ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΧΩΡΩΝ
ΣΧΟΛΙΑ ΓΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΔΙΝΟΝΤΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Σχόλια για 1. άντληση με επεξεργασία

- Δοκιμασμένη τεχνολογία
- Κατ' αρχήν κατάλληλη για κάθε είδος ρύπου (μεγάλο εύρος μεθόδων επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων)
- Προβληματική η απομάκρυνση του ρύπου μέσω άντλησης για ανομοιογενή εδάφη
- Πετυχαίνει μείωση της συνολικής μάζας του ρύπου αλλά είναι δύσκολη η επίτευξη επιτρεπτών ορίων
- Πρέπει να ληφθεί υπόψη ο συνολικός όγκος του νερού που μπορεί να απομακρυνθεί από τον υδροφορέα
- Απαιτούμενος χρόνος: λίγες δεκαετίες

Σχόλια για 2. περατά διαφράγματα

- Εκμεταλλεύονται τη φυσική ροή του υπόγειου νερού
- Εφαρμόσιμα όταν υπάρχει κατάλληλο υλικό πλήρωσης που μπορεί να αποδομήσει τον ρύπο (ή κατάλληλα εισπιέσιμα πρόσθετα)

  Παράδειγμα: ρινίσματα σιδήρου είναι κατάλληλα για τριχλωροαιθένιο και εξασθενές χρώμιο, καθώς πετυχαίνουν την αναγωγή αυτών των ουσιών. Επίσης, μπορούμε να εισπιέσουμε μέσα στην περιοχή του περατού διαφράγματος κατάλληλα πρόσθετα για να επιταχύνουμε βιολογικές διαδικασίες: πχ τα πετρελαιοειδή βιοαποδομούνται σε αερόβιες συνθήκες (προσθήκη οξυγόνου και θρεπτικών ουσιών), αντίθετα το τριχλωροαιθένιο ανάγεται σε αναερόβιες συνθήκες (προσθήκη δότη ηλεκτρονίων και θρεπτικών ουσιών)
- Πιθανά απαραίτητη συντήρηση (αν αντιδρά το υλικό πλήρωσης)
- Απαιτούμενος χρόνος: λίγες δεκαετίες

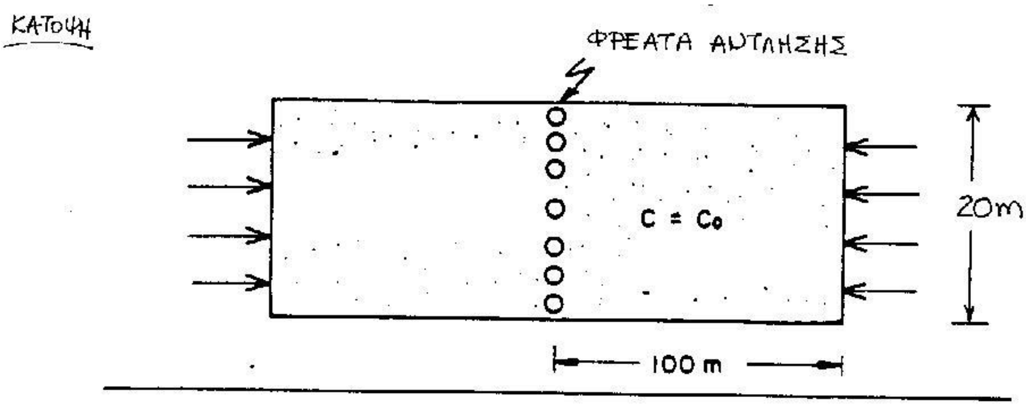
Σχόλια για 3. παρουσία μη υδατικής φάσης

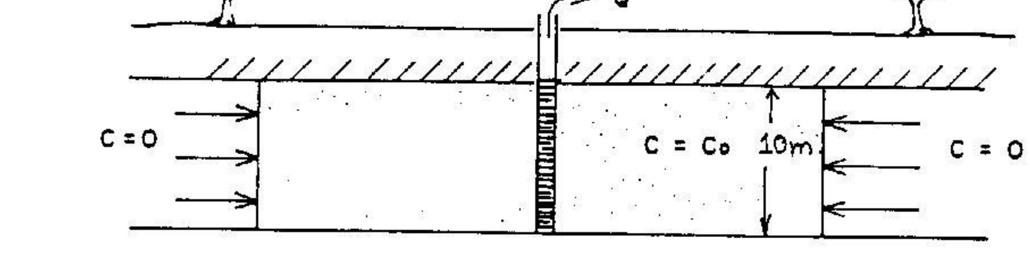
- Η ύπαρξη μη υδατικής φάσης αποτελεί μια σταθερή πηγή ρύπου (ώσπου αυτή να διαλυθεί εντελώς)
- Ενδεικτικοί υπολογισμοί, που υποστηρίζονται από πειράματα, δείχνουν ότι ο χρόνος που απαιτείται για να διαλυθεί μια κηλίδα NAPL είναι της τάξης των πάρα πολλών δεκαετιών
- Για την αποκατάσταση χώρων όπου ο ρύπος βρίσκεται σε μη υδατική φάση, συχνά χρειάζεται να επέμβουμε ξεχωριστά για την αφαίρεση της μη υδατικής φάσης (εκτοπίζοντάς την με εισπίεση ατμού ή εισπιέζοντας τασιενεργές ουσίες που μειώνουν τις τριχοειδείς δυνάμεις και αυξάνουν τη διαλυτότητα) και στη συνέχεια να ασχοληθούμε με το διαλυμένο (+ τον ροφημένο!) ρύπο με τις τεχνολογίες που είδαμε στην επισκόπηση των τεχνολογιών αποκατάστασης.

ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΧΩΡΩΝ
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

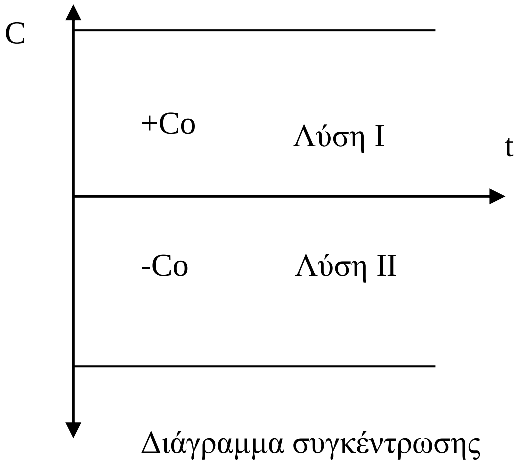
1. Εκτίμηση χρόνου απαιτούμενου για απορρύπανση με τη μέθοδο της άντλησης και επεξεργασίας

Το πιο κάτω σκίτσο δείχνει ένα υδροφορέα πάχους 10m ρυπασμένο σε μια έκταση 200m επί 20m με μέση συγκέντρωση Co = 1000 μg/lt. Θεωρήστε μια απλουστευμένη περίπτωση που η ρυπασμένη περιοχή περιβάλλεται από καθαρό νερό, και ένα εκτεταμένο σύστημα φρεάτων άντλησης (η συμπεριφορά του οποίου μπορεί να προσεγγιστεί με μια συνεχή τάφρο άντλησης) και επεξεργασίας, που δημιουργεί μονοδιάστατη ροή με φαινόμενη (όπως υπολογίζεται δηλαδή από το νόμο του Darcy) ταχύτητα ίση με v = 0,70 m/ημέρα. Με αυτά τα δεδομένα υπολογίστε:
(α) το χρόνο που θα χρειαστεί για να μειωθεί η συγκέντρωση σε C = 2 μg/lt. (β) Πόσος όγκος νερού θα έχει αντληθεί μέχρι τότε; Εκφράστε αυτόν τον όγκο σαν πολλαπλάσιο του συνολικού όγκου των κενών (άρα και του όγκου νερού των πόρων) του υδροφορέα.
Χρησιμοποιήστε τις πιο κάτω παραμέτρους: πορώδες n = 0,35, πυκνότητα (ξηρού) εδάφους ρ_d = 1,6 g/cm^3, συντελεστής διαχωρισμού K_p = 10 lt/kg και συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς α_L = 1m (αγνοήστε τη διάχυση).

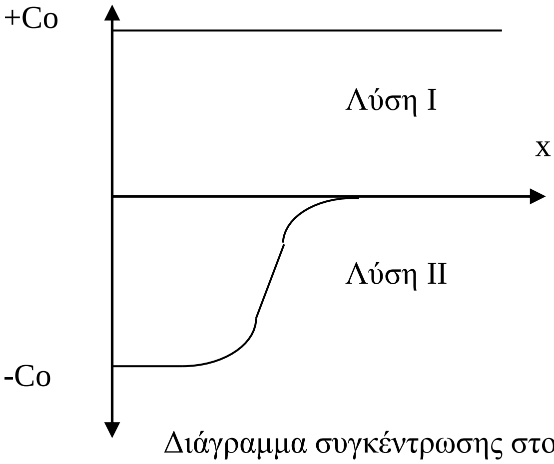




ΛΥΣΗ: Θα χρησιμοποιήσουμε την αρχή της επαλληλίας και τη γνωστή εξίσωση μεταγωγής-διάχυσης/διασποράς. Το “κόλπο” είναι να περιγράψουμε την κίνηση του καθαρού νερού σαν μια “πηγή αρνητικής συγκέντρωσης”.



Διάγραμμα συγκέντρωσης στην “πηγή”, για κάθε t



Διάγραμμα συγκέντρωσης στον υδροφορέα, για σταθερό t

- Αρχή της επαλληλίας

Στην “πηγή”, στο όριο δηλαδή της ρυπασμένης-καθαρής περιοχής:

$C = Co_I + Co_{II} = 0$, όπου $Co_I = 1.000$ μg/lt, $Co_{II} = - 1.000$ μg/lt

Στον υδροφορέα:

$C = C_I + C_{II}$, όπου $C_I = Co_I = 1.000$ μg/lt και $C_{II} = (Co_{II}/2)\ \mathrm{erfc}\ \dfrac{x-\bar{v}*t}{2\sqrt{D*t}}$

- Υπολογισμός παραμέτρων:

Συντελεστής υστέρησης, $R = 1 + (\rho_d\ K_p)/n = 1 + (1{,}6\ g/cm^3 \times 10\ cm^3/g)/0{,}35 = 46{,}7$

Μέση γραμμική ταχύτητα, $\bar{v}$ = v/n = 0,70 m/ημέρα / 0,35 = 2 m/ημέρα

Συντελεστής διασποράς, $D = \alpha_L\ \bar{v}$ = 1m x 2 m /ημέρα = 2 m^2/ημέρα

$\bar{v}* = \bar{v}/R$ = 2 m/ημέρα / 46,7 = 0,04 m/ημέρα

$D* = D/R$ = 2 m^2/ημέρα / 46,7 = 0,04 m^2/ημέρα

Έχω ελέγξει πως $\dfrac{\bar{v}x}{D} = \dfrac{2\cdot 100}{2} = 100$ κι έτσι κρατώ μόνο τον πρώτο όρο της εξίσωσης

(α) $C = C_I + C_{II} \Rightarrow C_{II} = -998$ μg/lt $\Rightarrow$ $C_{II} / (Co_{II}) = 0{,}998 = (1/2) \times \mathrm{erfc}\ \dfrac{x-\bar{v}*t}{2\sqrt{D*t}}$

Αν $\alpha = \dfrac{x-\bar{v}*t}{2\sqrt{D*t}} \rightarrow \mathrm{erfc}\ \alpha = 1{,}996 \rightarrow \alpha \approx -2{,}05$

Σημ: Επειδή erfc > 1 $\Rightarrow$ α αρνητικό, erfc(-α) = 2 – erfc(α), $\Rightarrow$ erfc(-α) = 2 – 1,996=0,004 $\Rightarrow$ -α ≈ 2,05 $\Rightarrow$ α ≈ -2,05

$\rightarrow$ - 2,05 = $\dfrac{100 - 0{,}04t}{2\sqrt{0{,}04t}}$ $\rightarrow$ t $\approx$ 3.750 ημέρες $\approx$ 10 έτη

(β) όγκος αντλούμενου νερού

$V_{αντλ}$= Q t = 2 v A t = 2 x 0,70 m/ημέρα x (20m x 10m) x 3750 ημέρες = 1.050.000m^3

Σημ: στον υπολογισμό του $V_{αντλ}$ πολλαπλασιάζω με 2 για να λάβω υπόψη μου τα δύο τμήματα του υδροφορέα, αριστερά και δεξιά από τα φρέατα άντλησης. Είναι επίσης πολύ σημαντικό να προσέξω πως ενώ στον υπολογισμό της ποσότητας νερού που κινείται στο υπέδαφος χρησιμοποιώ την ταχύτητα Darcy (ταχύτητα ανηγμένη στην συνολική επιφάνεια μιας διατομής), στον υπολογισμό της μεταφοράς του ρύπου λόγω μεταγωγής χρησιμοποιώ τη μέση γραμμική ταχύτητα (ταχύτητα ανηγμένη στην επιφάνεια των εδαφικών κενών μιας διατομής).

Όγκος νερού πόρων

V_w = V n = 200m x 20m x 10m x 0,35 = 14.000 m^3

Χρειάζεται να αντλήσουμε όγκο ίσο με 75 φορές το περιεχόμενο του υδροφορέα για να μειωθεί η συγκέντρωση από 1.000 μg/lt σε 2 μg/lt. Αυτό το μεγάλο πολλαπλάσιο είναι μη ρεαλιστικό!

2. Σχεδιασμός περατού διαφράγματος

• Πρώτα βρίσκω τη <u>μέση γραμμική ταχύτητα ροής</u>, που είναι απαραίτητη για να υπολογίσω *πόσο θα μείνει* ο ρύπος μέσα στο διάφραγμα (λύνω το πρόβλημα ροής ή υπολογίζω την κλίση του υδραυλικού φορτίου από καμπύλες ίσου υδραυλικού φορτίου). Πρέπει να ξέρω την υδραυλική αγωγιμότητα, εδώ k = 6 m/ημέρα.

Υποθέτω ότι η κατασκευή του διαφράγματος δεν θα αλλάξει σημαντικά τη φυσική κίνηση του υπόγειου νερού. Από το χάρτη της περιοχής (βλέπε επόμενη σελίδα) βρίσκω την κλίση του υδραυλικού φορτίου στην περιοχή που θα κατασκευαστεί το διάφραγμα

i = 0,006
= 6ft (διαφορά μεταξύ ισοϋψών) /1000ft (μήκος μετρημένο από το χάρτη με τη βοήθεια της κλίμακας)

$$\bar{v} = \frac{ki}{n} = \frac{6\frac{m}{\eta\mu} \times 0{,}006}{0{,}35} = 0{,}1\frac{m}{\eta\mu}$$

• Μετά πρέπει να βρώ τον <u>απαιτούμενο χρόνο παραμονής του ρύπου</u> μέσα στο διάφραγμα (δηλ. *πόσο πρέπει να μείνει* ο ρύπος στο διάφραγμα για να αντιδράσει με τους προβλεπόμενους ρυθμούς)

Θα θεωρήσω ότι η αντίδραση μπορεί να περιγραφεί σαν υποβάθμιση πρώτης τάξης

$$\frac{dC}{dt} = -\lambda C \rightarrow \int_{C_0}^{C} \frac{dC}{C} = -\lambda \int_{t=0}^{t} dt \rightarrow \ln\frac{C}{C_0} = -\lambda t$$

Όπου C_0 είναι η αρχική συγκέντρωση και λ είναι η σταθερά γραμμικής διάσπασης. Ορίζουμε σαν χρόνο ημιζωής (το χρόνο δηλαδή που απαιτείται για να μειωθεί η συγκέντρωση στο μισό, $C/C_0 = 1/2$): $t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$

Από πειράματα που περιγράφονται στη βιβλιογραφία βρίσκουμε $t_{1/2}$ = 3 h για την αντίδραση του τριχλωροαιθένιου με το σίδηρο μηδενικού σθένους. Άρα η σταθερά γραμμικής διάσπασης είναι λ = ln2 / 3 = 0.231 h^{-1}

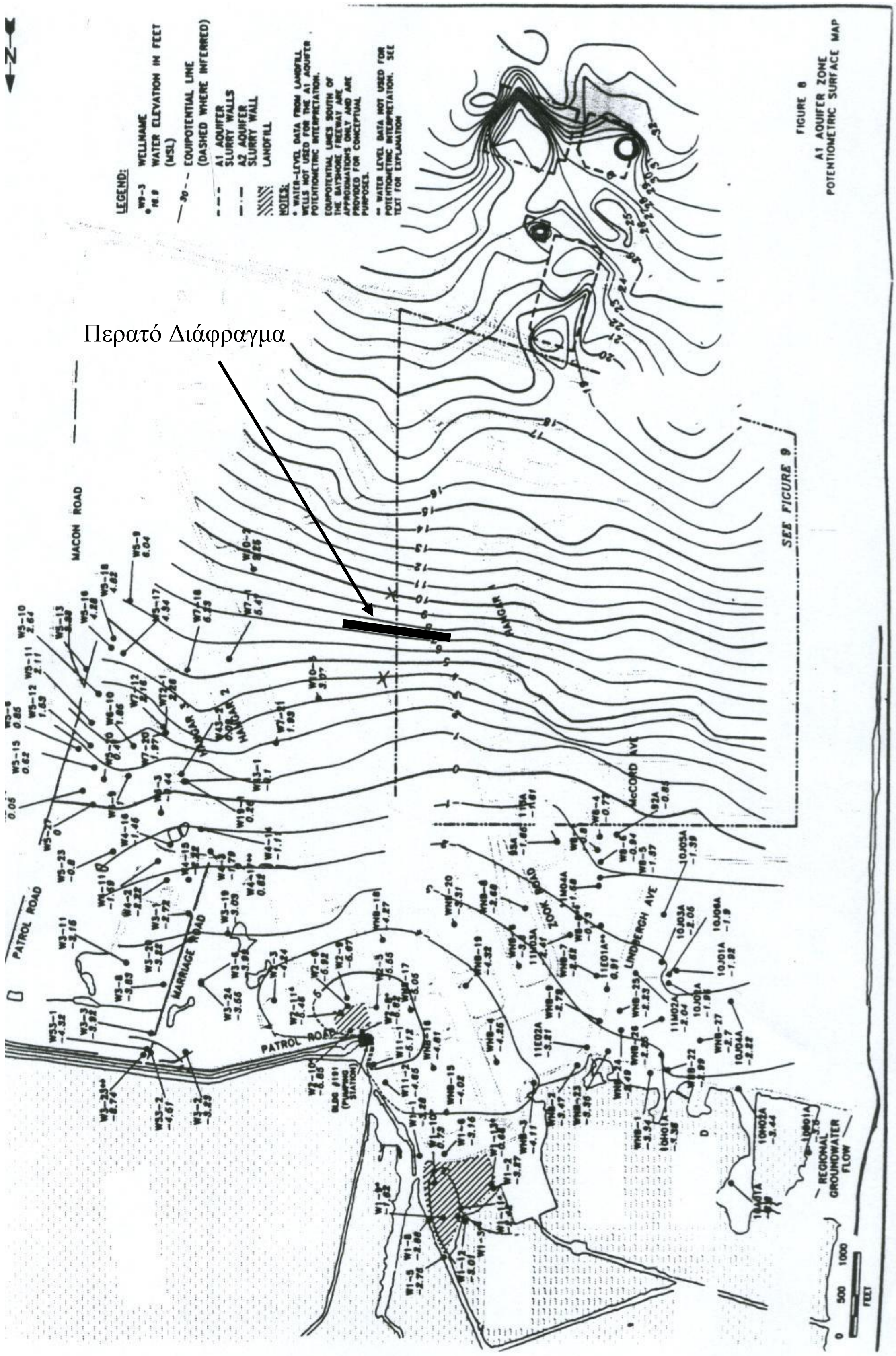
Αρχική συγκέντρωση = 2.000 μg/lt

Επιθυμητή συγκέντρωση = 5 μg/lt

ln 5 / 2000 = - λ t → - 5,99 = -0,231 h^{-1} t → <u>t_π = 25,9 h</u>

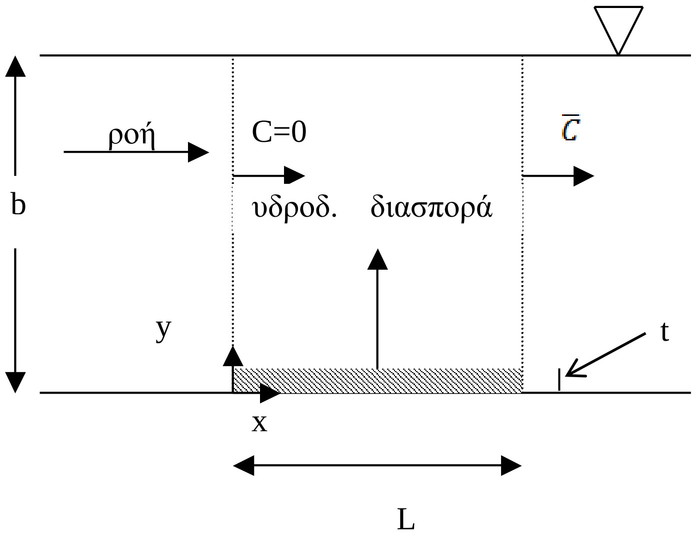
• Τέλος υπολογίζω το <u>ελάχιστο πάχος διαφράγματος</u> για τον απαιτούμενο χρόνο παραμονής

$$\bar{v} = \frac{L}{t} \rightarrow L_{\min} = \bar{v} \times t_\pi = 0{,}1\frac{m}{\eta\mu} \times \frac{25{,}9h}{24h/\eta\mu} = 0{,}11m$$


Περατό Διάφραγμα
FIGURE 8
A1 AQUIFER ZONE
POTENTIOMETRIC SURFACE MAP
LEGEND:
WELLNAME
WATER ELEVATION IN FEET (MSL)
EQUIPOTENTIAL LINE (DASHED WHERE INFERRED)
A1 AQUIFER SLURRY WALLS
A2 AQUIFER SLURRY WALL
LANDFILL
SEE FIGURE 9
MACON ROAD
PATROL ROAD
MARRIAGE ROAD
HANGAR
McCORD AVE
ZOOK ROAD
LINDBERGH AVE
REGIONAL GROUNDWATER FLOW
0 500 1000
FEET

3. Πόσος χρόνος απαιτείται για να διαλυθεί μια κηλίδα NAPL;

Θεωρώ μια κηλίδα DNAPL μήκους L = 2m και πάχους t = 5cm που έχει ακινητοποιηθεί πάνω από ένα χαμηλής περατότητας στρώμα σε βάθος b=5m. Η κηλίδα αποτελεί μια σταθερή πηγή $C(x,y=0) = S$, όπου S είναι η διαλυτότητα του ρύπου.



Για να μπορέσω να βρω αναλυτική λύση, θα υποθέσω συνθήκες μόνιμης μεταφοράς, με το σκεπτικό ότι η κηλίδα βρίσκεται εκεί για κάποιο σημαντικό χρονικό διάστημα. Επίσης θα υποθέσω ότι η κύρια συνιστώσα μεταφοράς στον άξονα x είναι η μεταγωγή, ενώ στον άξονα y είναι η υδροδυναμική διασπορά. Με αυτές τις παραδοχές, η εξίσωση διδιάστατης μεταφοράς γίνεται:

$$D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \bar{v}_x \frac{\partial C}{\partial x} = 0$$

Με την προϋπόθεση ότι έχουμε καθαρό υδροφορέα στα ανάντη της πηγής καθώς και σε άπειρη απόσταση από αυτήν, βρίσκεται λύση $C(L,y)$, δηλ. για το σημείο $x = L$. Ολοκληρώνοντας την $C(L,y)$ από $y = 0$ ως $y = b$ και διαιρώντας με b, βρίσκουμε τη μέση τιμή της συγκέντρωσης για $x = L$ από την έκφραση:

$$\boxed{\frac{\overline{C}(L,b)}{S} = \frac{1-e^{-w^2}}{w\sqrt{\pi}} + erfc(w), \qquad w = \frac{b}{2\sqrt{D_y L / \bar{v}_x}}, \qquad D_y = D_e + \alpha_T \bar{v}_x}$$

Πώς θα υπολογίσω πότε θα εξαφανιστεί η κηλίδα;
Α. Θα υπολογίσω μέση συγκέντρωση που εξέρχεται από τη ρυπασμένη περιοχή (μάζα ρύπου /όγκο νερού).
Β. Θα υπολογίσω ρυθμό απομάκρυνσης (μάζα ρύπου/χρόνο).
Γ. Ξέρω τη συνολική μάζα της κηλίδας.
Δ. Βρίσκω χρόνο = (μάζα) / (ρυθμός απομάκρυνσης)

Υπολογισμός για τις εξής τιμές:

Ταχύτητα Darcy v_x=0.001 m/d, πορώδες n = 0.4, συντελεστής διάχυσης στο έδαφος D_e=0.233 x10^{-4} m^2/d. Έστω ότι διέρρευσε τριχλωροαιθένιο (TCE), άρα S=1100 mg/l.

Υπολογίζω D_y

$$\bar{v}_x = \frac{0.001}{0.4} = 0.0025 m/d$$

Υποθέτω $a_L = 0.2m,\qquad \frac{a_T}{a_L} = \frac{1}{20}$

$$D_y = 0.233\times10^{-4} + \frac{0.2}{20}\times0.0025 \rightarrow D_y = 0.0000483 m^2/d$$

$$w = \frac{5}{2\sqrt{\frac{0.0000483\times2}{0.0025}}} = 12.72$$

A. Μέση συγκέντρωση στη διατομή κατάντη της κηλίδας

$$\overline{C} = S\times\left[\frac{1-e^{-w^2}}{w\sqrt{\pi}} + erfc(w)\right] = 49mg/l = 49g/m^3$$

Παροχή νερού (όγκος/χρόνο) που ρέει στη ρυπασμένη ζώνη (για μοναδιαία τρίτη διάσταση):

Q=vA=0.001m/d x (5m x 1m) = 0.005m^3/d

B. Μάζα TCE στον πιο πάνω όγκο νερού = ρυθμός απομάκρυνσης μάζας (ροή μάζας x επιφάνεια διατομής ρυπασμένου υδροφορέα = J x A = Q x C)

Q x C = 0.005 m^3/d x 49 g/m^3 = 0.244 g/d

Γ. Μάζα TCE στην κηλίδα = [όγκος πόρων] x [πυκνότητα TCE]

M_{TCE} = [2m x 1m x 0.05 m x 0.4] x [1460 kg/m^3] = 58.4 kg

Δ. Απαιτούμενος χρόνος για να διαλυθεί η κηλίδα
= M_{TCE} / (Q x C)
= 58400 g / 0.244 g/d = **655 χρόνια!!**