

# Μέθοδοι Αποκατάστασης Ρυπασμένων Χώρων

Βασικό ερώτημα: Τι μπορούμε να κάνουμε για να  
μειώσουμε τον κίνδυνο;  
(ή μήπως τη διακινδύνευση;) )

# Κατηγοριοποίηση μεθόδων εξυγίανσης ρυπασμένων χώρων

- Με βάση:
  - το ρυπασμένο μέσο (ακόρεστη ζώνη: έδαφος, κορεσμένη ζώνη: έδαφος + υπόγειο νερό)
    - τη φάση του (οργανικού) ρύπου (υδατική φάση: διαλυμένος ρύπος, μη υδατική φάση: nonaqueous phase liquid - NAPL)
  - τον μηχανισμό αποκατάστασης (μεταφορά μάζας ρύπου σε άλλο μέσο, διάσπαση ρύπου)
  - τον στόχο της εξυγίανσης (προφύλαξη πληθυσμού δηλ. προστασία από έκθεση, περιορισμός εξάπλωσης ρύπου, αποκατάσταση χώρου)

# Μέθοδοι απορρύπανσης υπογείων υδάτων και εδάφους

- Κατηγοριοποίηση με βάση τον βαθμό επέμβασης:
  - (1) Φυσική εξασθένηση ρύπων (συνοδεύεται από παρακολούθηση!)
  - (2) Εγκιβωτισμός/αδρανοποίηση ρύπων (περιορισμός εξάπλωσης ρύπων)
  - (3) Επεξεργασία ρυπασμένου μέσου
    - επί τόπου επεξεργασία (in situ) ← ΠΡΟΤΙΜΗΤΕΑ
    - απομάκρυνση ρύπου – επεξεργασία στην επιφάνεια του εδάφους (ex situ)

# Δύο οι κύριες συνιστώσες **SOS!** των τεχνολογιών αποκατάστασης

- Επίδοση μηχανισμού αποκατάστασης
  - διαφορετικά προβλήματα ανά κατηγορία ρύπων
  - πιο εύκολα ελεγχόμενη για επεξεργασία στην επιφάνεια του εδάφους
- Πρόσβαση στον ρύπο
  - χρειάζεται να ελέγξω την κίνηση κάποιας φάσης; (νερού, αέρα)
  - πόσο ενεργά πρέπει να επέμβω;

# Το προφίλ μιας τεχνολογίας αποκατάστασης

SOS!

- Περιγραφή (για τον μη ειδικό)
- Τεχνικά χαρακτηριστικά
  - ρυθασμένο μέσο
  - φάση οργανικού ρύπου (δηλ. εφαρμόζεται για NAPL;)
  - μηχανισμός αποκατάστασης
  - στόχος αποκατάστασης
  - επί τόπου ή όχι
- Επίπεδο ανάπτυξης (ερευνητικό – πιλοτικό – κλίμακα πεδίου ή εφαρμογή στο πεδίο – κάποια θέματα υπό έρευνα)
- Χρονικός ορίζοντας (μήνες – χρόνια – δεκαετίες)
- Κόστος (χαμηλό – μέτριο – υψηλό)

# Φυσική εξασθένιση: Μηχανισμοί

- Αραίωση (μεταγωγή, διασπορά, διάχυση)
- Προσρόφηση/απορρόφηση στη στερεά φάση
- Εξάτμιση στην αέρια φάση
- Αποδόμηση ← ενδιαφέρει να είναι σημαντική
  - οργανικοί ρύποι: διάσπαση
  - ανόργανοι ρύποι: αλλαγή σθένους

# Φυσική εξασθένηση με παρακολούθηση

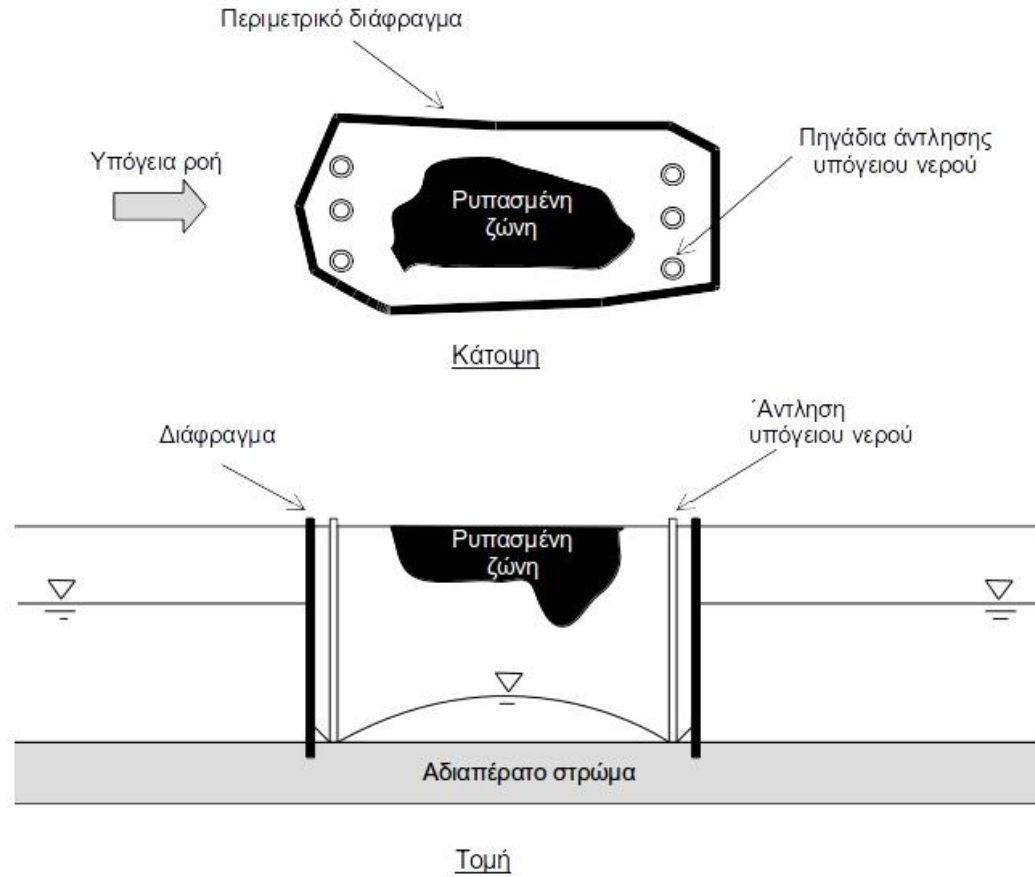
- Επιλέγεται εάν υπάρχουν ενδείξεις αποδόμησης
  - π.χ. ανίχνευση προϊόντων διάσπασης
- Στηρίζεται στην πρόβλεψη του ρυθμού εξασθένησης με βάση μετρήσεις πεδίου
- Απαραίτητη η παρακολούθηση με μετρήσεις συγκεντρώσεων σε επιλεγμένα σημεία-μάρτυρες για σύγκριση προβλεπόμενου-μετρούμενου ρυθμού
- Συχνά εφαρμόζεται σε περιοχές χαμηλών συγκεντρώσεων, σε συνδυασμό με πιο επεμβατικές τεχνολογίες στην περιοχή υψηλών συγκεντρώσεων κοντά στην πηγή

# Περιορισμός εξάπλωσης ρύπων (1)

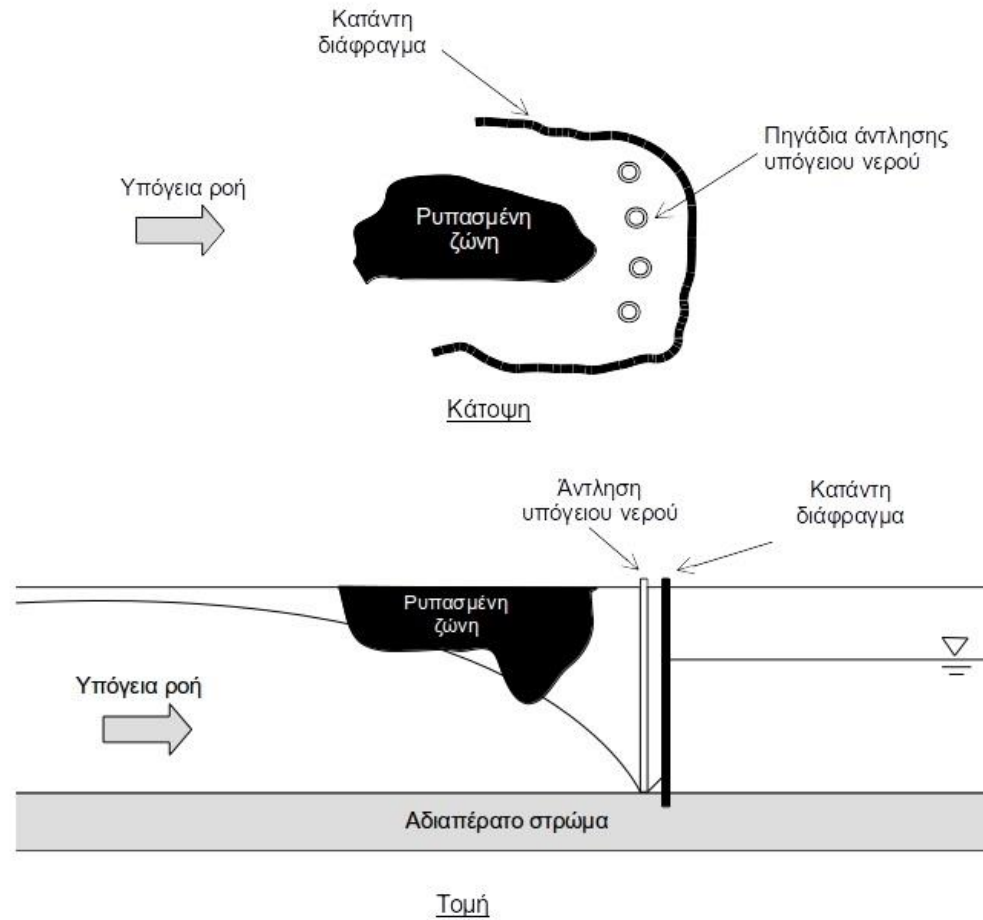
- Εγκιβωτισμός ρύπου (containment)
  - Καλύμματα (=μονωτική στρώση) με ή χωρίς άντληση νερού, φυτοκάλυψη
  - Περιμετρικά διαφράγματα (αιώρημα μπεντονίτη ή τσιμέντου + μπεντονίτη) και άντληση νερού



# Πλήρης εγκιβωτισμός



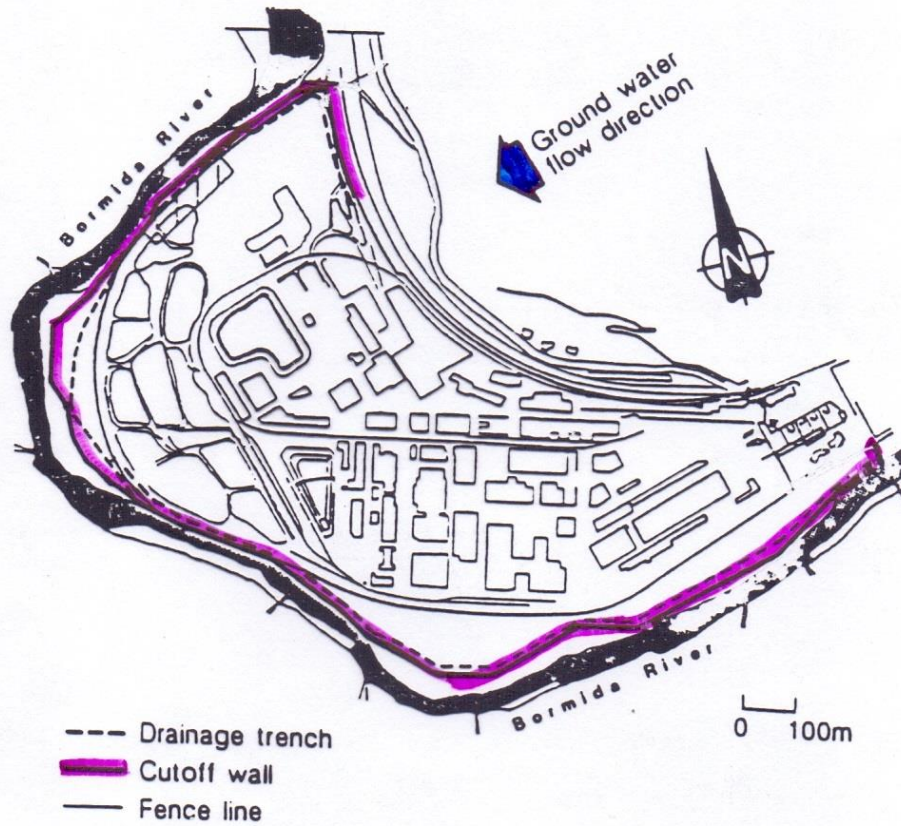
# Μερικός εγκιβωτισμός



# Εγκιβωτισμός ρύπου: Περιστατικό

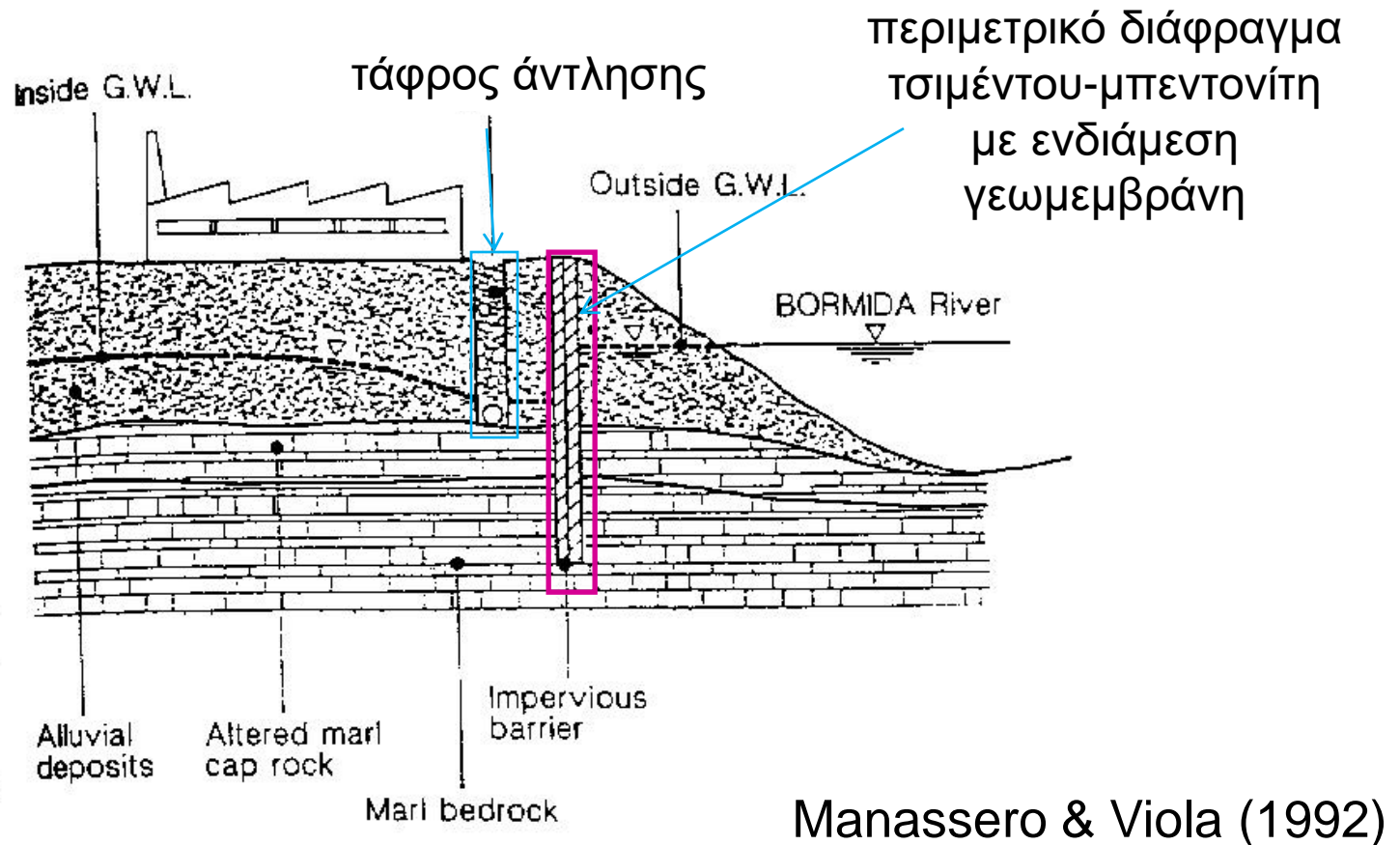
- Βιομηχανική μονάδα στην Ιταλία δίπλα σε ποτάμι
- Πρόβλημα: μεταφορά ρύπων στο ποτάμι
- Λύση: περιμετρικό διάφραγμα τσιμέντου-μπεντονίτη με ενδιάμεση γεωμεμβράνη
- Βιβλιογραφική αναφορά: Manassero & Viola (1992)

# Περιμετρικό διάφραγμα: περιστατικό στην Ιταλία



Manassero &  
Viola (1992)

# Περιμετρικό διάφραγμα & διαχείριση υπόγειου νερού



## Περιορισμός εξάπλωσης ρύπων (2)

- Σταθεροποίηση ρύπου / στερεοποίηση εδάφους (stabilization/solidification)
  - Το χώμα αναμειγνύεται με πρόσθετα ώστε να αντιδράσει ο ρύπος (Λαύριο: ανάμειξη απορριμμάτων επίπλευσης με ασβεστολιθική άμμο) ή/και να σταθεροποιηθεί το χώμα (πχ ανάμειξη με τσιμέντο)
- Υαλοποίηση εδάφους (vitrification)
  - Το έδαφος θερμαίνεται (έως και 1800°C, με τη βοήθεια ηλεκτροδίων) και υαλοποιείται ακινητοποιώντας τους ρύπους (εφαρμόζεται σε μεικτή ρύπανση με ραδιενεργές ουσίες)

# Απομάκρυνση ρύπου και επεξεργασία στην επιφάνεια του εδάφους

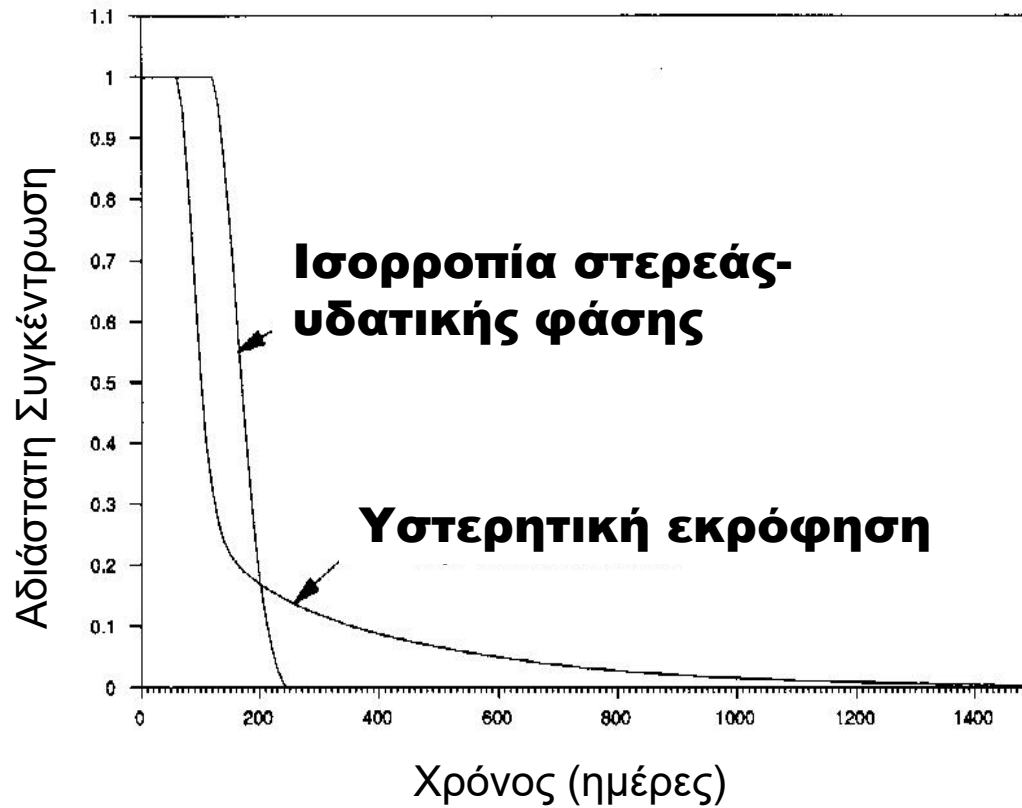
- Απομάκρυνση
  - με άντληση: ρύπανση υπόγειου νερού
  - με εκσκαφή: ρύπανση εδάφους (ακόρεστη ζώνη)
- Επεξεργασία
  - φυσική, χημική, βιολογική (= με τη μεσολάβηση μικροοργανισμών)

# Σχόλια για μεθόδους απορρύπανσης που βασίζονται στην άντληση νερού

- Έχουν προβλήματα σε **ανομοιογενή** εδάφη
  - Λύσεις για παράλληλες στρώσεις: οριζόντια πηγάδια, πηγάδια με επανακυκλοφορία νερού (πχ, βλέπε <http://www.ieg-technology.com/en/Applications/Groundwater-Saturated-Zone/Groundwater-Circulation-Well-Technology.html>)
- Υπολογισμοί μείωσης συγκέντρωσης συχνά υποεκτιμούν τον απαιτούμενο χρόνο απορρύπανσης
  - Οι προβλέψεις βασίζονται σε μοντέλα που υποθέτουν στιγμιαία ισορροπία μεταξύ της υδατικής και στερεάς φάσης όσο μειώνεται η μάζα → συγκέντρωση
  - Λύση: προσομοίωση με δύο περιοχές, ταχείας (στιγμιαίας) και βραδείας (με υστέρηση) αντιστροφής των φαινομένων προσρόφησης/απορρόφησης






# Εξέλιξη απορρύπανσης με υστέρηση στην εκρόφηση



Goltz & Oxley (1990)

# Επί τόπου επεξεργασία

- Ενεργητική επέμβαση στην κίνηση του υπόγειου νερού (άντληση) και επεξεργασία (βιολογική ή φυσική/χημική)
- Εισπίεση προσθέτων για την επίτευξη χημικής ή βιολογικής αντίδρασης (πιθανό πρόβλημα: πρόσβαση προσθέτων στην περιοχή του ρύπου;)
- Παθητική επέμβαση στην κίνηση του υπόγειου νερού (περατά διαφράγματα) και επεξεργασία (βιολογική ή φυσική/χημική) μέσα στο διάφραγμα (= επί τόπου αντιδραστήρας)   

# Επί τόπου επεξεργασία με άντληση και εισπίεση νερού+προσθέτων

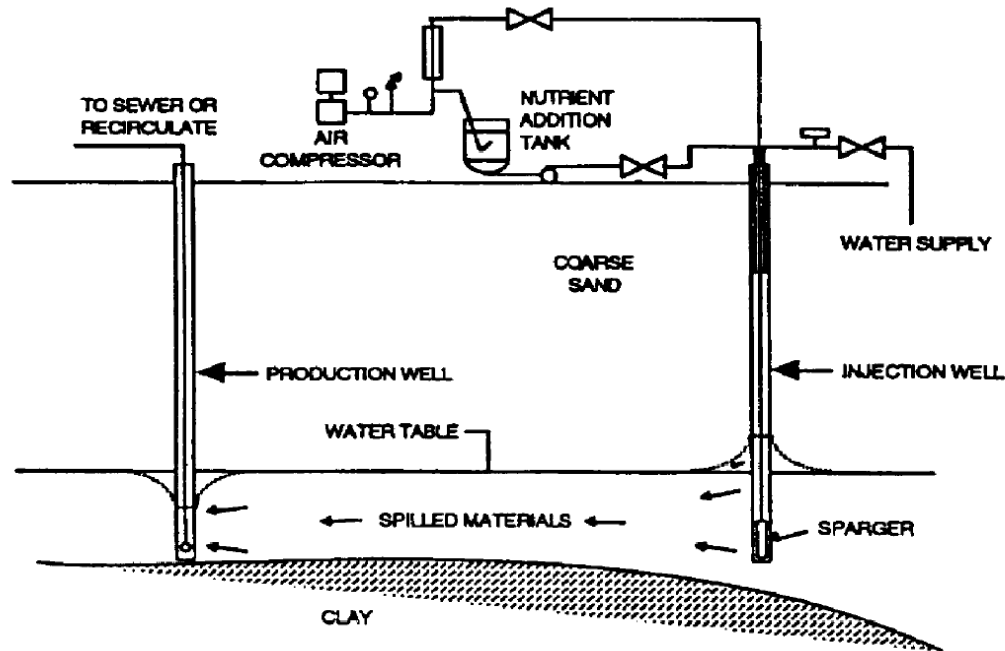
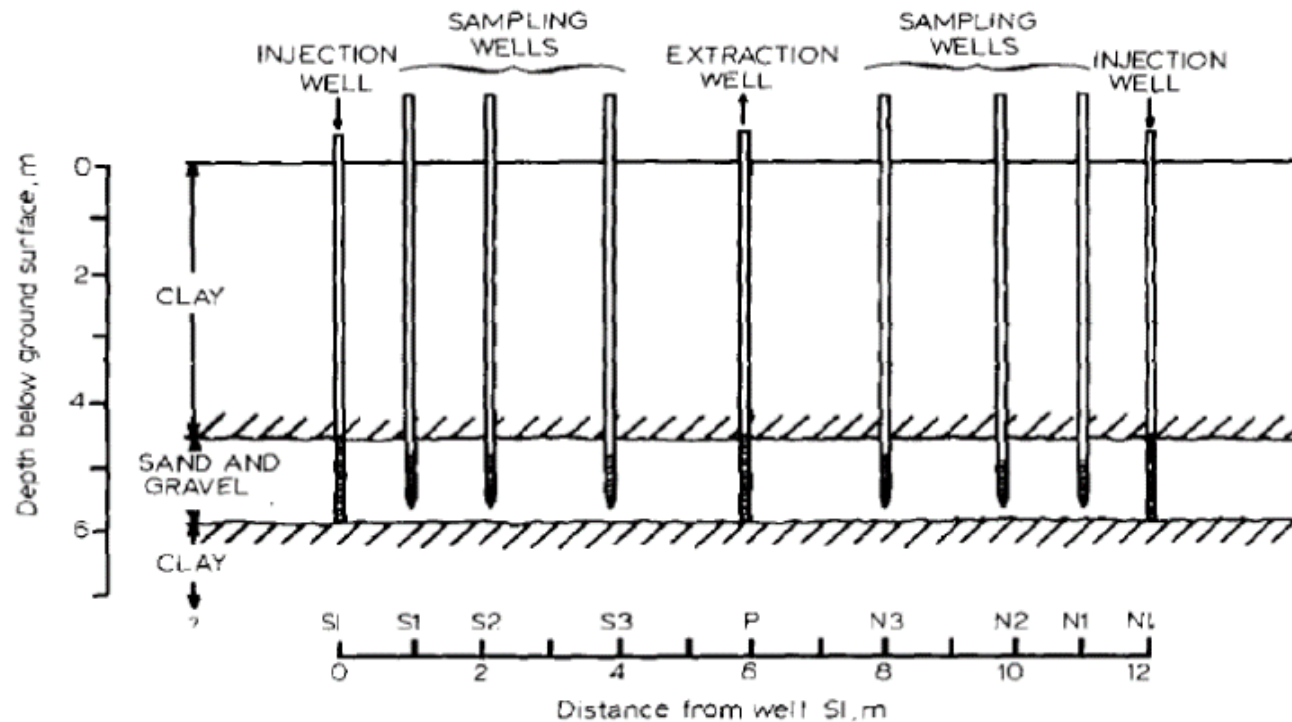


Fig. 1. Typical system.

Bedient & Rifai (1992)

# Επί τόπου επεξεργασία με άντληση και εισπίεση νερού+προσθέτων: Moffett



Semprini et al. (1992)

# Παράδειγμα 1: βιολογική αποδόμηση TCE

- Σταδιακή αποδόμηση τριχλωροαιθενίου TCE σε διχλωροαιθένιο DCE → βινυλοχλωρίδιο VC → αιθένιο
- Σε αναερόβιες συνθήκες το κάθε βήμα είναι πιο αργό από το προηγούμενο, γι' αυτό συχνά συσσωρεύονται ενδιάμεσα προϊόντα
  - Συνθήκες ευνοϊκές για αποδόμηση: αναερόβιες για PCE και TCE, αερόβιες για DCE και VC
- Μηχανισμός: η αναγωγή του TCE (δηλ. η αναγωγή των ατόμων άνθρακα στο μόριο του TCE) γίνεται με (α) τη βοήθεια συγκεκριμένων γηγενών μικροοργανισμών που αντλούν ενέργεια από την αντίδραση και (β) την απαραίτητη παρουσία κάποιου δότη ηλεκτρονίων (= κάποιας ένωσης που να διασπάται σε H<sub>2</sub>)

## Παράδειγμα 2: βιολογική αποδόμηση Cr(VI)

- Ενώσεις εξασθενούς χρωμίου Cr(VI) ανάγονται και σχηματίζουν σχετικώς αβλαβείς, δυσδιάλυτες ενώσεις τρισθενούς χρωμίου Cr(III)
- Η αναγωγή του εξασθενούς χρωμίου είναι δυνατή υπό αερόβιες ή αναερόβιες συνθήκες, η έμφαση δίνεται στις αναερόβιες που είναι οι πιο συνήθεις
- Μηχανισμός: μια ποικιλία μικροοργανισμών συμβάλλει άμεσα (αντλούν ενέργεια από την αντίδραση, όπως και στην περίπτωση του TCE) είτε έμμεσα [μεσολαβούν για να παραχθεί μια ανόργανη ένωση που στη συνέχεια αντιδρά με την ένωση Cr(VI)]
  - Σημείωση: έχει σημασία πώς γίνεται η αναγωγή, γιατί τα παραγόμενα προϊόντα του Cr(III) έχουν διαφορετική σταθερότητα

# Εισπίεση προσθέτων για την ενίσχυση της βιοαποδόμησης

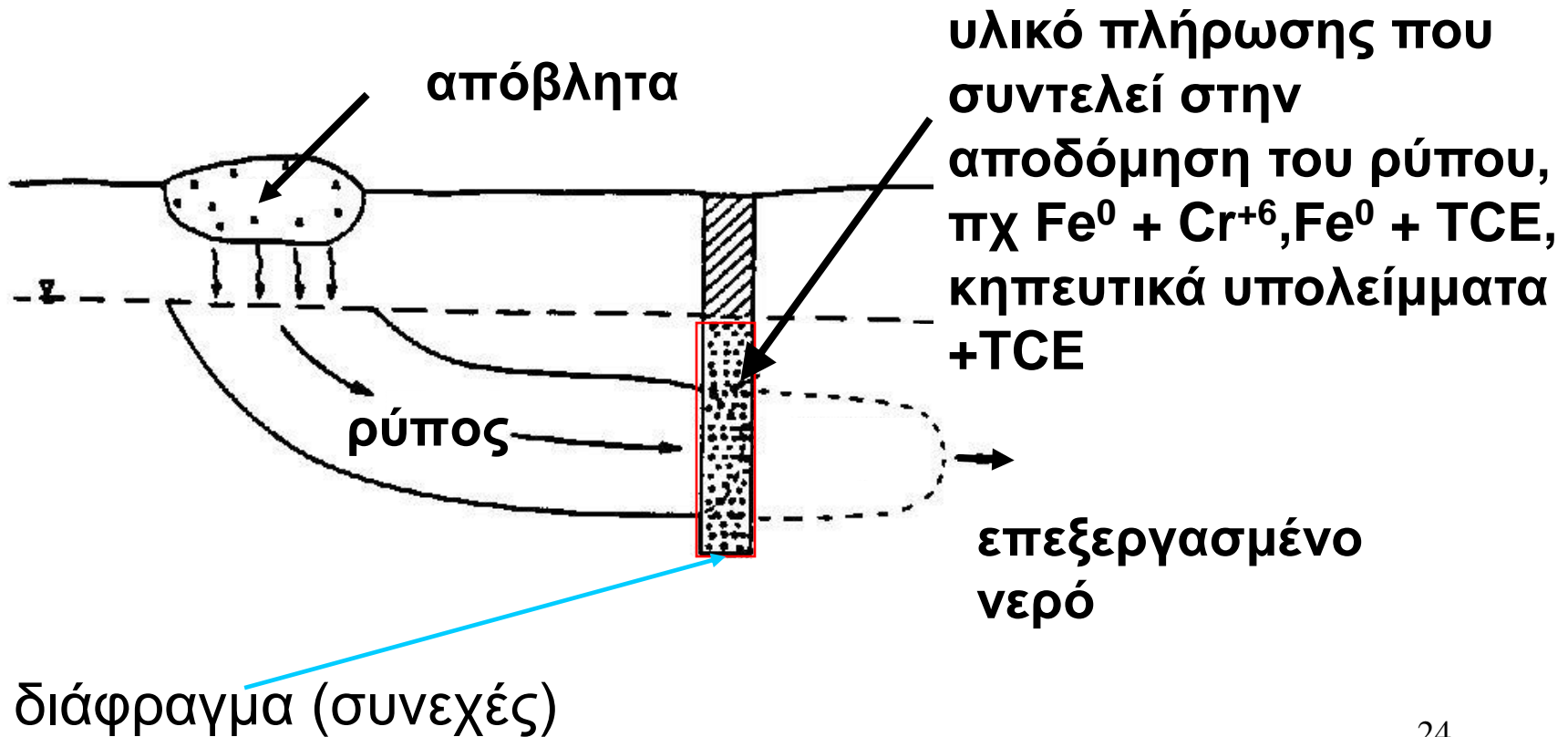
Ρυπασμένος Χώρος	Χρόνος ημιζωής τριχλωροαιθέριου (TCE)
<b>USEPA (1997), Symposium on Natural Attenuation of Chlorinated Organics</b>	
St. Joseph Site (Bendix Corp.), MI	0.4 – 2.3 χρόνια
Plattsburgh AFB, NY	0.6 – 1.7 χρόνια
Eielson AFB, AK	0.73 χρόνια
<b>Parsons (2004), Enhanced Anaerobic Bioremediation of Chlorinated Solvents</b>	
Στεγνοκαθαριστήριο (WI): Βιοδιέγερση (Biostimulation)	1 – 4.5 μήνες
Συλλογή 8 χώρων με βιοδιέγερση	0.6 – 8.3 μήνες
Aerojet Corporation, CA: Βιοεπαύξηση (Bioaugmentation)	4.1 – 11 μέρες

Βιοδιέγερση: εισπιέζονται πρόσθετα για να πολλαπλασιαστούν οι γηγενείς μικροοργανισμοί και να επιταχυνθεί η δράση τους

Βιοεπαύξηση: εισπιέζονται πρόσθετα και κατάλληλοι μικροοργανισμοί

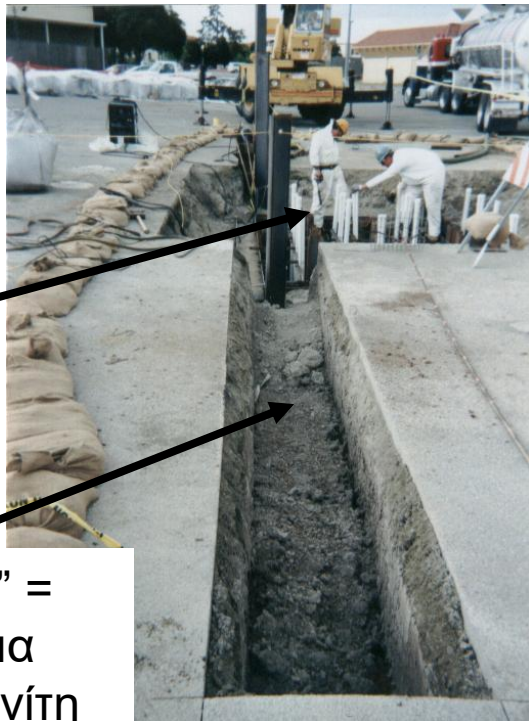
# Περατά διαφράγματα

Η ιδέα: επί τόπου επεξεργασία χωρίς (καμία) ενεργητική παρέμβαση στη ροή του υπόγειου νερού





# Παραλλαγή σχεδιασμού: ασυνεχές διάφραγμα “funnel & gate”



gate

“funnel” =  
πέτασμα  
μπεντονίτη

Περατό τμήμα  
διαφράγματος  
(gate) και  
σωλήνες  
δειγματοληψίας



πλήρωση  
διαφράγματος



# Περατά διαφράγματα - αντιδραστήρες: Περιστατικό

- Πρόβλημα: χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες στο υπόγειο νερό ξεπερνούν όρια ιδιοκτησίας
- Λύση 1: άντληση και επεξεργασία. Αργεί να φέρει αποτελέσματα
- Λύση 2: κατασκευή διαφράγματος πετυχαίνει μείωση συγκεντρώσεων στα κατόντη

Szerdy et al. (1996)

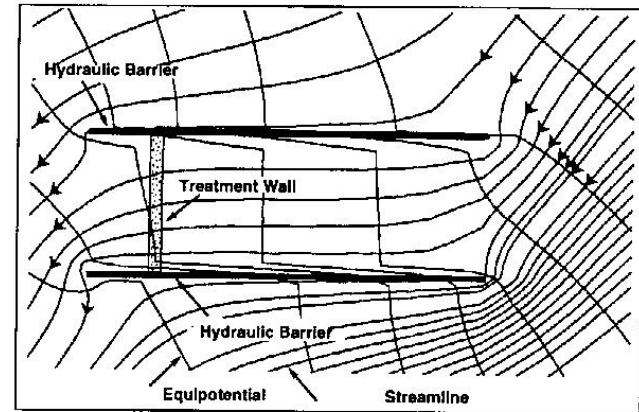


Figure 3 - Groundwater flow modeling of treatment wall and slurry wall system.

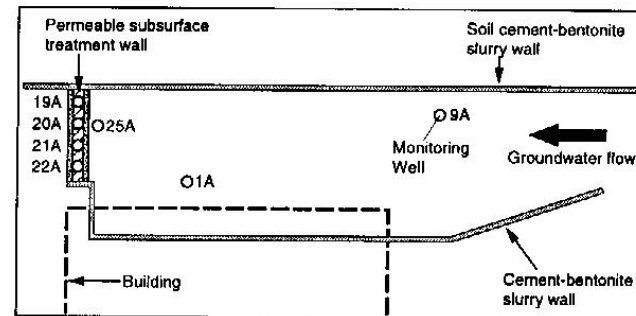
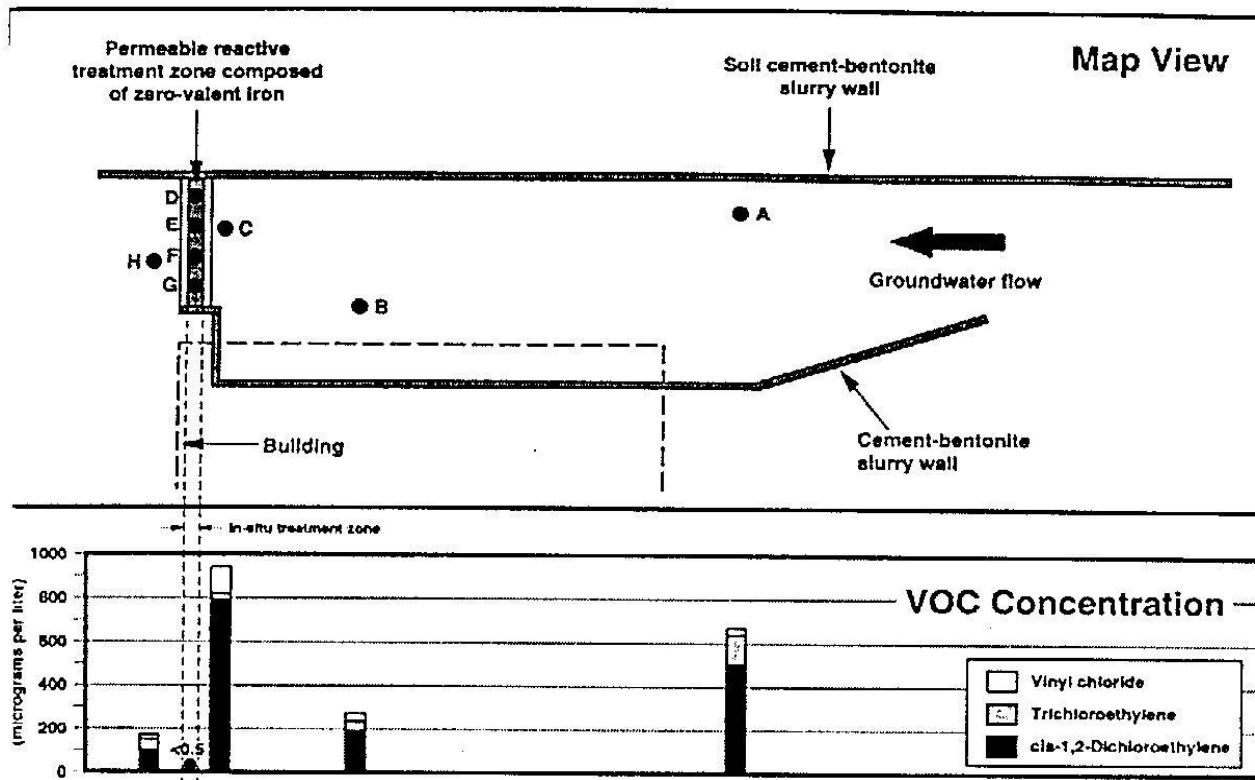


Figure 4 - Plan view, treatment wall and slurry wall system.

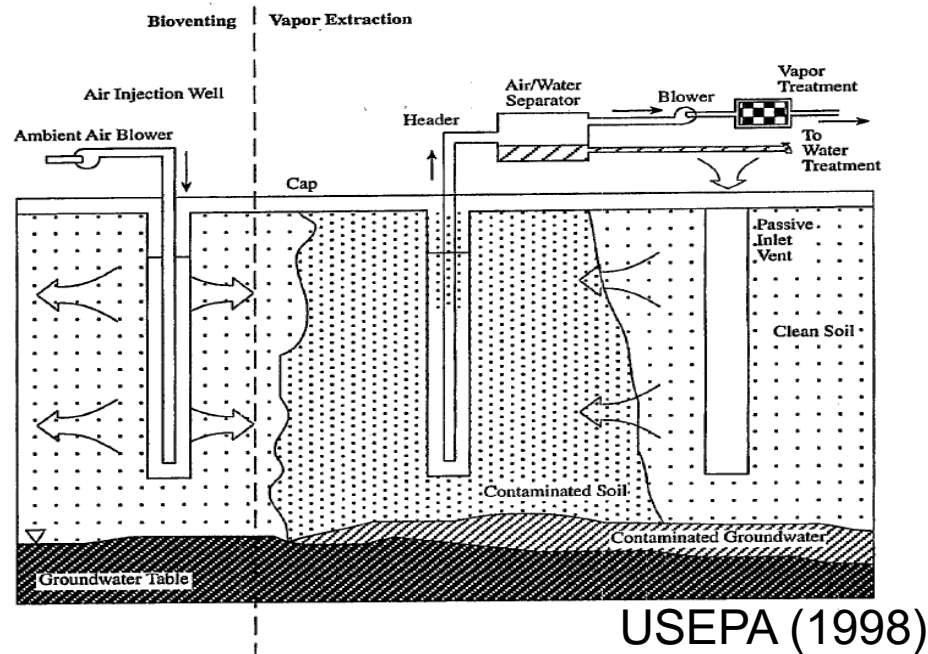
# Συγκεντρώσεις ανάντη-κατάντη διαπερατού διαφράγματος



# Άντληση εδαφικού αέρα (ακόρεστη ζώνη)

- Άντληση αέρα + ατμών ρύπων από την ακόρεστη ζώνη (soil vapor extraction – SVE)
  - για ρύπους με υψηλές τιμές σταθεράς Henry και τάσης ατμών
  - κατάλληλη για διαρροή ρύπου διαλυμένου στο νερό ή μη υδατικής φάσης
  - πρέπει να συνδυαστεί με επεξεργασία αντλούμενου αέρα
  - παραλλαγή με μικρές ταχύτητες αέρα για αύξηση ρυθμού βιολογικής αποδόμησης: βιοαερισμός (bioventing)

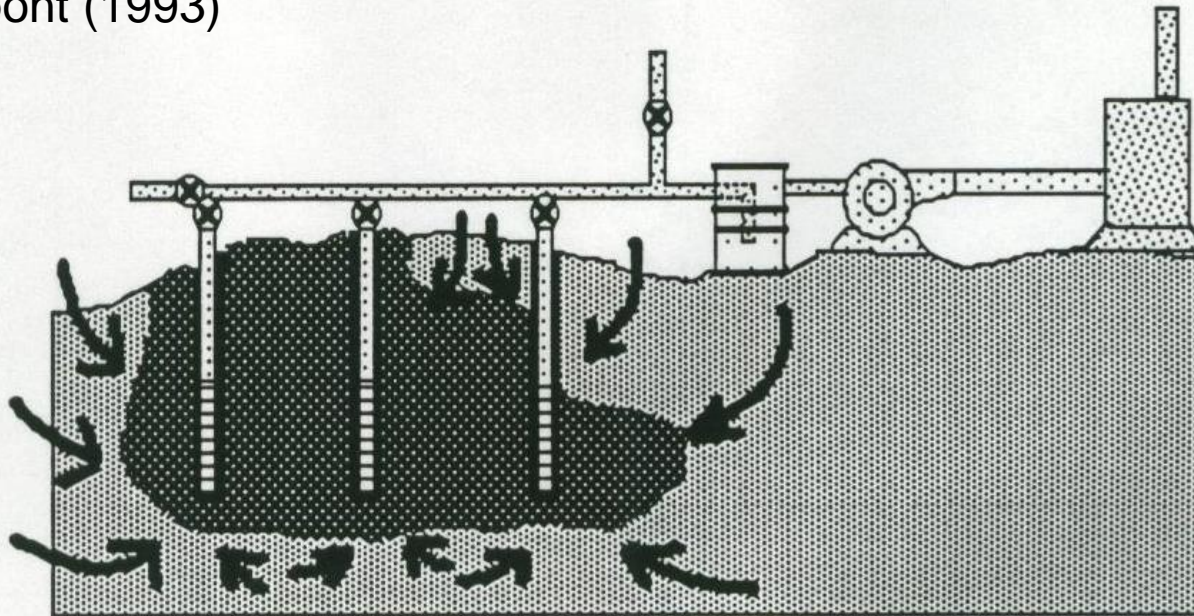
# Άντληση εδαφικού αέρα (SVE) – Βιοαερισμός (Bioventing)



Άντληση εδαφικού αέρα – στόχος: απομάκρυνση μάζας ρύπου (άντληση με υψηλή παροχή)  
Βιοαερισμός – στόχος: κυκλοφορία αέρα/οξυγόνου στην ακόρεστη ζώνη (άντληση με χαμηλή παροχή)

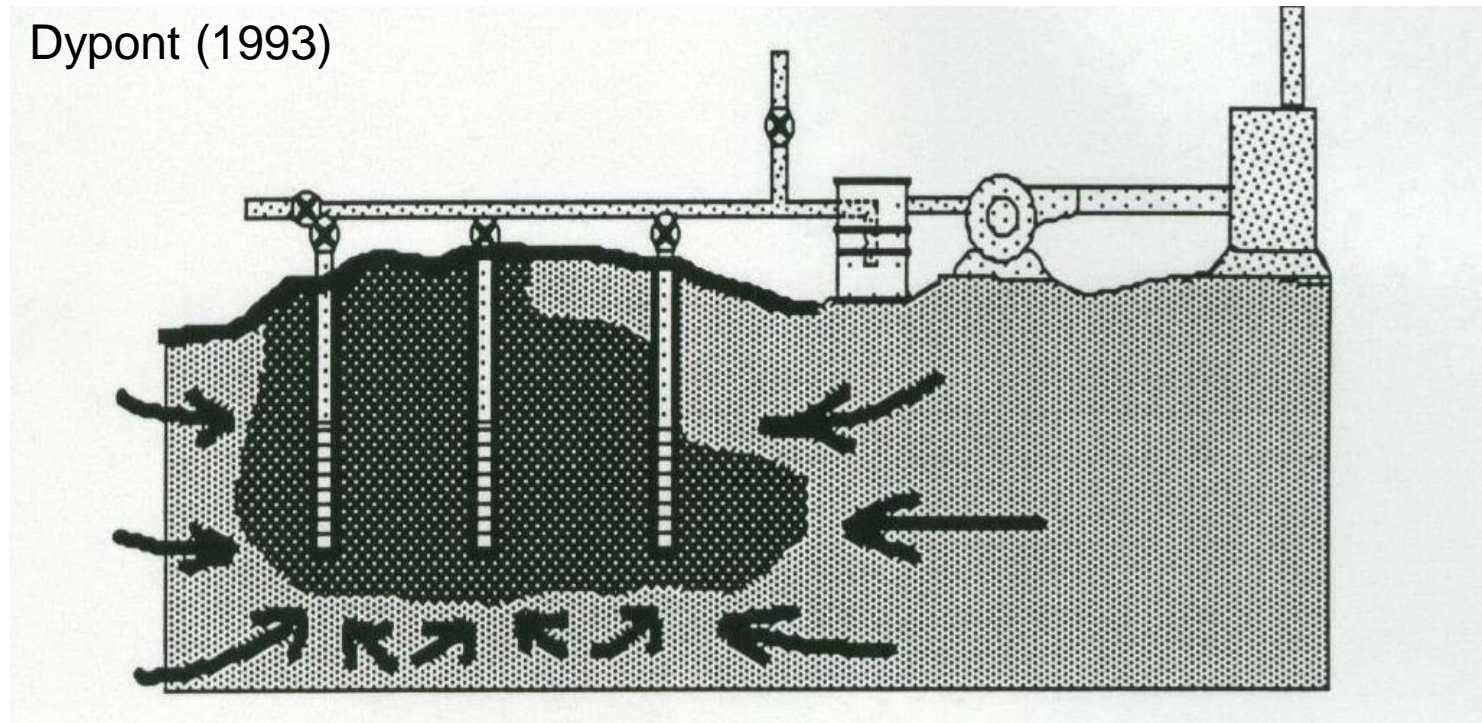
# Άντληση εδαφικού αέρα (SVE)

Dupont (1993)



# Άντληση εδαφικού αέρα (SVE), συν.

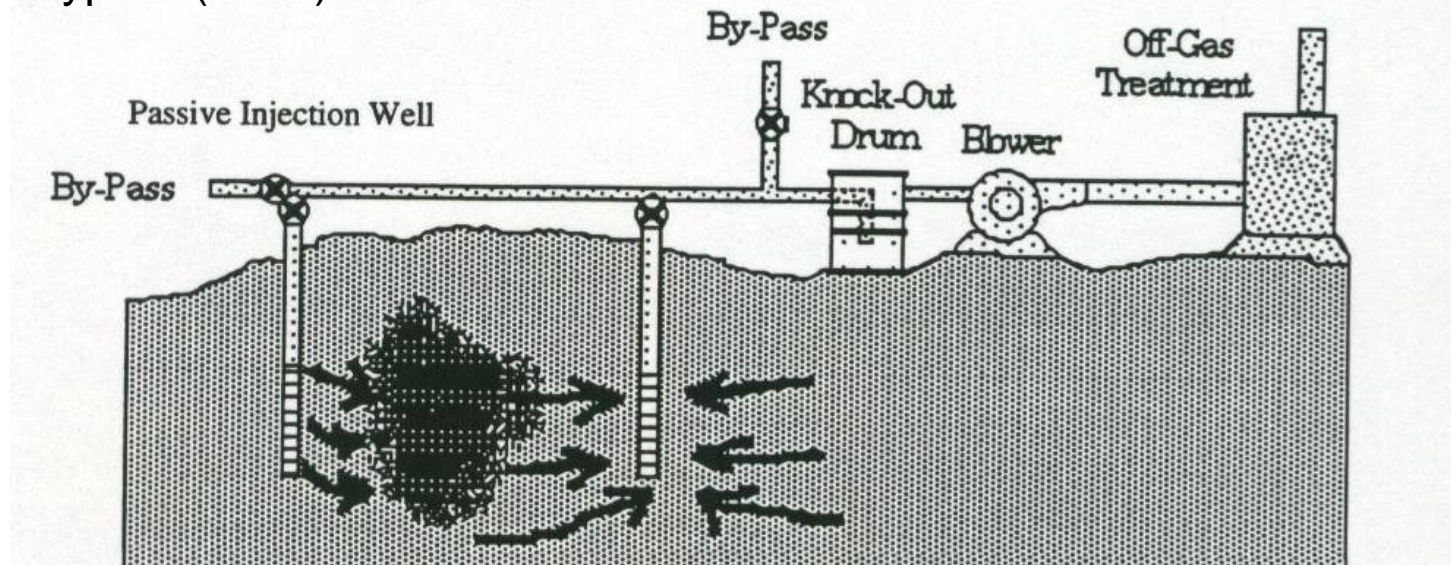
Dypon (1993)



Άντληση αέρα από την ακόρεστη ζώνη σε συνδυασμό με κατασκευή καλύμματος (πιο αποδοτική άντληση)

# Βιοαερισμός (Bioventing)

DyPont (1993)



Κυκλοφορία αέρα στην ακόρεστη ζώνη για ενίσχυση βιολογικής αποδόμησης



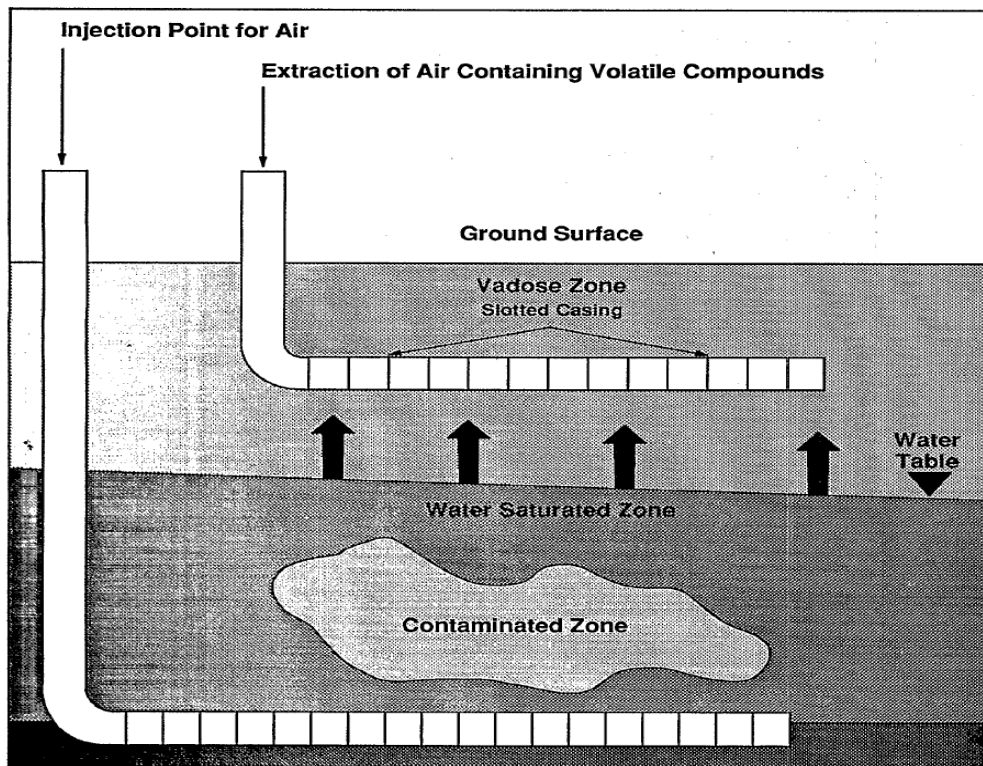
# Αεροδιασκορπισμός: Εισπίεση αέρα (κορεσμένη ζώνη)

- Εισπίεση αέρα κάτω από το χαμηλότερο σημείο ρύπανσης (air sparging, in situ air stripping)
  - καθώς ο εισπνεζόμενος αέρας κινείται προς τα πάνω απομακρύνει τους πτητικούς ρύπους
  - για ρύπους με υψηλές τιμές σταθεράς Henry και τάσης ατμών
  - κατάλληλη για διαρροή ρύπου διαλυμένου στο νερό ή μη υδατικής φάσης
  - εφαρμόζεται σε περατά εδάφη
  - πρέπει να συνδυαστεί με συλλογή ατμών στην ακόρεστη ζώνη (και επεξεργασία)

# Αεροδιασκορπισμός & οριζόντια φρέατα

μηχανισμός  
αποκατάστασης

πρόσβαση  
στον ρύπο



USEPA (1991)

# ΦΥΤΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

- Φυτοαποδόμηση – ριζοαποδόμηση: διάσπαση των ρύπων (κυρίως οργανικών) στην περιοχή των ριζών ή και στην ίδια τη μάζα των φυτών
- Φυτοσταθεροποίηση: ακινητοποίηση των ρύπων (μέταλλα ή υδροφοβικοί οργανικοί ρύποι) στην περιοχή του ριζικού συστήματος
- Φυτοεξαγωγή: συσσώρευση των ρύπων στους φυτικούς ιστούς (κυρίως μέταλλα και μεταλλοειδή) και απομάκρυνση με διαδικασία διαδοχικών συγκομιδών

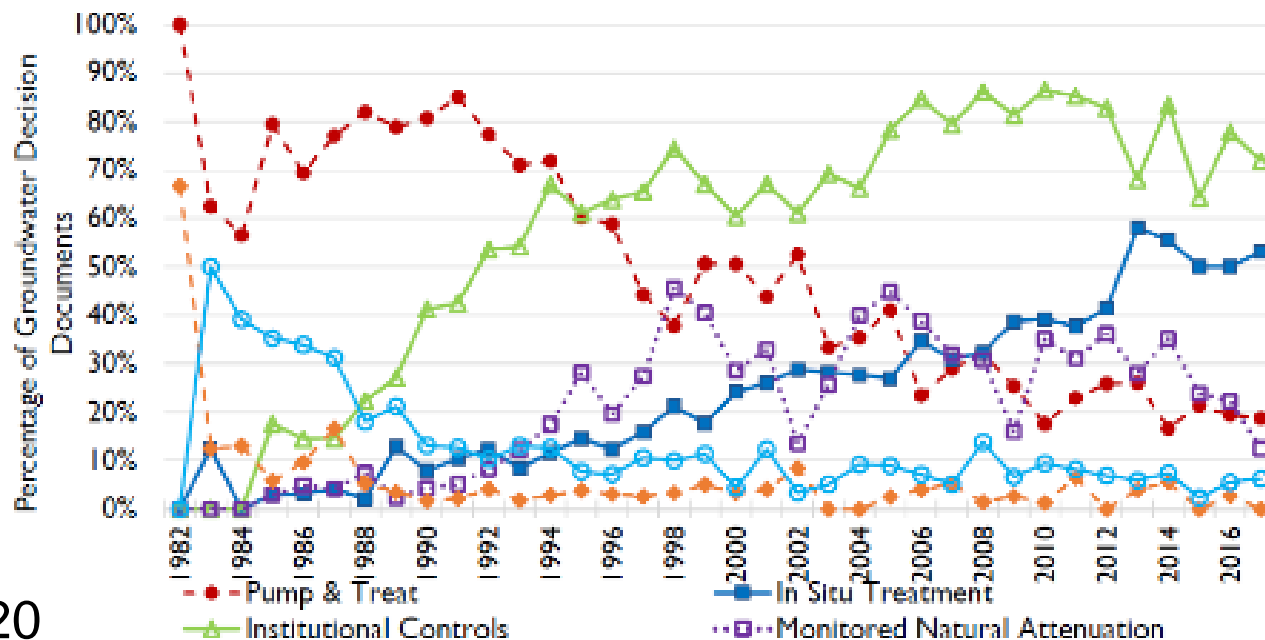
\* Πιθανότητα εξάπλωσης μέσω του φυτού στο περιβάλλον (εξάτμιση) και στην τροφική αλυσίδα

# Οι δύο κύριες συνιστώσες των τεχνολογιών αποκατάστασης

- Επίδοση μηχανισμού αποκατάστασης
  - διαφορετικά προβλήματα ανά κατηγορία ρύπων
  - πιο εύκολα ελεγχόμενη για επεξεργασία στην επιφάνεια του εδάφους
- Πρόσβαση στον ρύπο
  - χρειάζεται να ελέγξω την κίνηση κάποιας φάσης; (νερού, αέρα)
  - πόσο ενεργά πρέπει να επέμβω;

# Εξέλιξη στις επιλογές τεχνολογιών τα τελευταία 30 χρόνια στις ΗΠΑ

Selection Trends for Decision Documents with Groundwater Remedies (FY 1982–2017)  
Groundwater Decision Documents = 2,541



Powell, 2020

# Ερωτήσεις κατανόησης

- Ποιες τεχνολογίες μειώνουν τον κίνδυνο και ποιες τη διακινδύνευση;
- Ποιες τεχνολογίες είναι κατάλληλες για χώρους με μη υδατική φάση;

# Βιβλιογραφικές αναφορές

- Bedient, P.B. and H.S. Rifai, 1992, Ground water contaminant modeling for bioremediation: A review, J. of Hazardous Materials, 32(2-3):225-243
- Dupont, R.R., 1993, Fundamentals of bioventing applied to fuel contaminated sites, Environmental Progress, 12(1):45-53.
- Goltz, M.N. and M. E. Oxley, 1991, Analytical modeling of aquifer decontamination by pumping when transport is affected by rate-limited sorption, Water Resources Research, 27(4): 547–556
- Manassero M. and C. Viola, 1992, Innovative aspects of leachate containment with composite slurry walls: A case history, In: Slurry Walls: Design, Construction, and Quality Control, D.B. Paul et al. (Eds), ASTM Publ. No.04-011290-38, ASTM, Philadelphia, PA, USA.
- Parsons Corporation (Parsons), 2004, Final Principles and practices of enhanced anaerobic bioremediation of chlorinated solvents, AFCEE, Brooks City-Base Texas, Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, California, and ESTCP, Arlington, Virginia
- Powell, D., 2020, The Federal Remediation Technology Roundtable at 30 1990-2020, PowerPoint Presentation available at: [https://clu-in.org/conf/tio/FRTR-Retro\\_111820/default.cfm#tabs-4](https://clu-in.org/conf/tio/FRTR-Retro_111820/default.cfm#tabs-4)

# Βιβλιογραφικές αναφορές (συν.)

- Semprini, L., G.D. Hopkins, P.V. Roberts and P.L. McCarty, 1992, Pilot scale field studies of in situ bioremediation of chlorinated solvents, J. Hazardous Materials, 32(2-3):145-162
- Szerdy, F.S., J.D. Gallinatti, S.D. Warner, C.L. Yamane, D.A. Hankins and J.L. Vogan, 1996, In site groundwater treatment by granular zero-valent iron design, construction and operation of an in situ treatment wall, ASCE Conf. Proc. Non-Aqueous Phase Liquids (NAPLs) in Subsurface Environment: Assessment and Remediation
- USEPA, 1991, Synopses of Federal Demonstrations of Innovative Site Remediation Technologies, Demonstration Project at Savannah River Site (pp. 52-54), EPA/540/8-91/009
- USEPA, 1997, Proceedings of the Symposium on Natural Attenuation of Chlorinated Organics in Ground Water, EPA/540/R-97/504
- USEPA, 1998, Innovative Site Remediation Technology, Design and application, Volume 7: Vacuum Extraction and Air Sparging, EPA 542/B-97/010



# Πηγές

- Sharma, H.D. and K.R. Reddy, 2004, Geoenvironmental Engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies, Wiley
- Γιδαράκος, Ε. και Μ. Αϊβαλιώτη, 2005, Τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών και υπογείων υδάτων από επικίνδυνους ρύπους, Εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη

# Πηγές στο Internet

- Υπηρεσία Περιβάλλοντος της Αμερικής  
<http://clu-in.org/remed1.cfm>
  - προσέξτε και τις περιγραφές για το ευρύ κοινό - Citizen's Guides to Cleanup Methods, <http://clu-in.org/products/citguide/> (π.χ. A citizen's guide to bioremediation)
- Federal Remediation Technologies Roundtable, 2020, Remediation Technologies Screening Matrix:  
<https://frtr.gov/matrix/Full-Matrix/>
  - Δείτε και προηγούμενη εκδοχή: Federal Remediation Technologies Roundtable, 2002, Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, 4th Edition, <https://frtr.gov/matrix2/section1/toc.html>