιοαποδομήσιμες
- Υπάρχουν επιφυλάξεις σχετικά με το εάν (κατά περίπτωση) τα προϊόντα της βιοαποδόμησης μπορεί να είναι πιο 'επίμονα' ή τοξικά από την αρχική ένωση
- Είναι δύσκολο να γίνει εκτίμηση των επιπτώσεων ή ζητημάτων που μπορεί να προκύψουν από την αύξηση κλίμακας της διαδικασίας από εργαστηριακό ή πιλοτικό επίπεδο σε μεγάλες εφαρμογές πεδίου

Μειονεκτήματα της βιοαποκατάστασης

- Διαρκεί χρονικά περισσότερο από άλλες διαδικασίες απορρύπανσης
- Οι βιολογικές διαδικασίες είναι συχνά αυστηρά εξειδικευμένες. Σημαντικοί παράγοντες επιτυχίας περιλαμβάνουν την παρουσία μεταβολικά ικανών μικροβιακών πληθυσμών, κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες και τα απαραίτητα επίπεδα θρεπτικών ουσιών και ρυπαντών (γενικά υποστρωμάτων)