

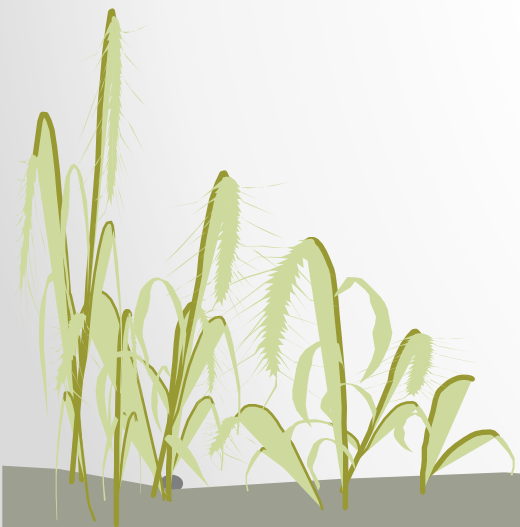


Βιοαποικοδόμηση πετρελαιοκηλίδων - πετρελαϊκών αποβλήτων: Βιολογική διαχείριση της ρύπανσης από το πετρέλαιο και τα παράγωγά του

Κωνσταντοπούλου Μάρθα

Καθηγητής: Δρ. Κατσίφας Ευστάθιος

Συντονίστρια: Δρ. Γκόνου-Ζάγκου Ζαχαρούλα



Πετρελαιοκηλίδα: Το αποτέλεσμα της απελευθέρωσης υγρού πετρελαίου στο περιβάλλον λόγω ανθρώπινης δραστηριότητας, ειδικότερα στα θαλάσσια οικοσυστήματα.



Το δεξαμενόπλοιο Exxon Valdez απελευθερώνει 37.000 τόνους αργού πετρελαίου στην Αλάσκα μετά από πρόσκρουση σε ύφαλο, 1989 (Chris Wilkins, AFP/Getty Images)

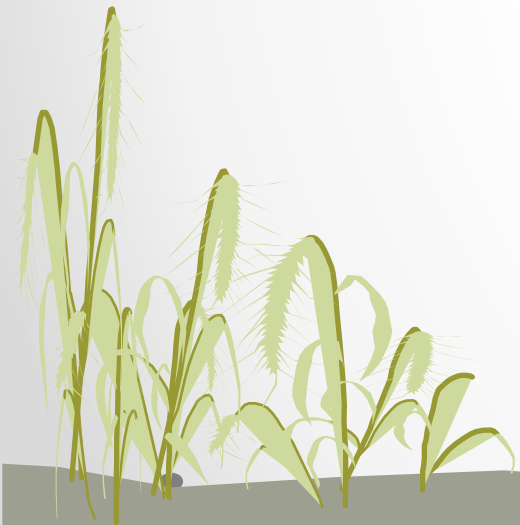
Πώς δημιουργούνται οι πετρελαιοκηλίδες;

Ατυχήματα:

- Εξόρυξη
- Άντληση
- Μεταφορά
- Διύλιση
- Αποθήκευση

ή

- Εγκαταλελειμμένα πλοία και διαρροές
- Παράνομες απορρίψεις καταλοίπων



ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ: Άμεσες ή έμμεσες

Εξαρτώνται από:

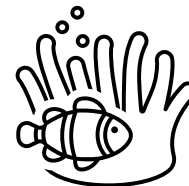
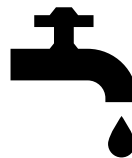
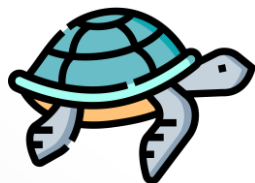
- Διάρκεια



- Συγκέντρωση



- Φύση του προσβαλλόμενου οργανισμού/οικοσυστημικής υπηρεσίας



Άνθρωπος

Ζωντανοί
οργανισμοί

Οικοσύστημα

Μελέτη Οικοσυστημικής Υποβάθμισης: Παράδειγμα Θάλασσας Μποχάι

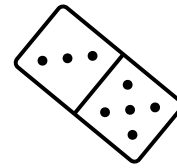
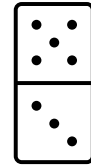


Θάλασσα Μποχάι, Κίνα 2011

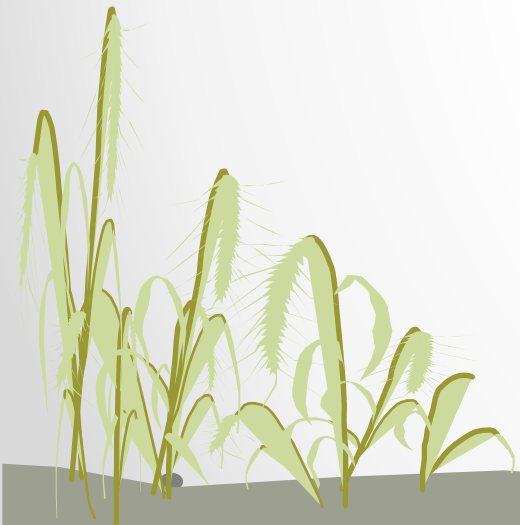
- Βόρειο τμήμα της Κίτρινης Θάλασσας της Κίνας
- Περισσότερα από 100 λιμάνια
- Συχνά ατυχήματα

Μελέτη Οικοσυστημικής Υποβάθμισης: Παράδειγμα Θάλασσας Μποχάι

- Διαταραχή στην φωτοσύνθεση φυτοπλαγκτού
- Άυξηση θερμοκρασίας
- Κόκκινη παλίρροια σε άλλα σημεία: η κηλίδα μεταφέρεται!



Ποιότητα νερού
Γονιμότητα εδάφους
Βιοποικιλότητα...

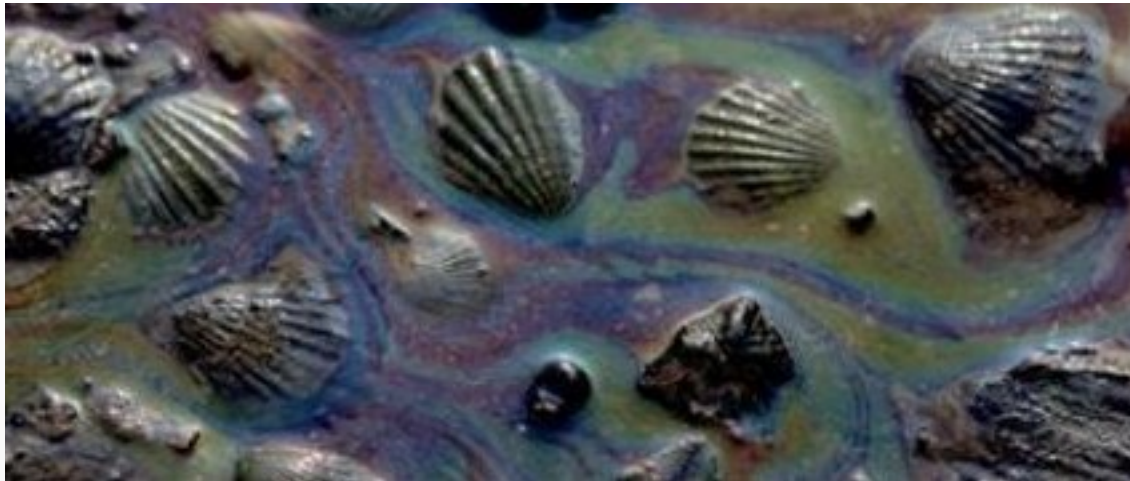


Μελέτη Οικοσυστημικής Υποβάθμισης: Παράδειγμα Θάλασσας Μποχάι

Μεγάλες πιέσεις σε νησιά με μοναδική βιοποικιλότητα



Καταφύγια πτηνών, ωτοκία φώκιας, ευαίσθητα οστρακοειδή, αυγά
ψαριών



Homepage image from Greenpeace

ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ: Ζωικοί οργανισμοί

- Βιοσυσσώρευση
- Μεταβολικά μονοπάτια
- Μεταλλάξεις
- Αναπνευστικά προβλήματα
- Ενζυμική λειτουργία στο ήπαρ



Δέλτα του Νίγηρα



Επιπτώσεις: Ζωικοί οργανισμοί



Η πτητικότητα του πετρελαίου οδηγεί σε πνιγμό, ασφυξία ή υποθερμία

ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ: Άνθρωπος



Δέλτα του Νίγηρα

6744 πετρελαιοκηλίδες μεταξύ 1976 και 2001

1,5 εκατομμύριο τόνοι πετρελαίου στο οικοσύστημα του Δέλτα του Νίγηρα τα τελευταία 50 χρόνια

Μελέτη των *Essaghah et al.* (2024) για την υγεία της κοινότητας *Ogidigben* της Νιγηρίας:

- Πονοκέφαλοι
- Ζάλη
- Δερματικοί ερεθισμοί
- Αναπνευστικά προβλήματα
- Αυξημένη νεογνική θνησιμότητα

ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ: Άνθρωπος

Ακόμη:

Μη αναστρέψιμες
βλάβες στο νευρικό
ιστό και τις μεμβράνες
των κυττάρων,
συνέπειες στο κεντρικό
νευρικό σύστημα



Και φυσικά..

φτώχεια, μετανάστευση και αποσταθεροποίηση της κοινωνίας

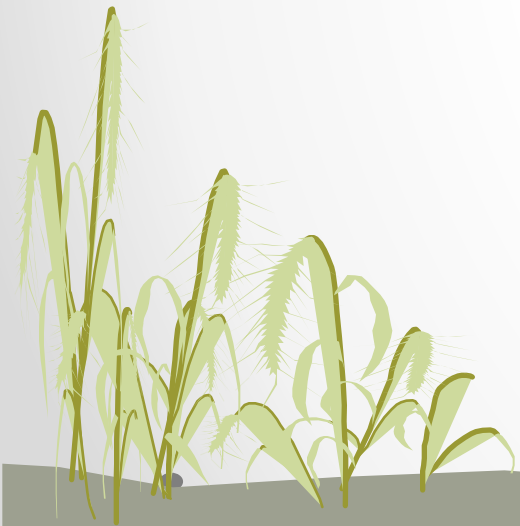
Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του πετρελαίου

- Ως πετρέλαιο ορίζεται ως ένα ετερογενές μείγμα υδρογονανθράκων φυσικού αερίου, συμπυκνώματος και αργού πετρελαίου

Στάδια:

1. Διαγένεση
2. Μια μικρής διάρκειας περίοδος βιολογικής αποικοδόμησης (μετά την εναπόθεση)
3. Καταγένεση (γεωθερμική αποικοδόμηση και πυρόλυση)
4. μεταγένεση (συνέχεια της αποσύνθεσης με αποτέλεσμα την παραγωγή μεθανίου)

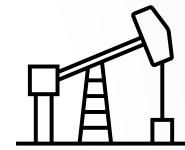
Αποτέλεσμα θερμικής ωρίμανσης οργανικού υλικού που βρίσκεται στο υπέδαφος σε διάστημα εκατομμυρίων ετών!



Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του πετρελαίου

- Τοποθεσία
- Χρόνος
- Πηγές οργανικής ύλης
- Βάθος
- Κλιματικές συνθήκες

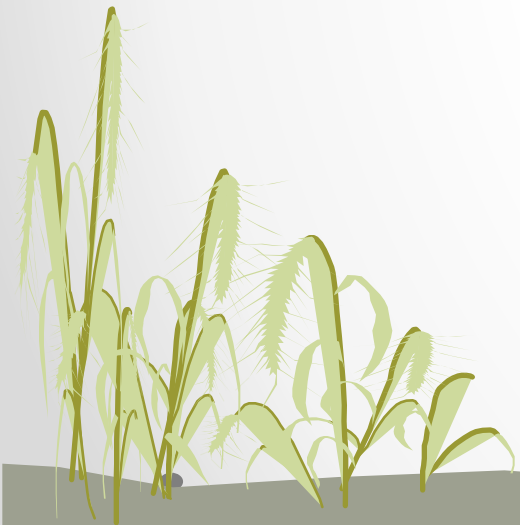
Διυλιστήρια



Απόσταξη



βενζίνη, ντίζελ, υγραέρια, κηροζίνη, καύσιμα
έλαια, λιπαντικά, ασφαλτος και άλλα.



Συστατικά Πετρελαίου

Μείγμα

Υδρογονανθράκων:

Αλειφατικών υδρογονανθράκων (κορεσμένων και ακόρεστων)

αλκάνια και παραφίνες

αλκένια, αλκίνια, αλκαδιένια

Αρωματικών υδρογονανθράκων

→ βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο και ξυλόλιο

Πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAHs)

→ ναφθαλίνιο, ανθρακένιο και φαινανθρένιο

Καρκίνος και μεταλλάξεις

+ ασφάλτοι, ρητίνες, θειούχες ενώσεις



Γιατί αποτελεί πρόβλημα;

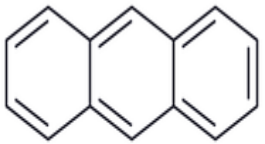
PAHs ανθεκτικοί στην αποικοδόμηση: ισχυροί υδροφοβικοί δεσμοί C–C

Μεγαλύτερο μήκος αλυσίδας C–C
ή αριθμός αρωματικών δακτυλίων

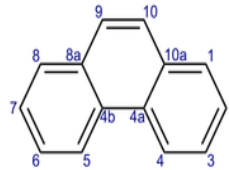


Μείωση διαλυτότητας

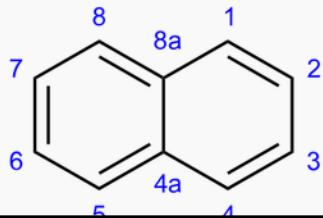
Ανθρακένιο



Φαινανθρένιο



Ναφθαλίνιο



Υδροφοβικότητα
Ιξώδες
Πτητικότητα

Επηρεάζουν τη συμπεριφορά
και αλληλεπίδραση με τους
οργανισμούς και το
περιβάλλον

Αποκατάσταση

RESPONDING TO OIL SPILLS AT SEA



DISPERSION

Chemical dispersion is achieved by applying chemicals designed to remove oil from the water surface by breaking the oil into small droplets.

BURNING

Also referred to as in situ burning, this is the method of setting fire to freshly spilled oil, usually while still floating on the water surface.

BOOMS

Booms are long, floating barriers used to contain or prevent the spread of spilled oil.

SKIMMING

Skimming is achieved with boats equipped with a floating skimmer designed to remove thin layers of oil from the surface, often with the help of booms.



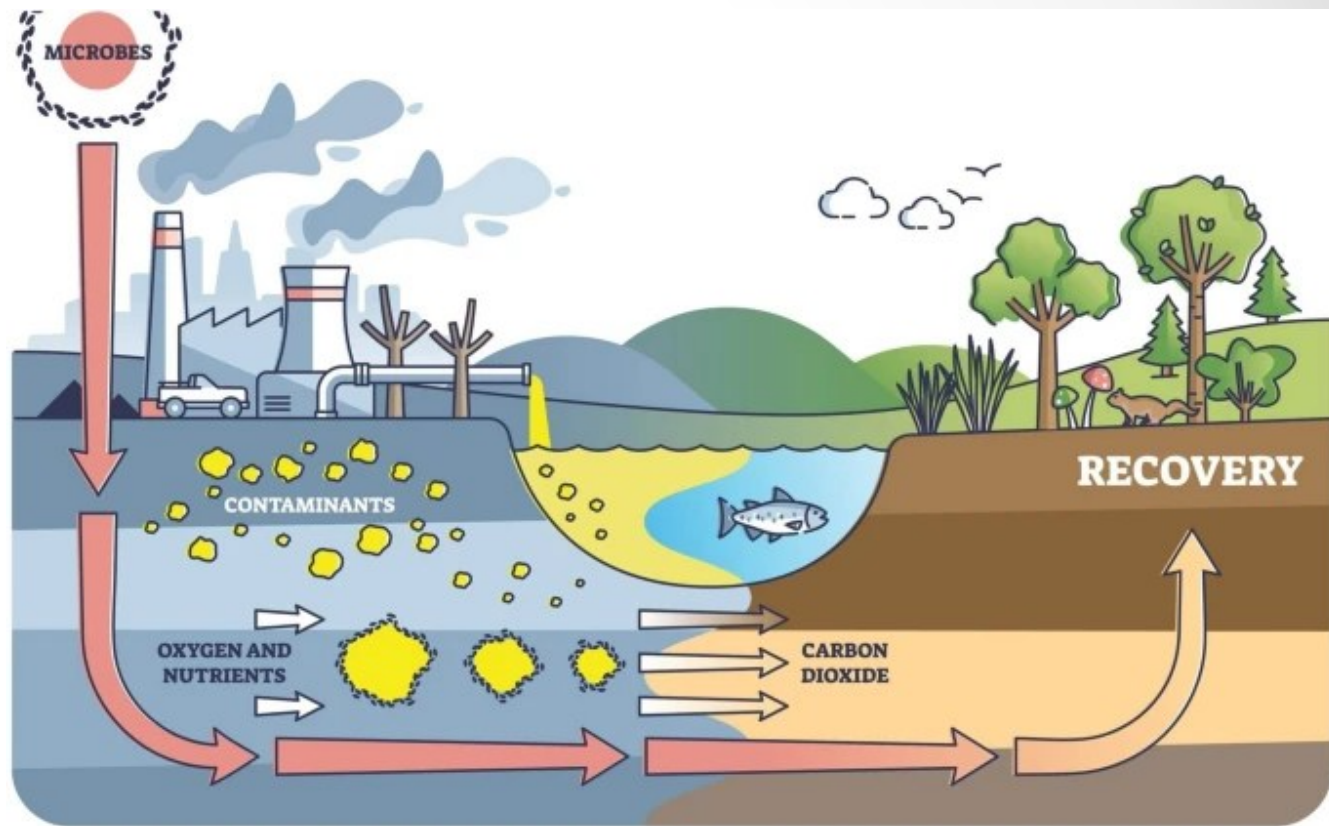
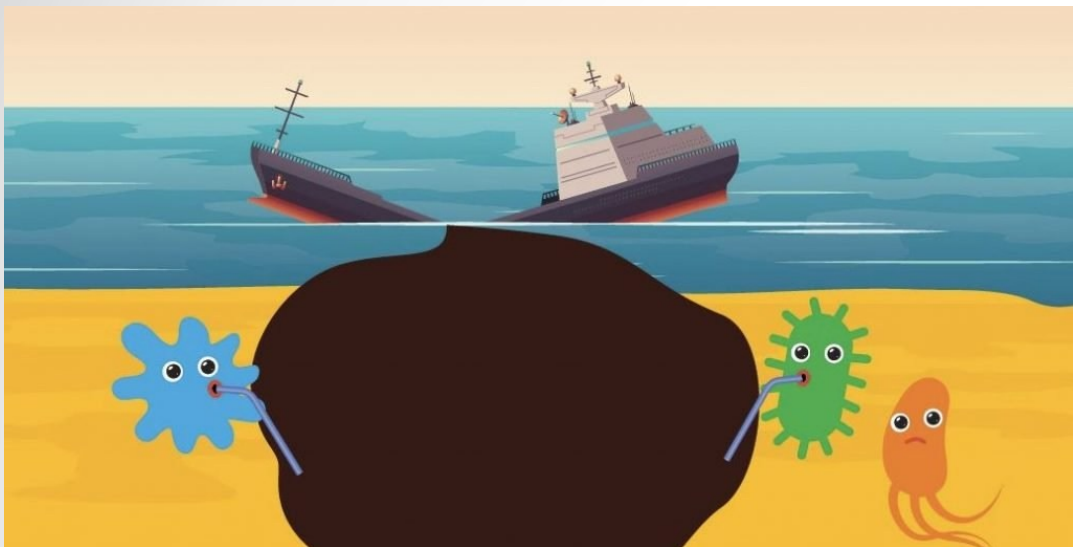
Οι κλασικές χημικές-θερμικές μέθοδοι:

- Επιβάρυνση περιβάλλοντος
- Μέτριο αποτέλεσμα
- Υψηλό κόστος

Ανάγκη για εναλλακτικές λύσεις..



Βιοαποκατάσταση



Χρήση βιολογικών μέσων

Τουλάχιστον το 25% των συνολικών επιχειρήσεων αποκατάστασης

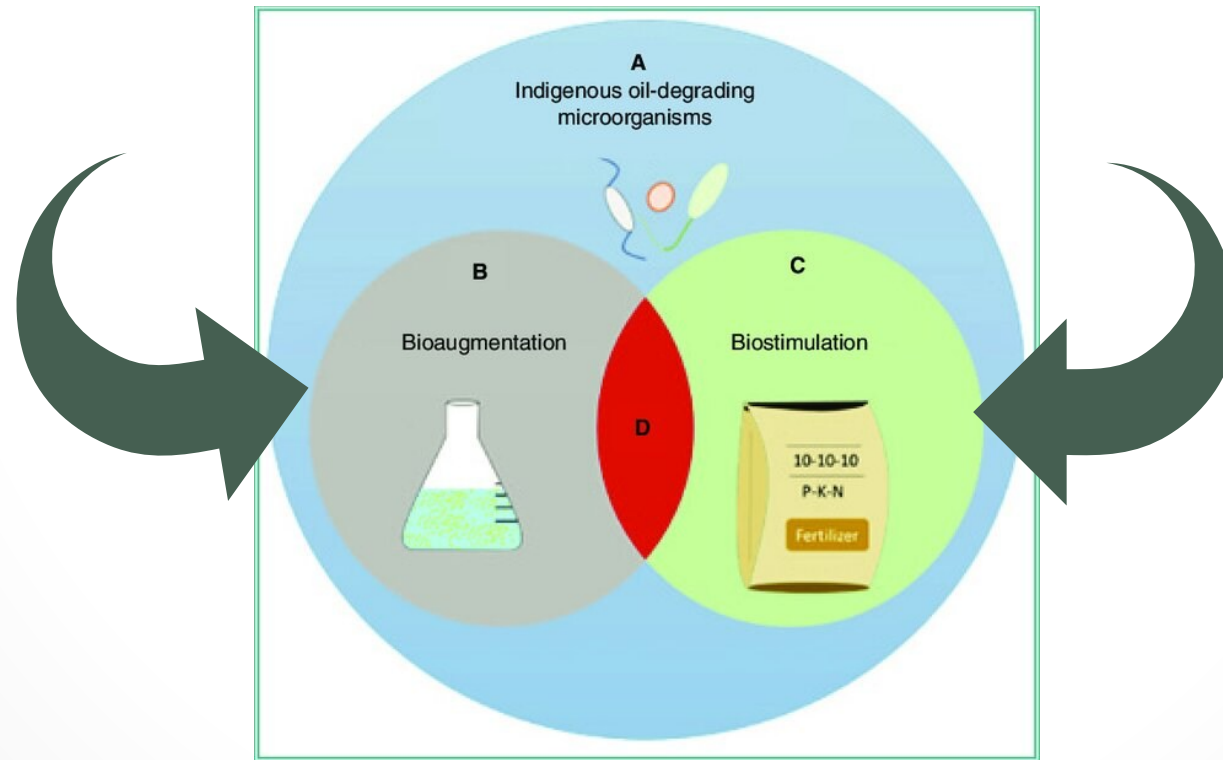
Βιοαποκατάσταση

Βιοενίσχυση

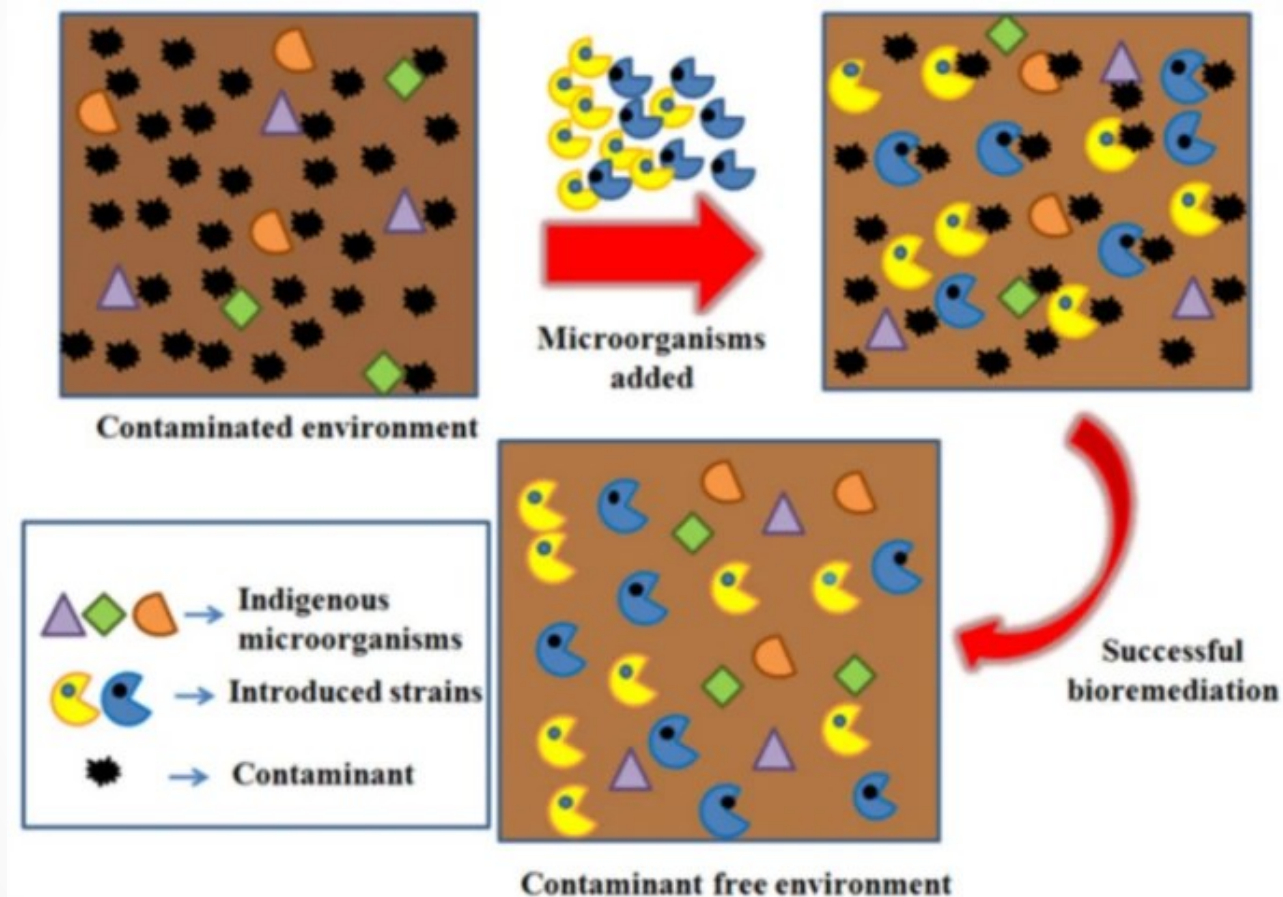
- Προσθήκη μικροοργανισμών
- **Συνεισφορά** στα αυτόχθονα
- Βιοτεχνολογική προσπάθεια

Βιοδιέγερση

- Προσθήκη θρεπτικών/υποστρωμάτων
- Ήδη υπάρχοντες μικροοργανισμοί
- **Υποστήριξη** φυσικής διαδικασίας



Βιοαποκατάσταση

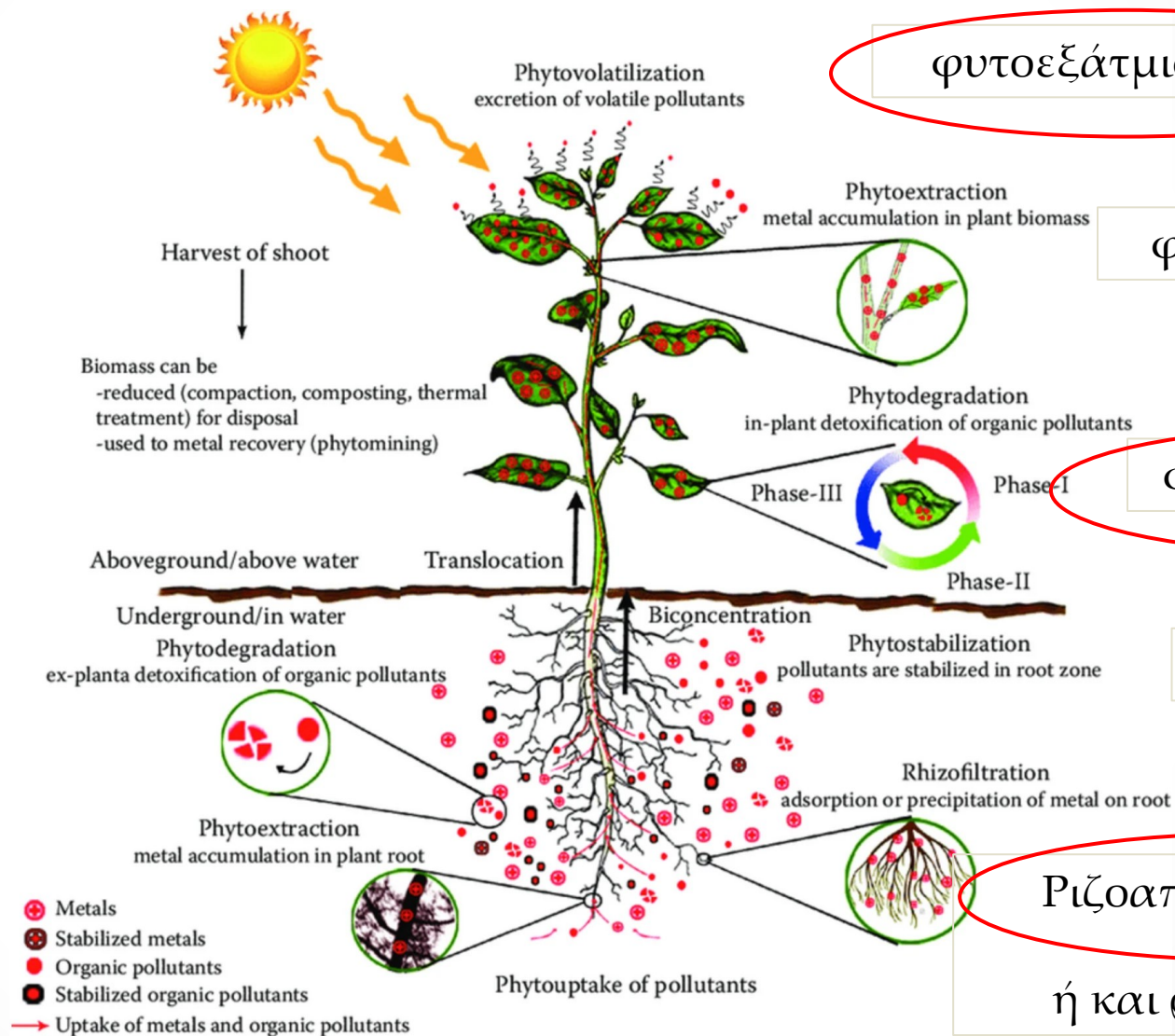


Η συνεργασία
οδηγεί στα
καλύτερα
αποτελέσματα!

Φυτοαποκατάσταση

1990 :

Αρχίζει η μελετάται η
χρήση φυτών για
αποικοδόμηση
οργανικών και
ανόργανων ρύπων στο
νερό και το έδαφος



φυτοεξάτμιση

φυτοεκχύλιση

φυτοαποικοδόμηση

φυτοσταθεροποίηση

Ριζοαποικοδόμηση

ή και ριζοδιήθηση

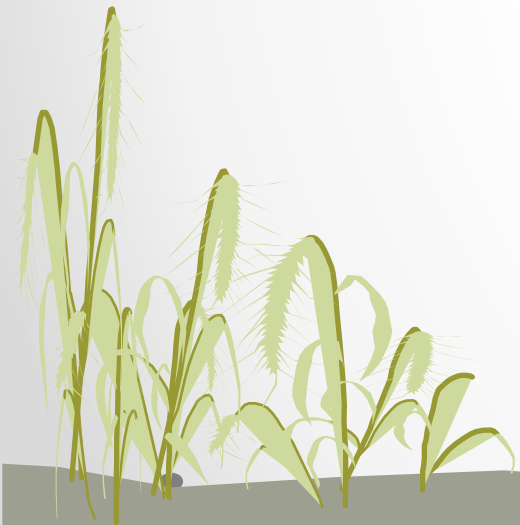
Φυτοαποκατάσταση

Δουλειά των Μικροοργανισμών ή των Φυτών;

Αποικοδόμηση

Βελτίωση εδάφους και
συνθηκών (πχ οξυγόνο)
Διεγείρουν την ανάπτυξη
των μ/ο

Συνεργατική δράση!



Φυτοαποκατάσταση

Πολλά ψυχανθή:

- η κουκιά (*Vicia faba*) και το λευκό λούπινο (*Lupinus albus*), η μηδική (*Medicago sativa*)

Αποικοδόμηση πολυκυκλικών αρωματικών δακτυλίων

- Λεύκα (γένος *Populus*)

- το *Lolium Perenne*

Αποικοδόμηση του καυσίμου ντίζελ

Λευκό σινάπι (*Sinapis alba* L.)
κάροδαμο (*Lepidium sativum* L.)



20 οξειδοαναγωγάσες, ένζυμα που καταλύουν αντιδράσεις οξειδοαναγωγής! (αποικοδόμηση)



Φυτοαποκατάσταση

- Η πιο οικολογική μέθοδος
- Εφαρμόσιμη
- Σταθερά αποτελέσματα
- Οικονομικότερη άλλων
- Θετική στάση πολιτών



- Όχι σε εδάφη με μεγάλο βαθμό ρύπανσης
- Απαιτείται χρόνος
- Επιρροή από τις εποχές του έτους
- Δε διασπώνται τα PCBs (χλωριωμένοι αρωματικοί υδρογονάνθρακες)



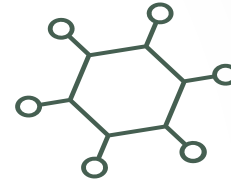
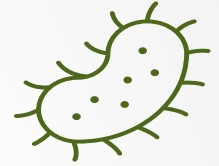
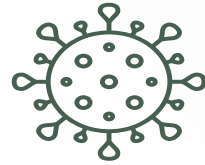
Μικροβιακή Βιοαποκατάσταση: Βακτήρια

- Το πετρέλαιο: ΦΥΣΙΚΟ προϊόν... Εξελίχθηκαν βακτήρια ικανά να το διασπούν!
- Οξειδωτικά ένζυμα για PAHs
- Εξειδίκευση στην οργανική ένωση  αναγκαία η συνεργασία!

Burkholderia, Acinetobacter, Marinobacter, Alteromonas,
Achromobacter, Alkanindiges, Streptobacillus,
Enterobacter, Dietzia, Streptococcus, Mycobacterium,
Rhodococcus τα πιο γνωστά



Μικροβιακή Βιοαποκατάσταση: Βακτήρια

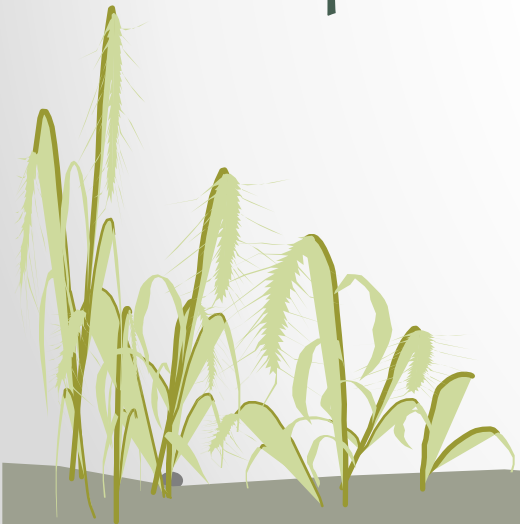


Πλεονέκτημα των βακτηρίων;

- γρήγορος ρυθμός ανάπτυξης
- Ποικιλία υποστρωμάτων
- Αποδοτικότερα από μύκητες
- **Βιοεπιφανειοδραστικά**

Διαλυτοποιούν οργανικούς ρύπους και ενισχύουν την πρόσληψη

Γνωστά γένη που παράγουν :Bacillus, Acinetobacter, Alcaligenes, Rhodococcus, Pseudomonas, Corynebacterium sp., και Alkali-genes



Μικροβιακή Βιοαποκατάσταση: Μύκητες

- διασπούν PAHs και πολύπλοκες αρωματικές ενώσεις
- υπεροξειδάσες

Σύμφωνα με τους Bala et al., (2025):

- μεταλλαξογένεση με ακτινοβολία UV στελεχών μυκήτων: ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην ταχύτατη διάσπαση υδρογονανθράκων και άλλων οργανικών ενώσεων
- 4 είδη *Aspergillus* (βαρέα μέταλλα, αλκάνια, φαινόλες)
- διαφορές αλλά σημαντική η κοινοπραξία!



Μικροβιακή Βιοαποκατάσταση:

Μύκητες



Ξέρουμε ότι είναι αποτελεσματικά για PAHs, τοξικά
ενδιάμεσα, αλκάνια :

Γένη Penicillium, Fusarium, Pleurotus και Trichoderma

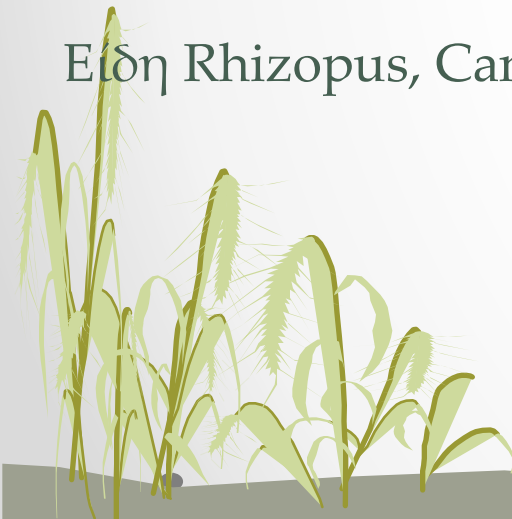
Γένη Gliocladium, Alternaria, Paecilomyces, Rhodotorula,
Clado-sporium, Cephalosporium, Torulopsis, Talar-omyces,
και Geotrichum χρησιμοποιούν τα PAHs ως βασική πηγή
άνθρακα και ενέργειας

Είδη Rhizopus, Candida και Mucor



Πλεονεκτήματα :

- Εξάπλωση μέσω μυκηλίων
(κίνηση!)
- Αντίξοα περιβάλλοντα
- Γρήγορη απορρόφηση ρύπων
- Αερόβιες + αναερόβιες συνθήκες
- Λιγνινολυτικοί μύκητες για
διάσπαση λιγνίνης!
- Αποτελεσματικά και σε στερεά
υποστρώματα



Παράγοντες που επηρεάζουν την βιοαποικοδόμηση

Παράγοντες	Περιγραφή - Αποτέλεσμα
Σύσταση ρύπων (αλκυλικοί, αρωματικοί, πολυαρωματικοί κ.ά.)	Υδροφοβικότητα, είδη δεσμών C-C, μοριακό βάρος επηρεάζουν τη δυνατότητα διάσπασης (επιδεκτικότητα διάσπασης)
Βιοδιαθεσιμότητα των ρύπων	Η αποτελεσματική πρόσβαση των μ/ο στο ρύπο (ρυθμός αποδόμησης)
Σύνθεση μικροβιακής κοινότητας	Κοινοπραξίες, GMOs, εξειδίκευση
Βιολογικές αλληλεπιδράσεις	Ανταγωνισμός, συμβιωτικές σχέσεις
Τοξικότητα	Παραγωγή ενδιάμεσων τοξικών προϊόντων, ρύποι ή μεταβολίτες μπορεί να αναστείλουν τη μικροβιακή ανάπτυξη
Βιοεπιφανειοδραστικές ουσίες	Παράγονται από μ/ο και αυξάνουν τη διαλυτότητα, τη διασπορά και τη διαθεσιμότητα υδρογονανθράκων
Σύσταση του εδάφους	Τύπος εδάφους- επιρρόή βιοδιαθεσιμότητας, συσσωμάτωση
pH	Το ουδέτερο ενισχύει μικροβιακή δραστηριότητα και διαθεσιμότητα θρεπτικών
υγρασία	Ισορροπημένη (45–85 %) για αποφυγή αναερόβιων συνθηκών/μείωση δραστηριότητας μ/ο
Θερμοκρασία	Καθορίζει ταχύτητα ενζυμικών αντιδράσεων και διάσπασης , ρυθμό ανάπτυξης μ/ο
Οξυγόνο	Αερόβια (ταχύτερη) ή αναερόβια αποικοδόμηση
αλατότητα	Αναγκαία η μέση συγκέντρωση αλάτων
Θρεπτικά στοιχεία	Ισορροπία άνθρακα-αζώτου-φωσφόρου απαραίτητη για βελτίωση ανάπτυξη μ/ο
Στρατηγικές	In situ/ ex situ, επιλογή μεθόδου βιοαποκατάστασης

Συμπεράσματα

Αναγκαία η
βιοαποκατάσταση-
πλεονεκτήματα!

Περιβάλλον

Υγεία

Κόστος

Πρακτικές δυσκολίες

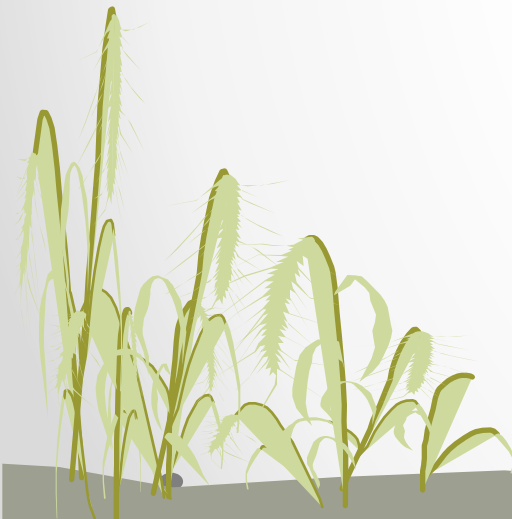
Αποδοτικότητα



Κατάλληλη επιλογή σχεδίου



Συνεργασία φορέων-επιστημόνων





Μέλλον και Προκλήσεις



Βιολογία μικροοργανισμών
+ Δυναμική πολύπλοκων μικροβιακών κοινοπραξιών
(Μοριακές τεχνικές)

Ανθεκτικοί συνδυασμοί υδρογονανθράκων
(Αναλυτικές μέθοδοι)

Λειτουργικοί και δομικοί ρόλοι
μικροβιακών κοινοτήτων
+Περίπλοκα περιβαλλοντικά
συστήματα
(Οικολογία)



Βελτιστοποίηση των αργών, επιλεκτικών ρυθμών
βιοαποκατάστασης των πετρελαϊκών ρύπων.

Πηγές Εικόνων

1. https://www.flaticon.com/free-icon/sea-turtle_4545220
2. http://www.china.org.cn/environment/2011-10/25/content_23715960.htm
3. <https://punchng.com/end-pollution-now-ndelta-communities-tell-oil-firms/>
4. <https://edition.cnn.com/2013/11/06/world/africa/nigeria-shell/index.html>
5. <https://www.dw.com/en/shell-to-pay-111-million-for-1970-niger-delta-oil-spills/a-58697881>
6. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%B8%CF%81%CE%B1%CE%BA%CE%AD%CE%BD%CE%B9%CE%BF>
7. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CE%B1%CE%B9%CE%BD%CE%B1%CE%BD%CE%B8%CF%81%CE%AD%CE%BD%CE%B9%CE%BF>
8. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9D%CE%B1%CF%86%CE%B8%CE%B1%CE%BB%CE%AF%CE%BD%CE%B9%CE%BF>
9. <https://response.restoration.noaa.gov/about/media/how-do-oil-spills-out-sea-typically-get-cleaned.html>
10. <https://www.sciencejournalforkids.org/articles/how-can-we-find-oil-eating-bacteria-to-clean-up-the-sea/>
11. https://www.researchgate.net/publication/371831071_Microbial_marvels_could_microbes_resolve_climate_change/figures

