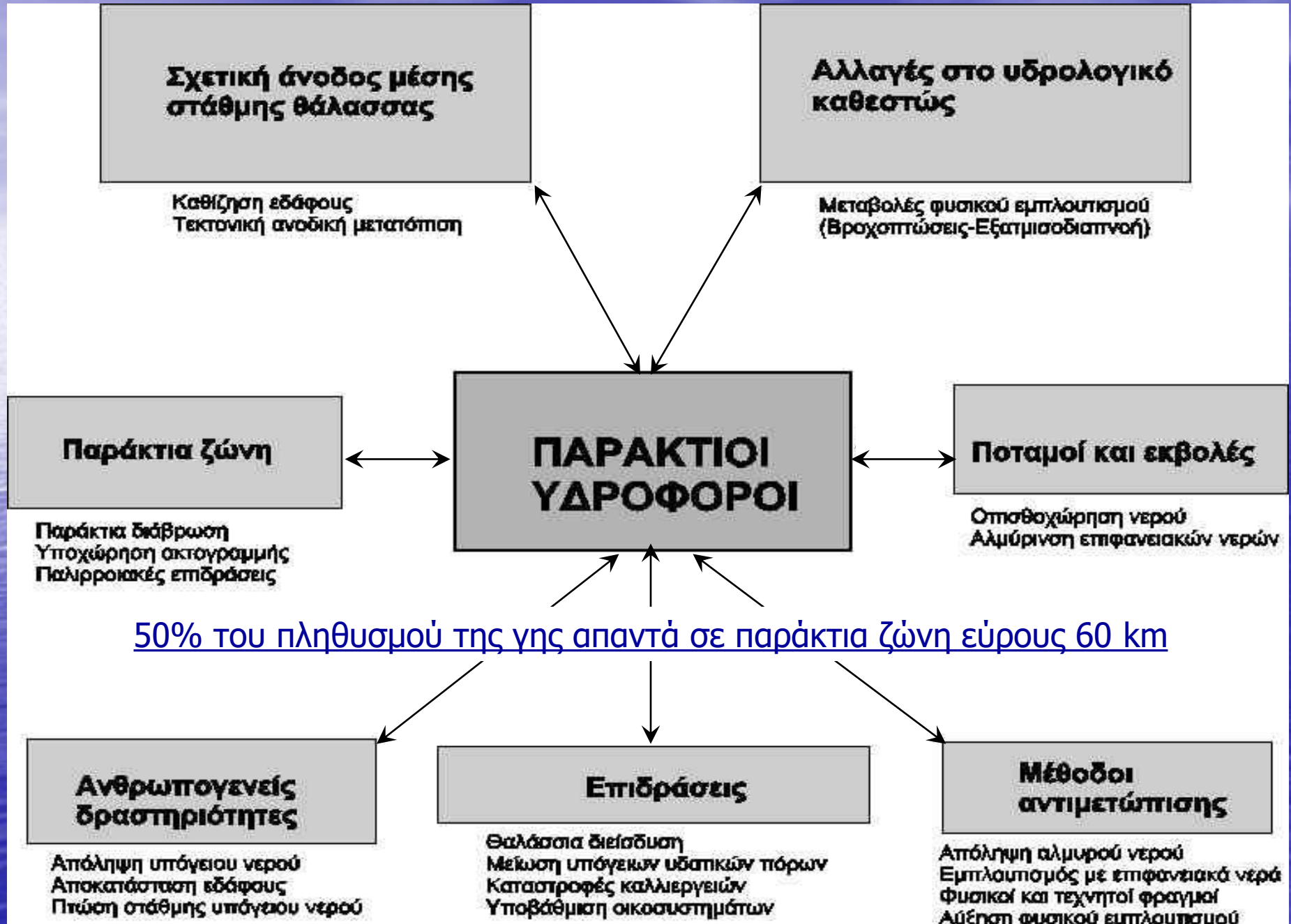


**ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ  
ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΥΠΟΓΕΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

# ΠΑΡΑΚΤΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΟΙ

(από Oude Essink, 2001)



# ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΙΤΙΕΣ ΑΛΜΥΡΙΣΗΣ

- Η παρουσία σαλαμούρας, ιδιαίτερα στα πεδία πετρελαίου,
- Η παρουσία γύψου ή ανυδρίτη ή ορυκτού αλατιού στον υδροφόρο,
- Η έντονη άρδευση (που συνεπάγεται και έντονη εξατμισοδιαπνοή),
- Η παρουσία συγγενετικού νερού σε μικρό βάθος,

...και η ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ!

# ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΙΤΙΕΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

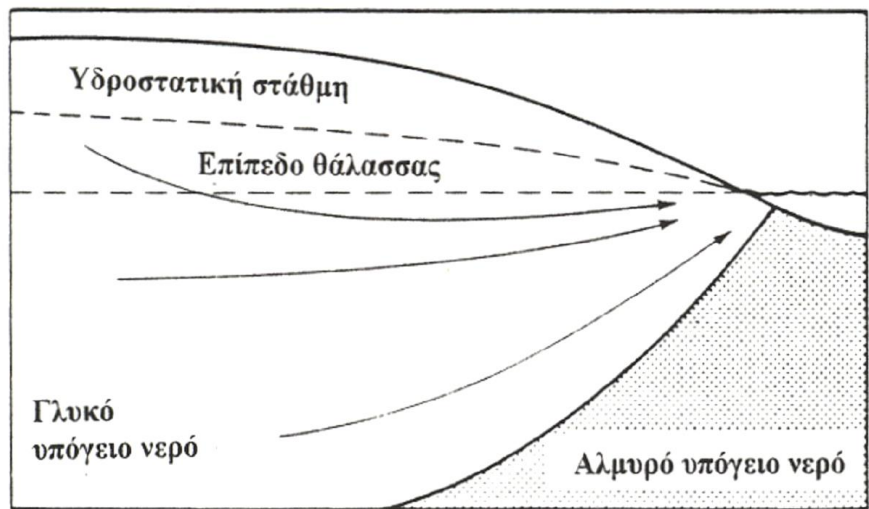
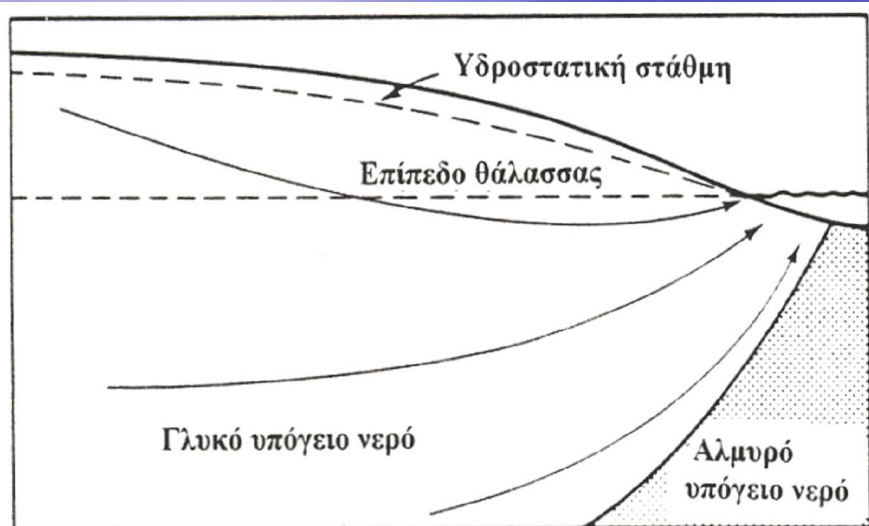
- Μείωση ροής σε εκβολές ποταμών
- Τεχνητά κανάλια
- Αλλαγές πρότυπου ροής λόγω κλιματικών συνθηκών
- Παρεμβάσεις στον άνω ρου των ποταμών
- Δράση της παλίρροιας

# ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

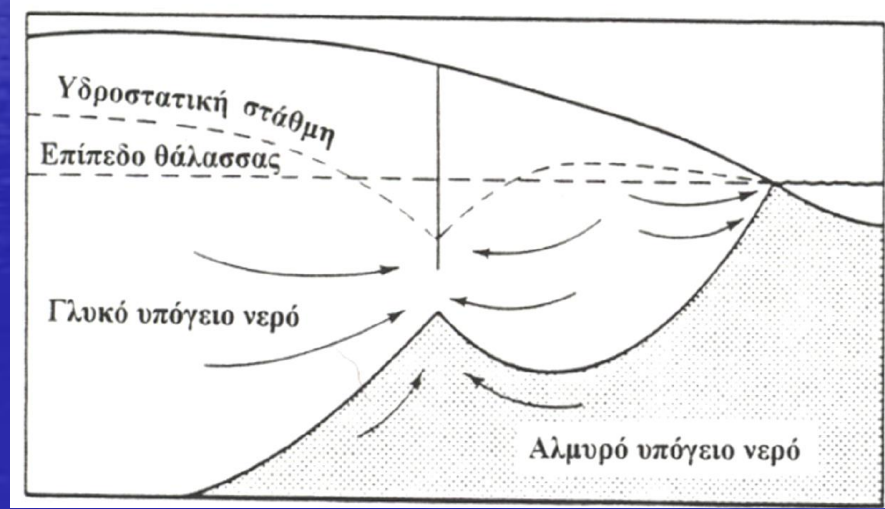
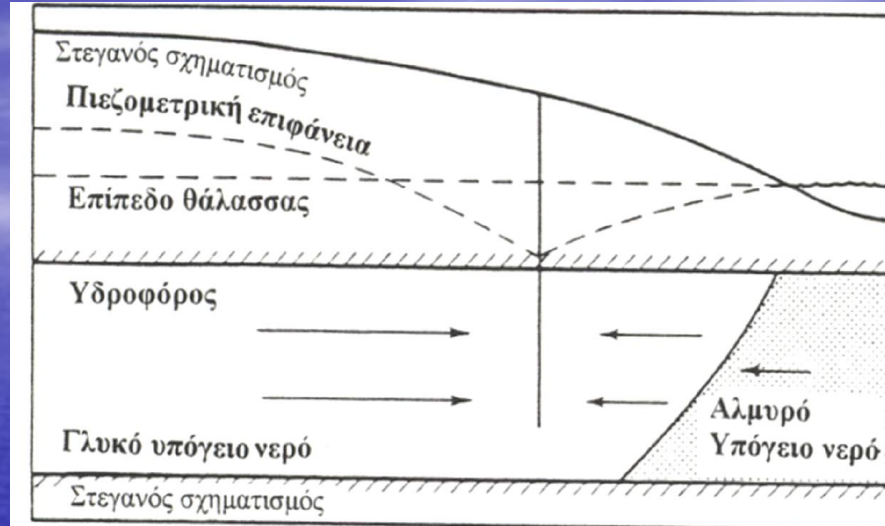
- Υδραυλική κλίση προς τη θάλασσα η οποία ουσιαστικά αποτελεί αποδέκτη του περισσεύματος σε γλυκό νερό του υδροφόρου.
- Ζώνη επαφής μεταξύ των δύο υγρών (γλυκού-αλμυρού νερού) – ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ
- Ειδικό βάρος θαλασσινού νερού  $>$  Ειδικό βάρος γλυκού νερού ( $\gamma_s > \gamma_f$ )

# ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ

## ΠΑΘΗΤΙΚΗ



## ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΗ

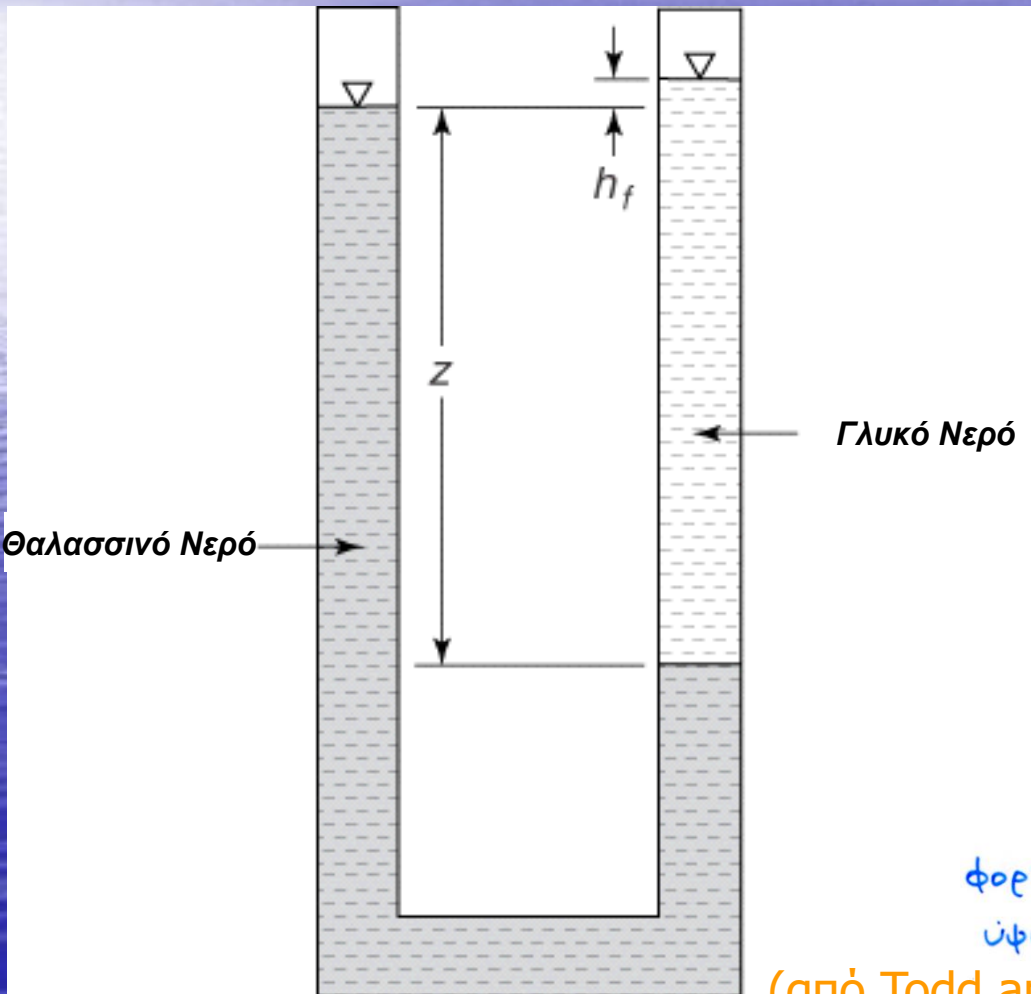


ΣΗΜΑΝΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΠΟΥ ΤΙΣ ΚΑΘΟΡΙΖΕΙ: ...ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΚΛΙΣΗ

(από Fetter, 2001)

# Υδροστατική ισορροπία μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού σε U-tube

υδροστατική πίεση θαλασσινού νερού = υδροστατική πίεση γλυκού νερού



$$\rho_s g z = \rho_f (z + h) g$$

Όπου:

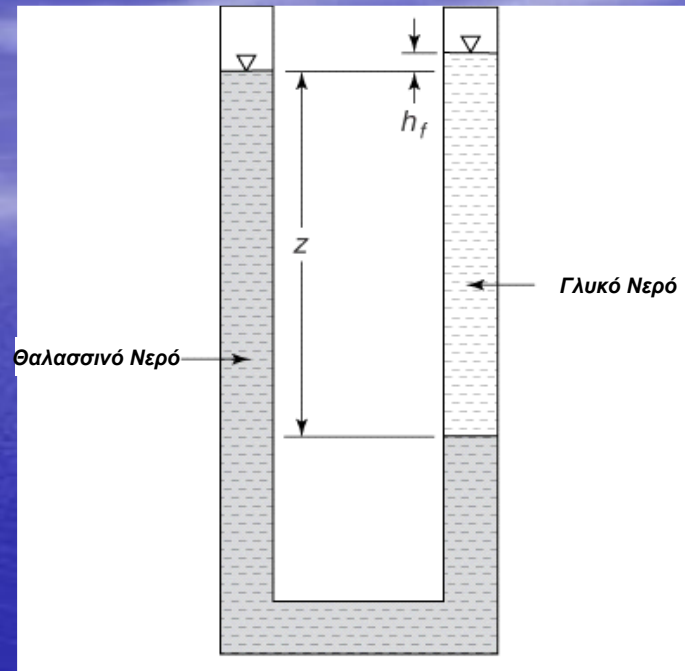
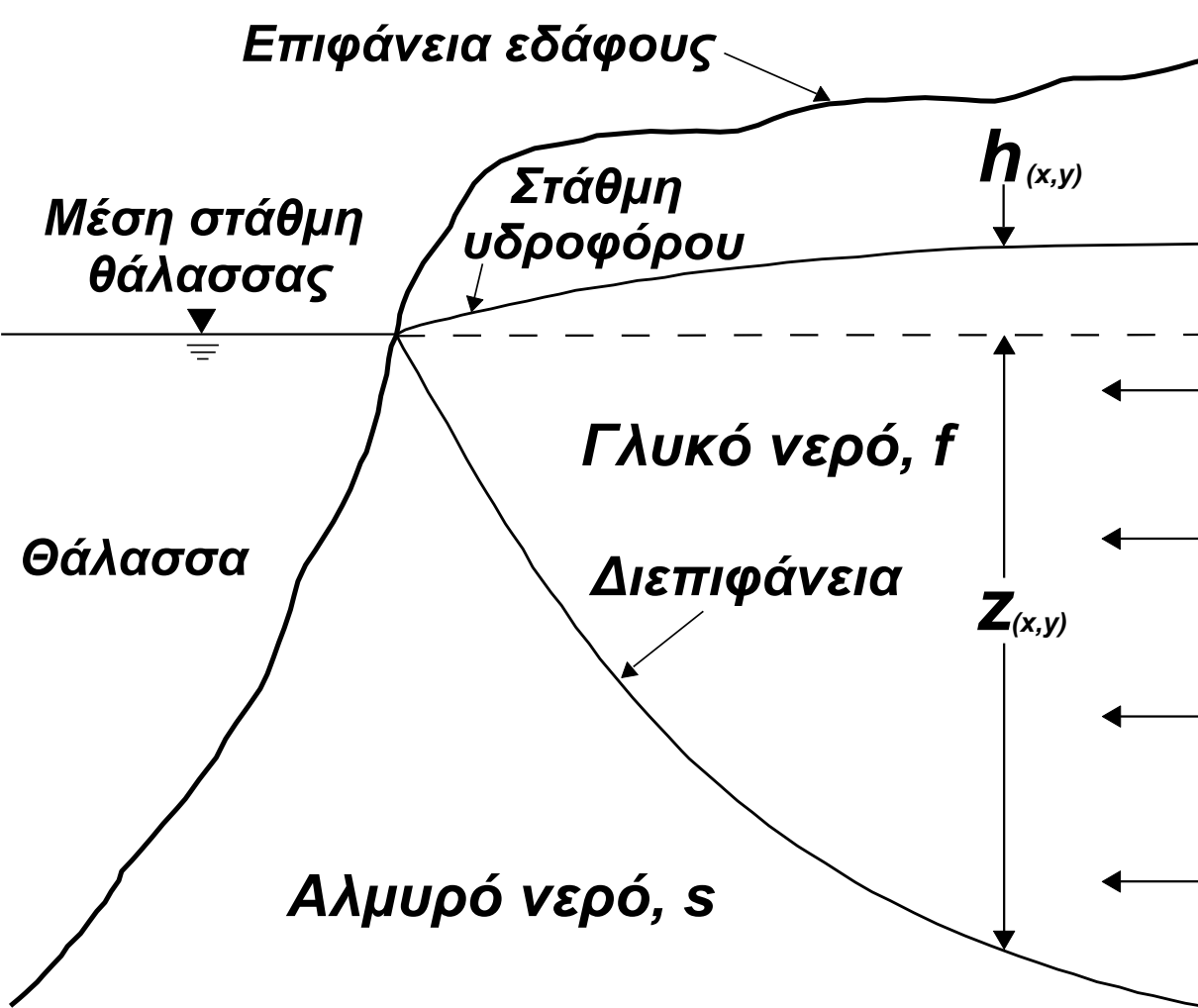
$\rho_s$  : η πυκνότητα του αλμυρού νερού

$\rho_f$  : η πυκνότητα του γλυκού νερού

$h_f, z$  : φαίνονται στο σχήμα

φορτίο πίεσης :  $\frac{p}{\gamma_w}$  (pressure head)  
ύψος πίεσης  $\hookrightarrow$  ειδικό βάρος νερού ( $1 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$ )  
~ ( $\rho g$ )

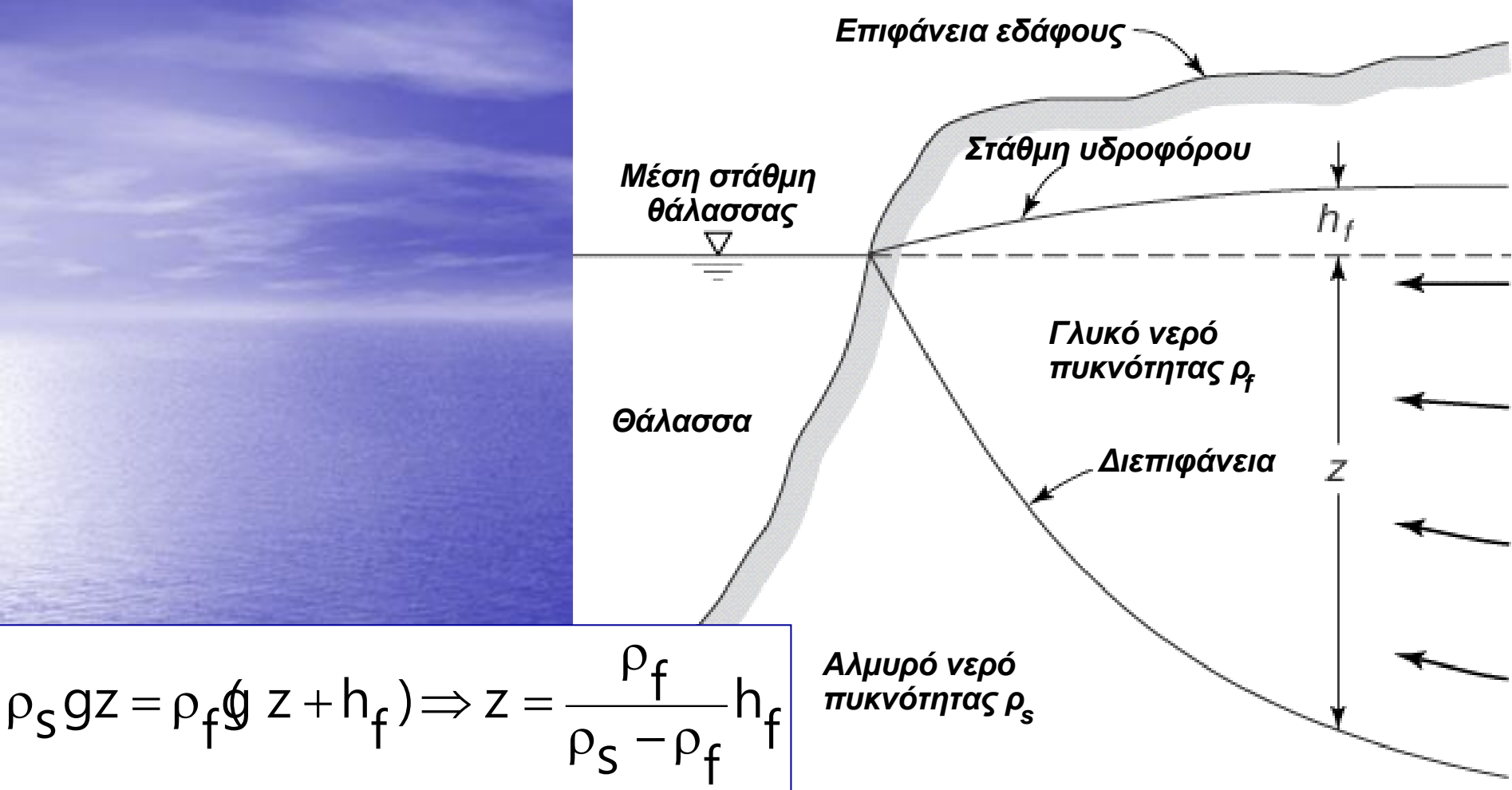
(από Todd and Mays, 2005)



(από Todd and Mays, 2005)

Μοντέλο της θεωρίας Ghyben-Herzberg για τη διεπιφάνεια γλυκού-αλμυρού νερού σε παράκτιο φρεάτιο υδροφόρο και σχηματική απλοποίηση της σχέσης σε σωλήνα U





- $z_{(x,y)}$  είναι το βάθος (m) της διεπιφάνειας κάτω από το θαλάσσιο επίπεδο στη θέση  $(x,y)$
- $h_{(x,y)}$  είναι η ανύψωση (m) της υδροστατικής στάθμης πάνω από το θαλάσσιο επίπεδο στο σημείο  $(x,y)$
- $\rho_f$  ( $\text{gr/cm}^3$ ) είναι η πυκνότητα του γλυκού υπόγειου νερού
- $\rho_s$  ( $\text{gr/cm}^3$ ) είναι η πυκνότητα του αλμυρού (θαλάσσιου) νερού

...γνωρίζοντας ότι:

- η πυκνότητα του γλυκού υπόγειου νερού  $\rho_f$  είναι  $1,00 \text{ gr/cm}^3$
- η πυκνότητα του αλμυρού (θαλασσινού) νερού  $\rho_s$  είναι  $1,025 \text{ gr/cm}^3$

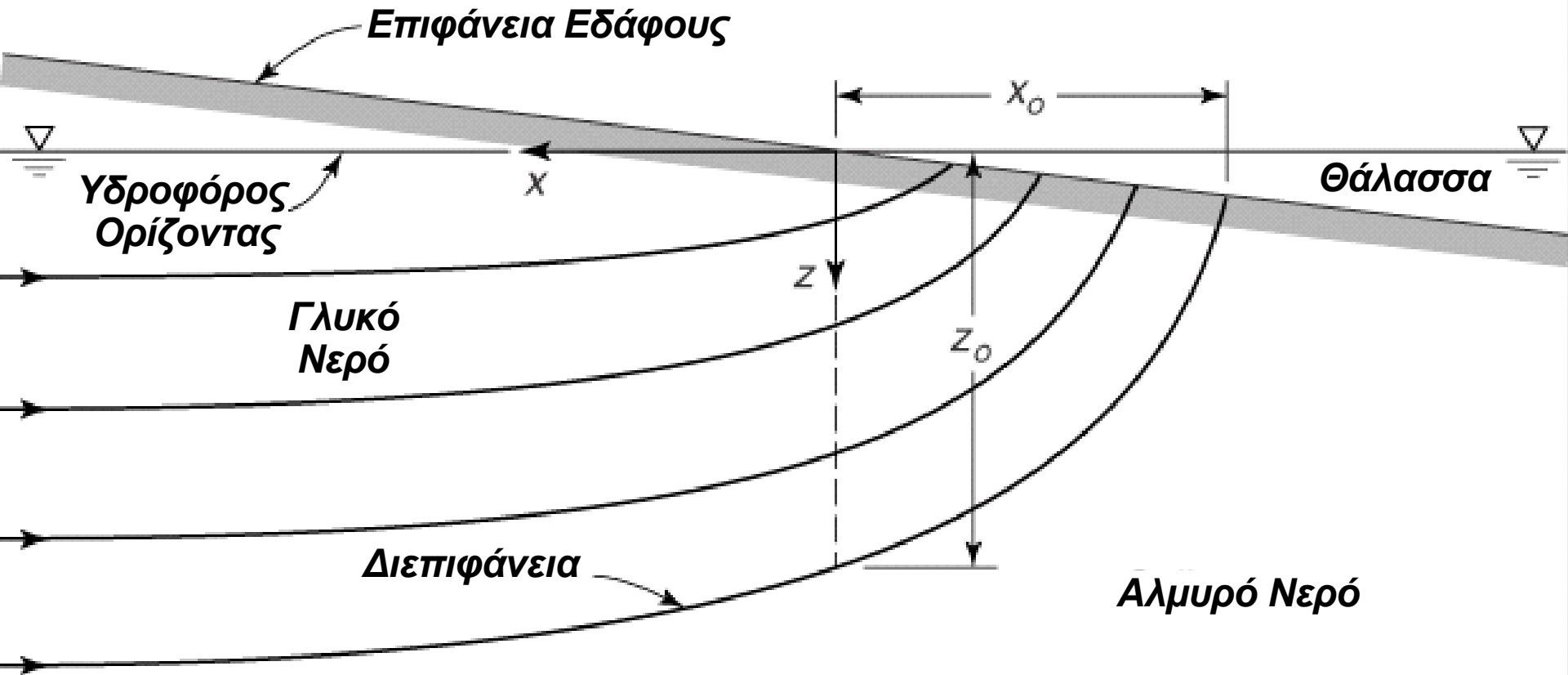
...τότε η προηγούμενη σχέση έχει ως εξής:

$$z_{(x,y)} = 40h_{(x,y)}$$

# ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ BADON-GHYBEN & HERZBERG

- ✓ ο υδροφόρος είναι ομοιογενής
- ✓ η υδροδυναμική διασπορά θεωρείται αμελητέα
- ✓ η ροή στον υδροφόρο είναι οριζόντια, ενώ η κατακόρυφη θεωρείται αμελητέα
- ✓ το θαλασσινό νερό θεωρείται στάσιμο (δηλ.  $q_s=0$ )

# ΣΧΗΜΑ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ



$$z^2 = \frac{2\rho q x}{\Delta\rho K} + \left( \frac{\rho q}{\Delta\rho K} \right)^2$$

(GLOVER)

$$h_f = \left( \frac{2\Delta\rho q x}{(\rho + \Delta\rho)K} \right)^{1/2}$$

$$z_0 = \frac{\rho q}{\Delta\rho K} \quad x_0 = \frac{\rho q}{2\Delta\rho K}$$

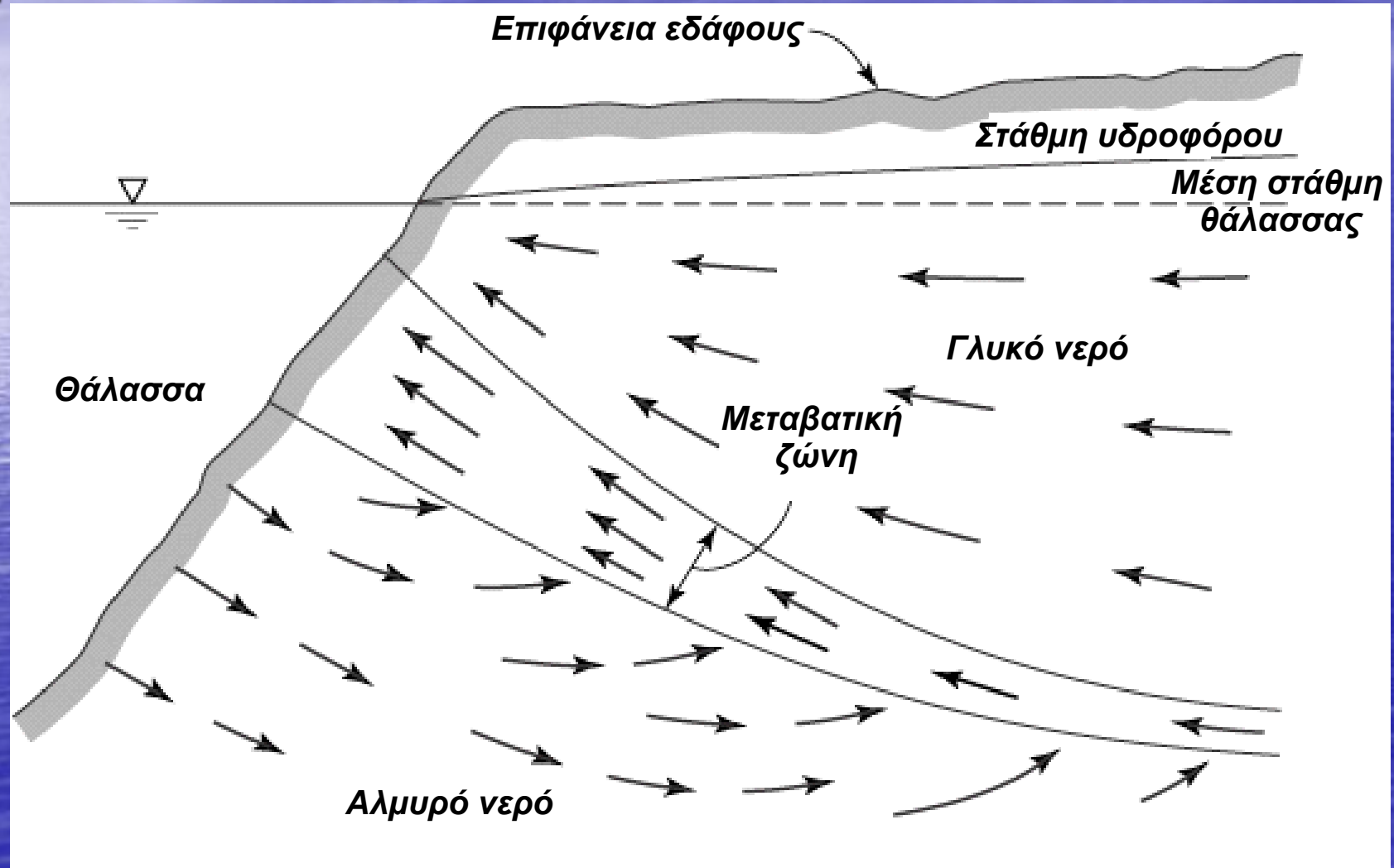
(από Todd and Mays, 2005)

# ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

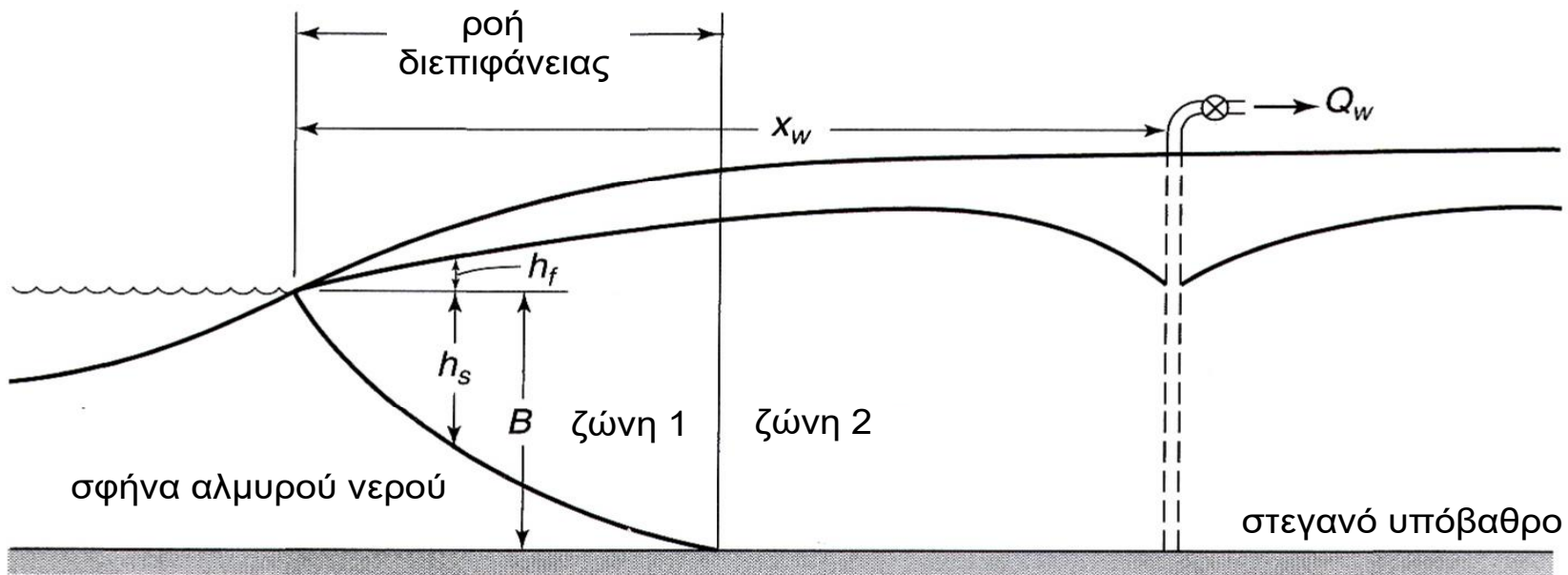
ΥΦΑΛΜΥΡΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ  
(TRANSITION ZONE ή  
ZONE OF TRANSITION)

... με καθορισμένο πάχος ( $\sim 1-100$  m)

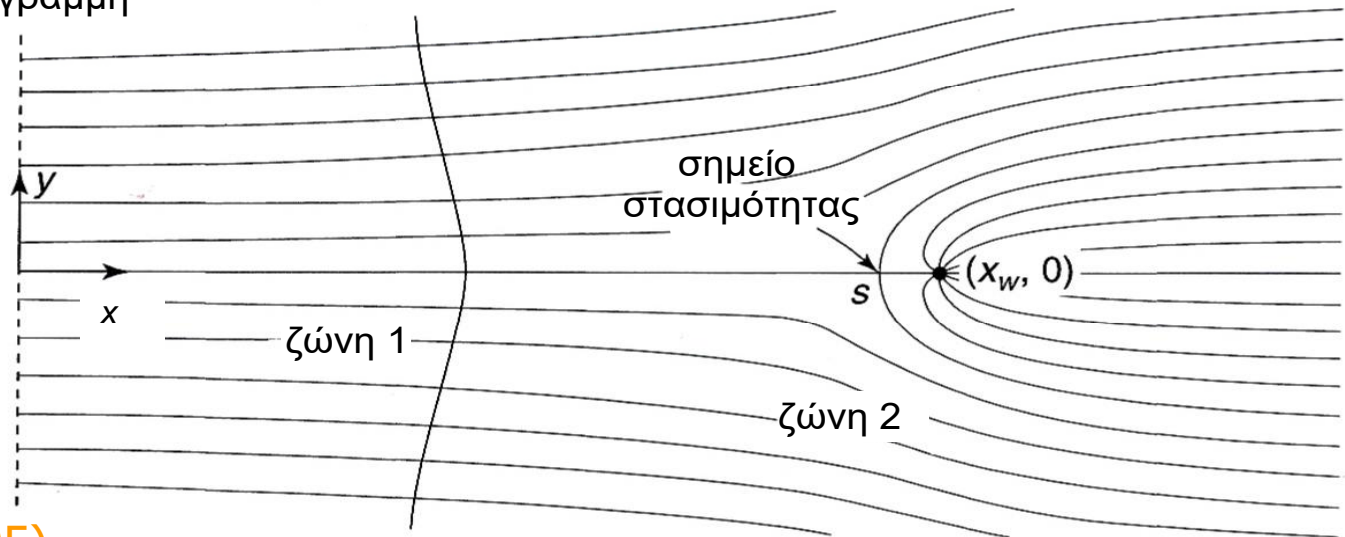
# Εγκάρσια τομή ελεύθερου παράκτιου υδροφόρου με τα πρότυπα ροής του γλυκού και αλμυρού νερού.

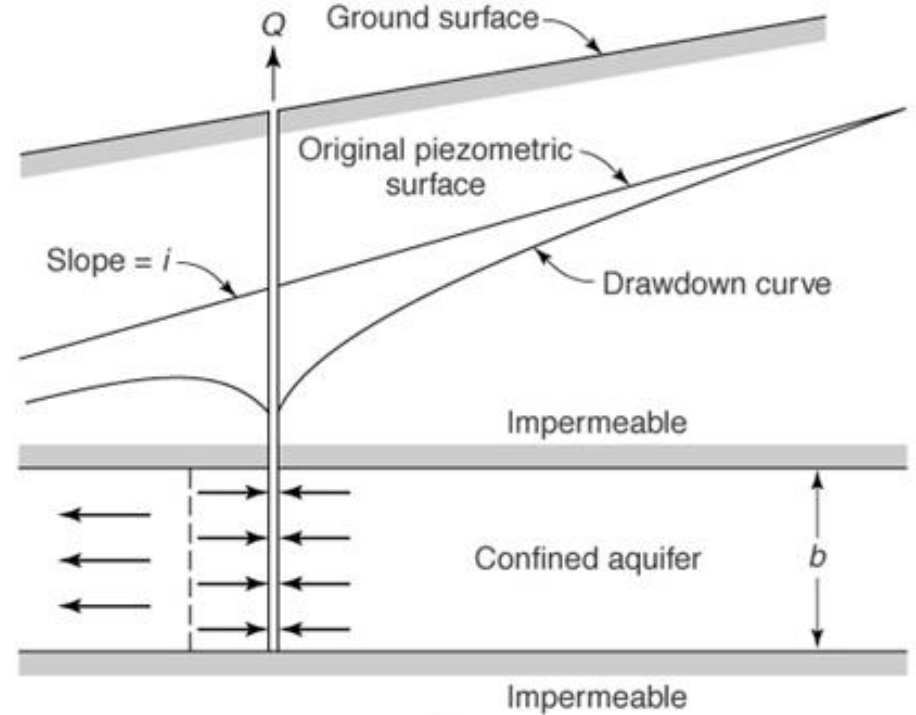
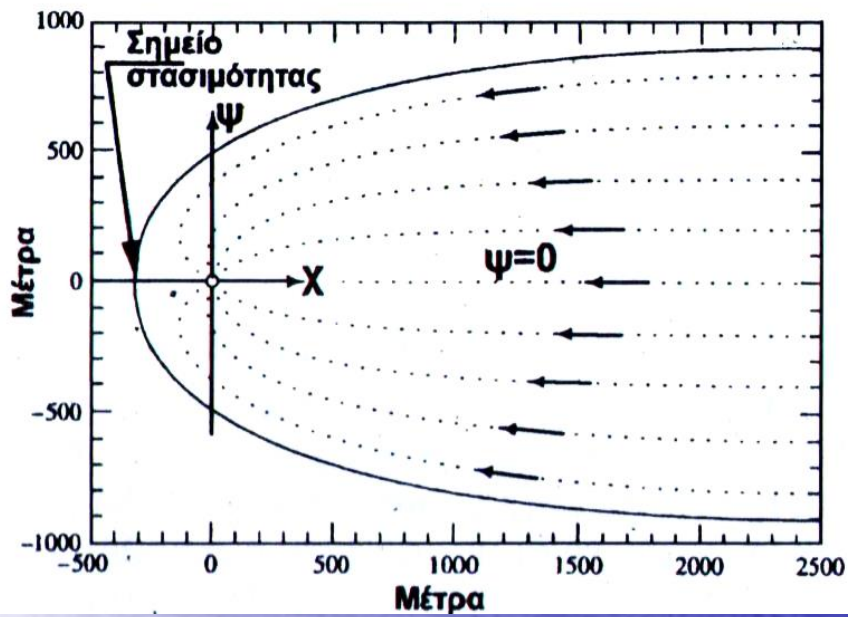


(από Todd and Mays, 2005)

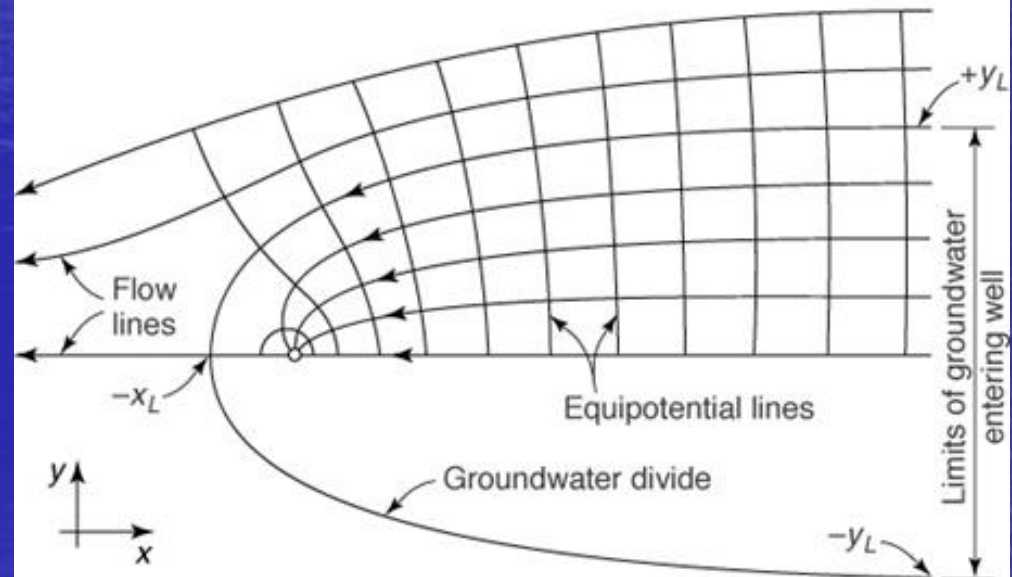


ακτογραμμή





(a)



(b)

Σημείο στασιμότητας και ζώνη ανάκτησης υδρογέτρησης (Καλλέργης, 2000, Todd and Mays, 2005)



υπολογισμός της θέσης του «ποδιού» της διεπιφάνειας (για σταθερές συνθήκες), σε ισότροπο ομοιογενή υδροφόρο με οριζόντιο αδιαπέρατο πυθμένα, όπου παρατηρείται οριζόντια ροή γλυκού νερού, καθόλου ροή στην υφάλμυρη ζώνη (ζώνη γλυκού – αλμυρού νερού)

$$\frac{1}{2}(1 + \delta) \frac{B^2}{\delta^2} = \frac{Q'_{0x}}{K} x + \frac{Q_w}{4\pi K} \ln \left[ \frac{(x - x_w)^2 + y^2}{(x + x_w)^2 + y^2} \right] \quad (\text{STRACK})$$

όπου  $\delta = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f}$  και

$B$ : το βάθος του αδιαπέρατου πυθμένα του υδροφόρου σε σχέση με τη μέση στάθμη θάλασσας

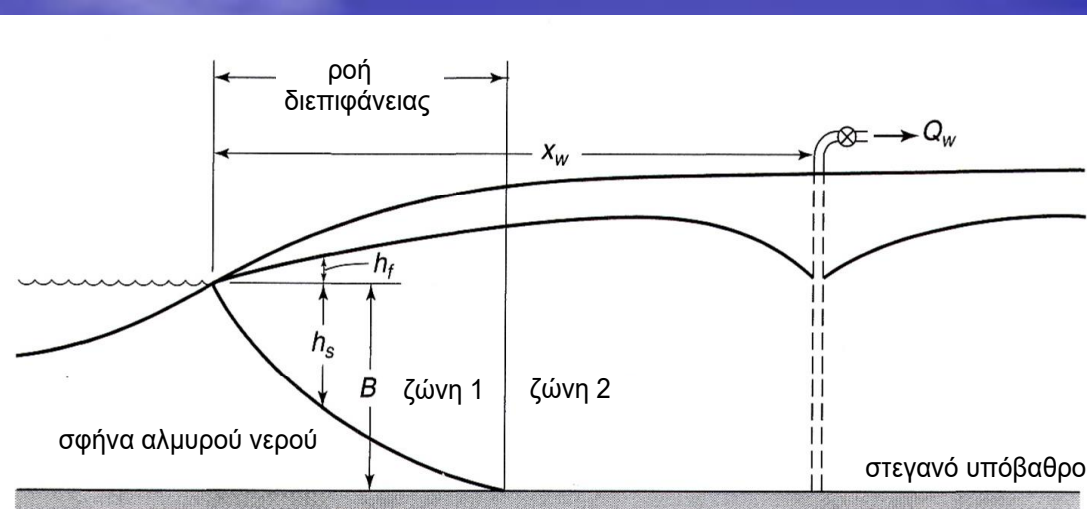
$Q'_{0x}$ : ροή γλυκού νερού ανά μονάδα μήκους ακτογραμμής

$Q_w$ : σταθερός ρυθμός άντλησης της γεώτρησης

$K$ : υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου

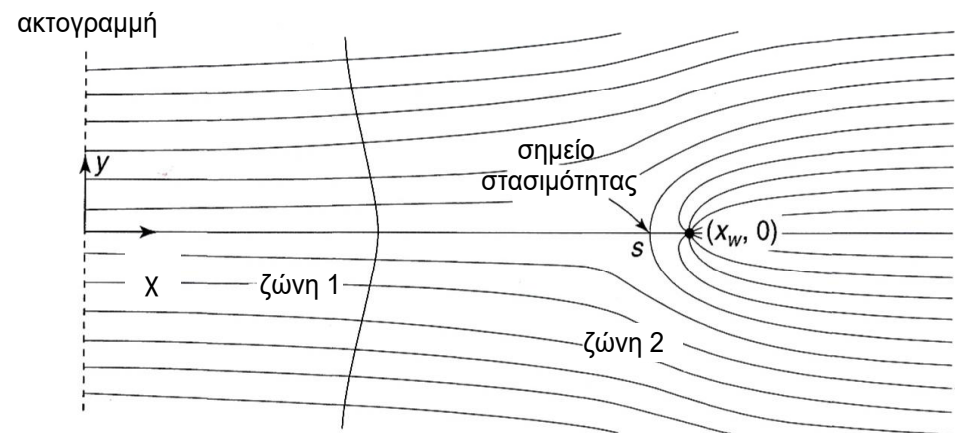
$x_w$ : απόσταση μεταξύ γεώτρησης και ακτογραμμής

$(x, y)$ :  $x$ - $y$  συντεταγμένες του «ποδιού» της διεπιφάνειας.



Για το σημείο στασιμότητας (stagnation point)

$$x_s = x_w \left[ 1 - \frac{Q_w}{\pi Q'_{0,x} x_w} \right]^{1/2}, \quad y_s = 0$$



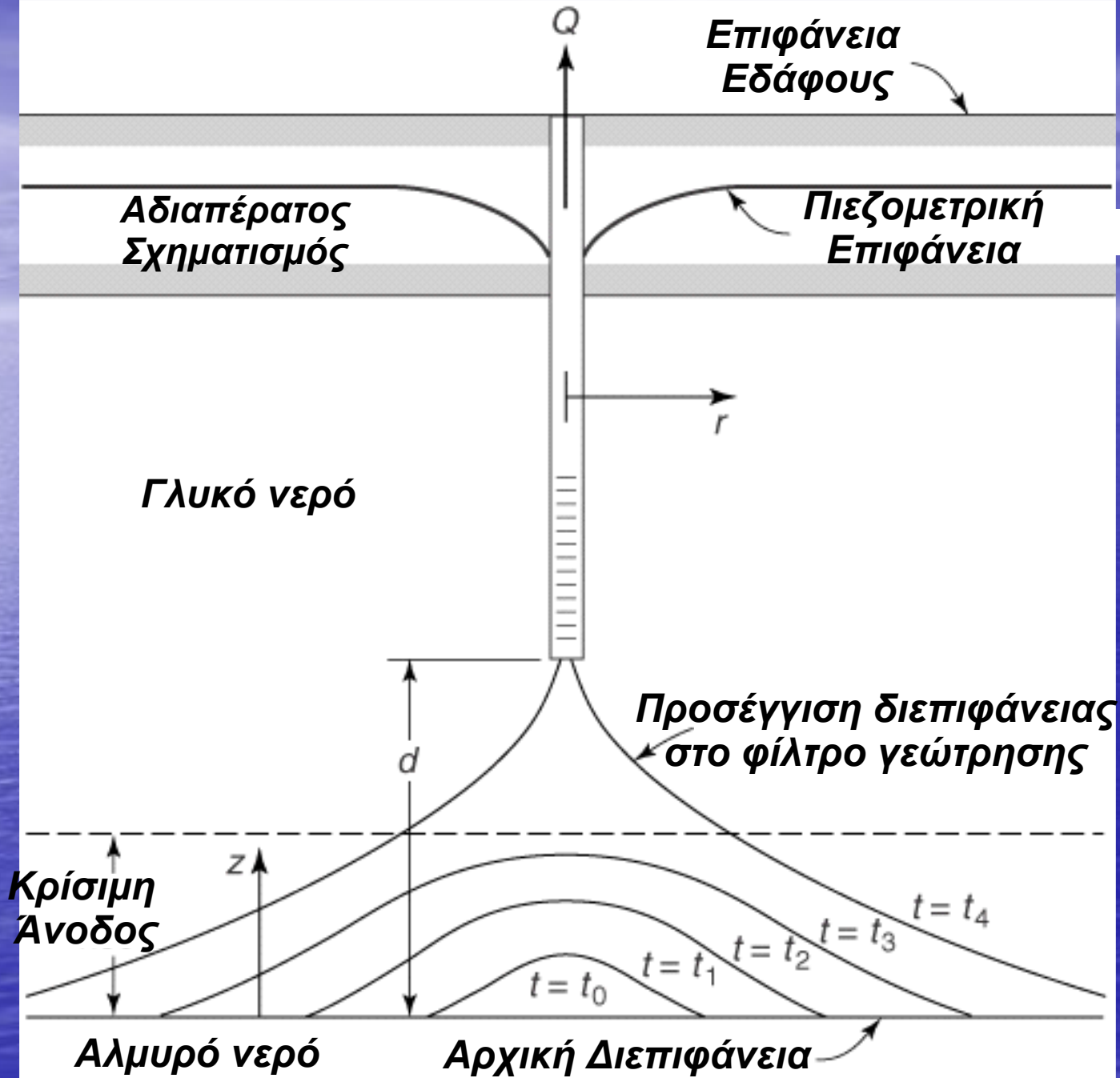
το «πόδι» της διεπιφάνειας διέρχεται μέσω του σημείου στασιμότητας ↓

κρίσιμος ρυθμό άντλησης,  $Q_w$ , για ελεύθερους υδροφόρους

$$\lambda = 2 \left( 1 - \frac{\mu}{\pi} \right)^{1/2} + \frac{\mu}{\pi} \ln \left[ \frac{1 - (1 - \mu / \pi)^{1/2}}{1 + (1 - \mu / \pi)^{1/2}} \right]$$

$$\lambda = \left( \frac{KB^2}{Q'_{0x} x_w} \right) \left( \frac{1 + \delta}{\delta^2} \right)$$

$$\mu = \frac{Q_w}{Q'_{0x} x_w}$$



(από Todd and Mays, 2005)

Αναλυτική επίλυση της ανόδου της διεπιφάνειας  
βασισμένη στην υπόθεση Dupuit και στη σχέση  
Ghyben - Herzberg

$$z = \frac{Q}{2\pi d K (\Delta\rho / \rho_f)}$$

...όπου

$$\Delta\rho = \rho_s - \rho_f$$

Ο Glover εισήγαγε τον όρο της κρίσιμης ανόδου της διεπιφάνειας σύμφωνα με τον οποίο:

$$Q_{\max} \leq \pi d^2 K (\Delta\rho / \rho_f)$$

...για

$$0,3 \leq z / d \leq 0,5$$

# ΙΟΝΤΙΚΗ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ



# ΓΕΝΙΚΑ ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

- ▶ Θαλασσινό νερό: TDS 35.000 mg/L
- ▶ Ιόντα χλωρίου και νατρίου: 84%
- ▶ Διαφοροποιήσεις στη σύσταση των νερών:
  - ☞ Ατλαντικός Ωκεανός: 36.900 mg/L
  - ☞ Ειρηνικός Ωκεανός: 33.600 mg/L
  - ☞ Μεσόγειος και Ερυθρά θάλασσα: 40.000 mg/L

# ΤΥΠΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΙΟΝΤΩΝ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ

ΧΗΜΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)
Cl	19.000	54
Na	10.500	30
SO <sub>4</sub>	2.700	8
Mg	1.350	4
Ca	410	1
K	390	1
HCO <sub>3</sub>	142	0.4
Br	67	0.2
Sr	8	0.02
SiO <sub>2</sub>	6.4	0.02
B	4.5	0.01
F	1.3	0.003
I	0.06	0.00017

(από Goldberg et al., 1971, Hem, 1985)

# ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΩΝ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ (mg/L)

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΝΕΡΟΥ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ
Ολιγοαλκαλικό	0 – 5
Ολιγοαλκαλικό-γλυκό	5 – 30
Γλυκό	30 – 150
Γλυκό-υφάλμυρο	150 – 300
Υφάλμυρο	300 – 1000
Υφάλμυρο-αλμυρό	1000 – 10.000
Αλμυρό	10.000 – 20.000
Υπεραλμυρό ή άλμη	≥ 20.000



# ΑΝΤΑΛΛΑΓΗ ΙΟΝΤΩΝ

- ▶ Αλληλεπίδραση εδάφους και χημικών συστατικών του νερού → ...ΡΟΦΗΣΗ
- ▶ Ρόφηση ορίζεται ως η μεταβολή της συγκέντρωσης ενός χημικού συστατικού στερεού υλικού, ως αποτέλεσμα της μεταφοράς μάζας μεταξύ διαλύματος και στερεού υλικού
- ▶ Τα κυριότερα είδη ρόφησης είναι:
  - ✦ Η προσρόφηση,
  - ✦ Η απορρόφηση και,
  - ✦ Η ανταλλαγή ιόντων

# Διαδικασίες ρόφησης

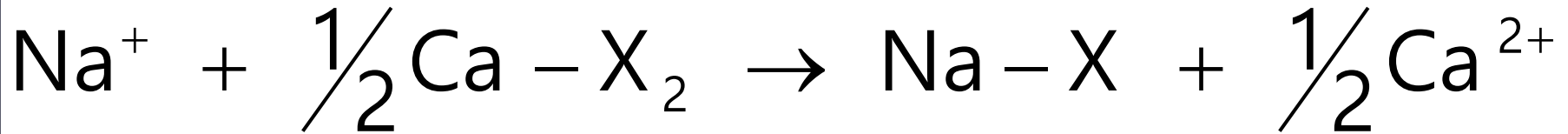
(από Appelo and Postma, 1993)

- ▶ **Προσρόφηση (Adsorption):** Το χημικό συστατικό προσκολλάται στην επιφάνεια του στερεού υλικού,
- ▶ **Απορρόφηση (Absorption):** Το χημικό συστατικό εισχωρεί στο στερεό υλικό,
- ▶ **Ιοντική ανταλλαγή (Ion exchange):** Το χημικό συστατικό αντικαθίσταται από ένα άλλο στην επιφάνεια του στερεού υλικού.



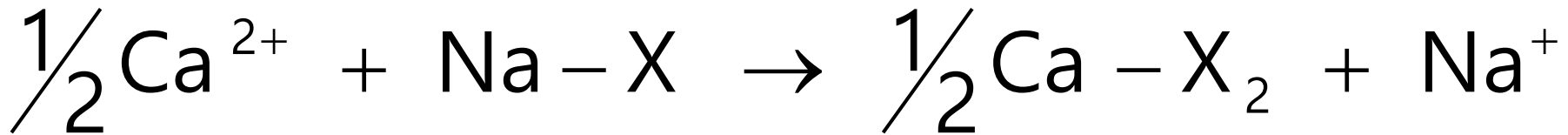
## ΑΝΤΑΛΛΑΓΗ ΙΟΝΤΩΝ

► Κατά τη διάρκεια της θαλάσσιας διείσδυσης:



απελευθέρωση  $\text{Ca}^{2+}$ , μεταβολή χημικού τύπου νερού  $\text{NaCl} \rightarrow \text{CaCl}_2$

► Κατά τη διάρκεια εμπλουτισμού του υδροφόρου:



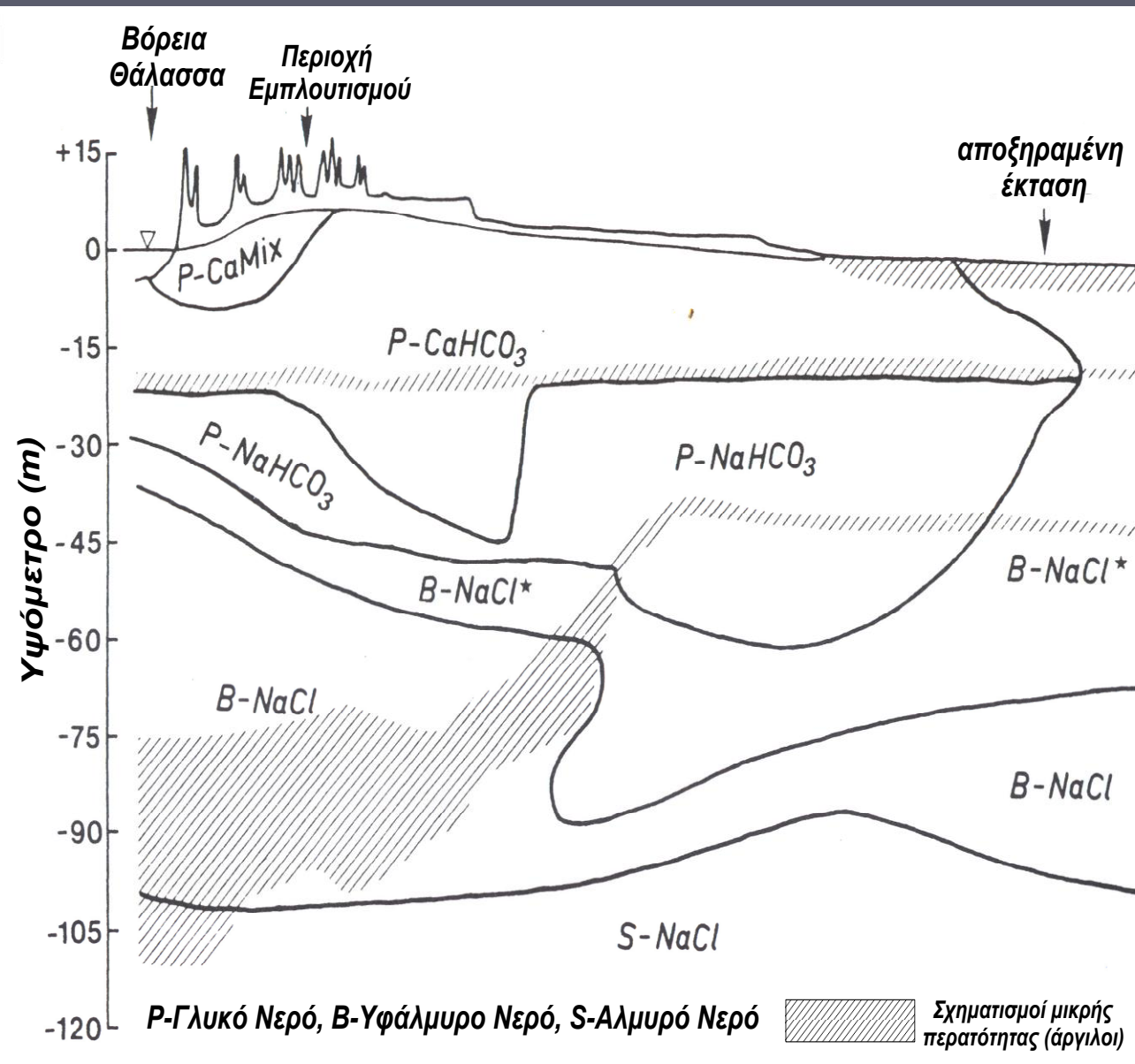
απελευθέρωση  $\text{Na}^+$ , μεταβολή χημικού τύπου νερού σε  $\text{NaHCO}_3$

επικρατέστερα ιόντα

- στο γλυκό νερό παράκτιων υδροφόρων:  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{HCO}_3^-$  ( $\text{CO}_2$  από το ριζικό σύστημα και τη διάλυση του ασβεστίτη) - [οξυανθρακικό ασβεστούχο νερό]
- στο θαλασσινό νερό:  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  - [χλωριονατριούχο νερό]

X: ιοντοαντάλλακτης

# ... μερικά παραδείγματα



Διατομή σε παράκτιες ολλανδικές θίνες (περιοχή εμπλουτισμού) κατά τη διάρκεια εμπλουτισμού του υδροφόρου και ως εκ τούτου της απόπλυσης του αλμυρού από γλυκό νερό

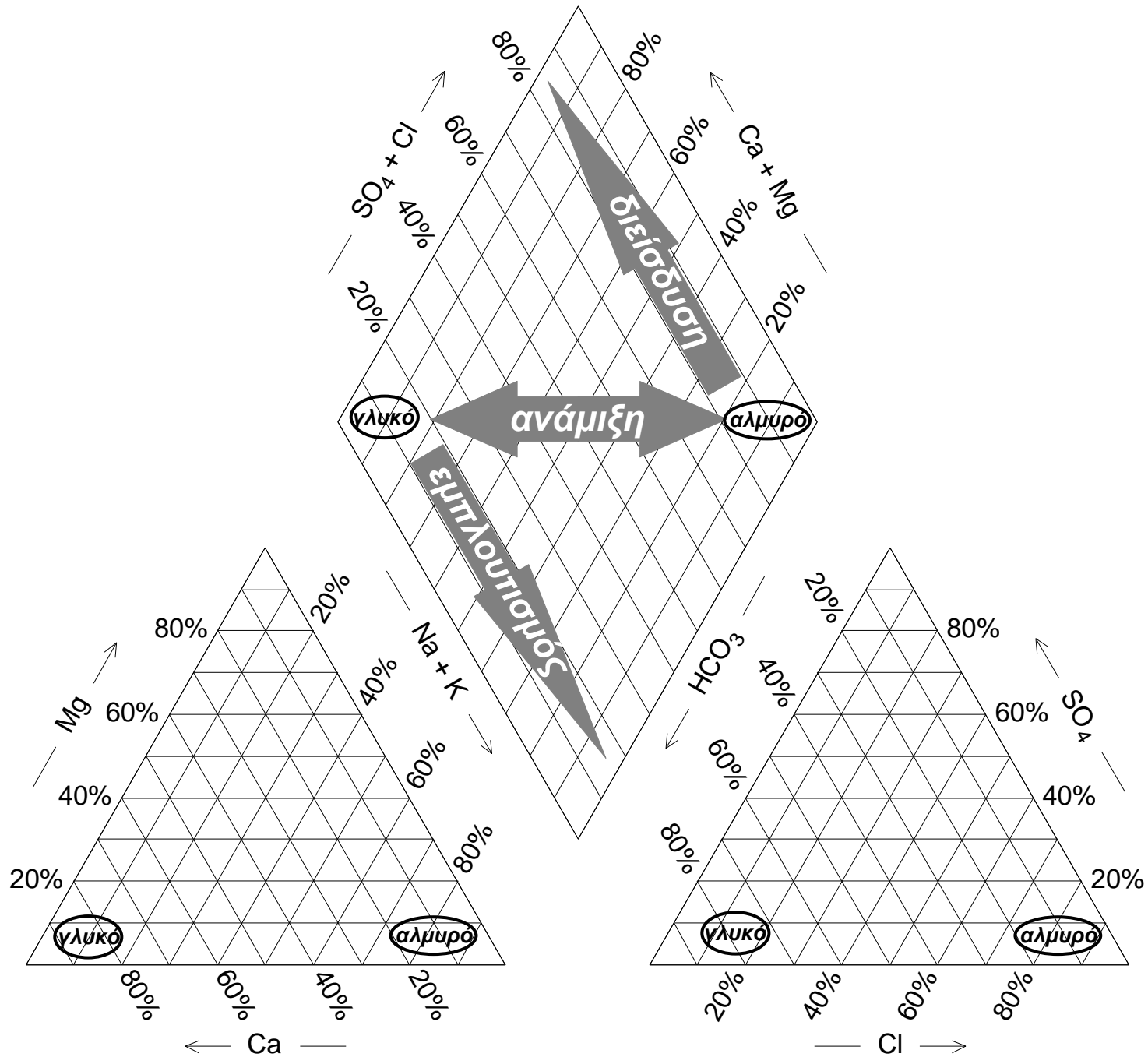
(από Stuyfzand, 1985, Appelo and Postma, 1993)

# Γραφικές μέθοδοι στην έρευνα της αλμύρισης των υδροφόρων

Αποσκοπούν:

- ▶ στην εξακρίβωση του χημικού χαρακτήρα κάθε συγκεκριμένου δείγματος υπόγειου νερού,
- ▶ στη σύγκριση των χαρακτηριστικών επιλεγμένων ή του συνόλου των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων των δειγμάτων υπόγειου νερού μιας περιοχής,
- ▶ στη συμβολή για τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων μεταξύ δύο ή περισσότερων δειγμάτων υπόγειου νερού και
- ▶ στον υπολογισμό του βαθμού ανάμιξης (mixing ratio) μεταξύ κάθε δείγματος υπόγειου νερού και της πηγής αλμύρισης του υδροφόρου.

ΣΥΜΒΟΛΗ  
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ  
PIPER ΣΤΗΝ  
ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ  
ΧΗΜΙΚΩΝ  
ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ  
ΣΤΗΝ  
ΑΛΜΥΡΙΣΗ ΤΩΝ  
ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ





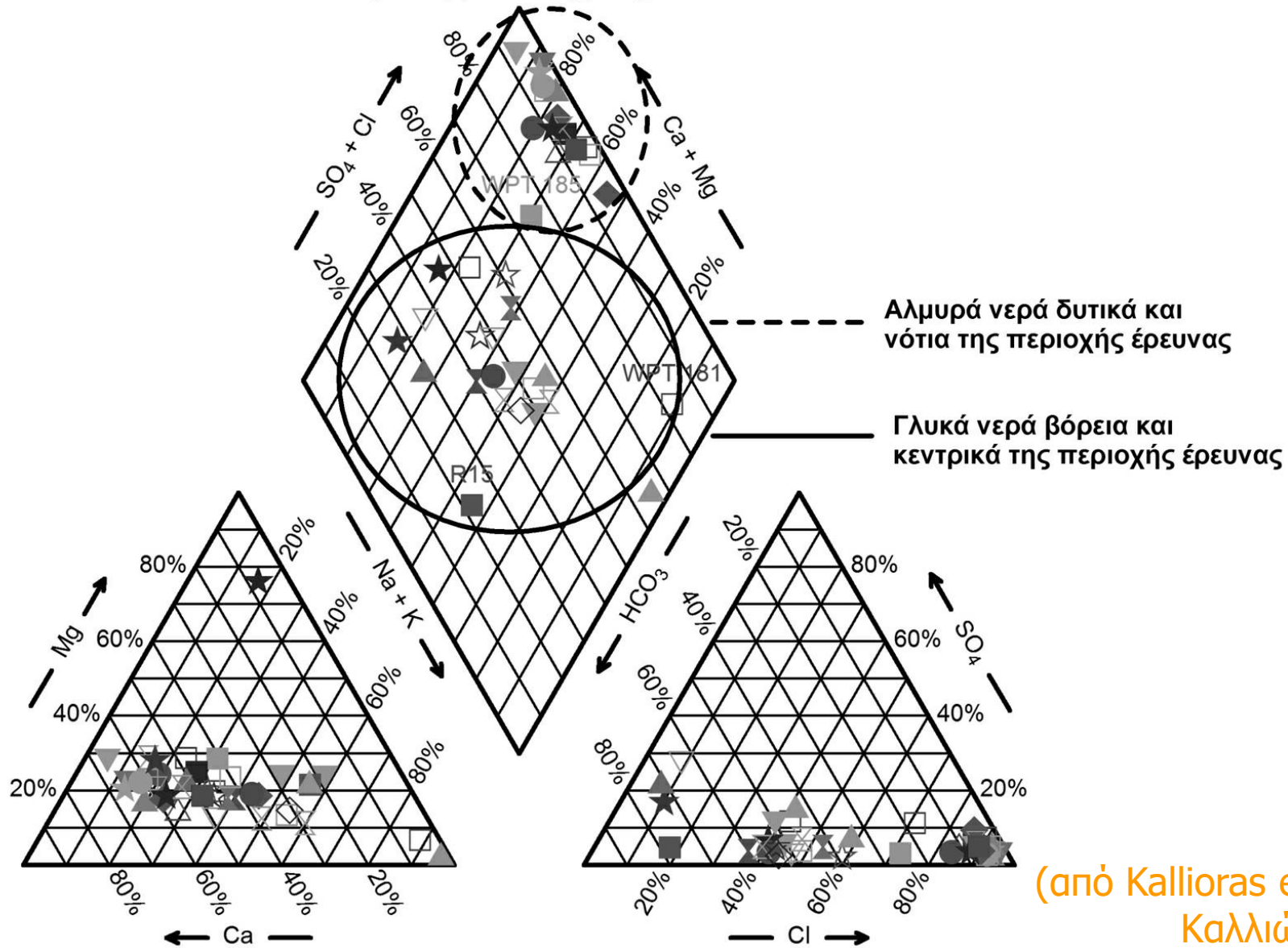
# Υδροχημικά πρότυπα των υπόγειων νερών του δυτικού πεδινού τμήματος του Νομού Ροδού

(Kallioras et al., 2006, Καλλιώρας, 2008)

# δυτικό πεδινό τμήμα του Νομού Ροδόπης

## Τριγραμμικό Διάγραμμα Piper

Έτος δειγματοληψίας 2003



(από Kallioras et al., 2006, Καλλιώρας, 2008)



# Υδροχημικοί δείκτες για την ποιότητα των υπόγειων νερών παράκτιων υδροφόρων

Αρδευτικά σταθερότυπα υπόγειων νερών:

- ▶ Ειδική Ηλεκτρική Αγωγιμότητα, SEC (Specific Electrical Conductivity)
- ▶ Συντελεστής Προσρόφησης Νατρίου, SAR (Sodium Adsorption Ratio)
- ▶ Συντελεστής Revelle

# Ειδική Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (Specific Electrical Conductivity, SEC)

- ▶ Ειδική Ηλεκτρική Αγωγιμότητα και Σύνολο Διαλυμένων Στερεών (Total Dissolved Solids, TDS).
- ▶ Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα: η αγωγιμότητα 1 cm<sup>3</sup> νερού σε θερμοκρασία ίση με 25 °C.
- ▶ Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 300 και 1000 μS/cm για τα γλυκά υπόγεια νερά, ενώ σε περιπτώσεις που ο υδροφόρος έχει υποστεί ρύπανση η τιμή αυτή υπερβαίνει τα 1500-2000 μS/cm

# Ταξινόμηση υπόγειων νερών βάσει των τιμών TDS (mg/L)

Ταξινόμηση κατά Hem (1985)		Ταξινόμηση κατά Davies-DeWiest (1966)	
Γλυκό	< 1000	Γλυκό	< 1000
Μέτρια αλατούχο	3000 – 10000	Υφάλμυρο	1000 – 10000
Πολύ αλατούχο	10000 – 35000	Αλμυρό	10000 – 100000
Υπεραλμυρό	> 35000	Σαλαμούρα	>100000

Ταξινόμηση κατά Robinove et al. (1958)		Ταξινόμηση κατά Freeze and Cherry (1979)	
Γλυκό	0 – 1000	Γλυκό	0 – 1000
Ελαφρώς αλμυρό	1000 – 3000	Υφάλμυρο	1000 – 10000
Μέτρια αλμυρό	3000 – 10000	Αλμυρό	10000 – 100000
Πολύ αλμυρό	10000 – 35000	Υπεραλμυρό	>100000
Υπεραλμυρό	> 35000		

# Ταξινόμηση βάσει SEC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) & TDS ( $\text{mg}/\text{L}$ )

Ο Καλλέργης (2000) χρησιμοποιώντας το διάγραμμα του Richards (1954) ταξινομεί το αρδευτικό νερό ως εξής:

- ▶ **Τάξη C<sub>1</sub>**: (TDS<200, EC<250). Νερό χαμηλής αλατότητας. Κανένα πρόβλημα. Σε περιοχές πολύ χαμηλής περατότητας απαιτείται κάποια απόπλυση.
- ▶ **Τάξη C<sub>2</sub>**: (TDS:200-500, EC:250-750). Μέτρια αλατότητα. Απαιτείται μέτρια απόπλυση των αρδευόμενων εδαφών.
- ▶ **Τάξη C<sub>3</sub>**: (TDS:500-1500, EC:750-2250). Νερό υψηλής αλατότητας ακατάλληλο για άρδευση σε εδάφη περιορισμένης στράγγισης. Απαιτούνται μέτρα ελέγχου της αλατότητας και καλλιέργεια μόνο αλατοανθεκτικών φυτών.
- ▶ **Τάξη C<sub>4</sub>**: (TDS:1500-3000, EC:2250-5000). Νερό πολύ υψηλής αλατότητας. Ακατάλληλο για άρδευση κάτω από συνηθισμένες συνθήκες, χρησιμοποιήσιμο σε ειδικές συνθήκες (εδάφη πολύ περατά, στράγγιση πολύ καλή). Συνιστάται η χρησιμοποίηση πλεονάσματος νερού, ώστε να επιτευχθεί η απόπλυση του εδάφους και η καλλιέργεια πολύ ανθεκτικών στην αλατότητα φυτών.

# Εμπειρικές σχέσεις SEC & TDS

- Σχέση κατά Logan:

$$1\mu\text{S}/\text{cm}=6,4\times 10^{-1}\text{ mg}/\text{L TDS, σε } 25^{\circ}\text{C}$$

- Σχέση κατά Mandel and Shiftan:

$$\text{TDS (ppm)}\approx 0,65\times \text{EC } (\mu\text{S}/\text{cm}) \text{ και}$$

$$\text{TDS (meq/L)}\approx 0,01\times \text{EC } (\mu\text{S}/\text{cm})$$

ppm: μέρη ανά εκατομμύριο βάρους του δείγματος (μοριακότητα κατά βάρος)

meq/L: χιλιοστοϊσοδύναμα ανά L δείγματος

# Συντελεστής Προσρόφησης Νατρίου, SAR (Sodium Adsorption Ratio)

- ▶ Ο Συντελεστής Προσρόφησης Νατρίου (Sodium Adsorption Ratio, SAR) αποτελεί ένα από τα βασικότερα κριτήρια καταλληλότητας των νερών άρδευσης και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{SAR} = \frac{[\text{Na}^+]}{\sqrt{[\text{Ca}^{++}] + [\text{Mg}^{++}]/2}}$$

όπου οι συγκεντρώσεις των ιόντων εκφράζονται σε meq/L.

# Επίδραση του συντελεστή προσρόφησης νατρίου, SAR, στη γεωργική απόδοση και στη ποιότητα του αρδευτικού νερού

Ποιοτική παράμετρος	Κανένα πρόβλημα	Αυξανόμενα προβλήματα	Σοβαρά προβλήματα
SAR	<6	6-9	>9

# Συντελεστής Revelle

- Προκειμένου να αποφευχθεί η λαθεμένη διάγνωση της διείδυσης του θαλασσινού νερού, λόγω προσωρινής αύξησης του TDS, ο Revelle (1941) πρότεινε τη χρησιμοποίηση του κριτηρίου της διείδυσης του θαλασσινού νερού που είναι γνωστός ως Συντελεστής Revelle, R (συγκεντρώσεις σε meq/L).

$$R = \frac{Cl^-}{CO_3^{2-} + HCO_3^-}$$



# Χαρακτηρισμός βαθμού ρύπανσης από τη διείσδυση της θάλασσας κατά Simpson (1946) και κατά Καλλέργη (2000)

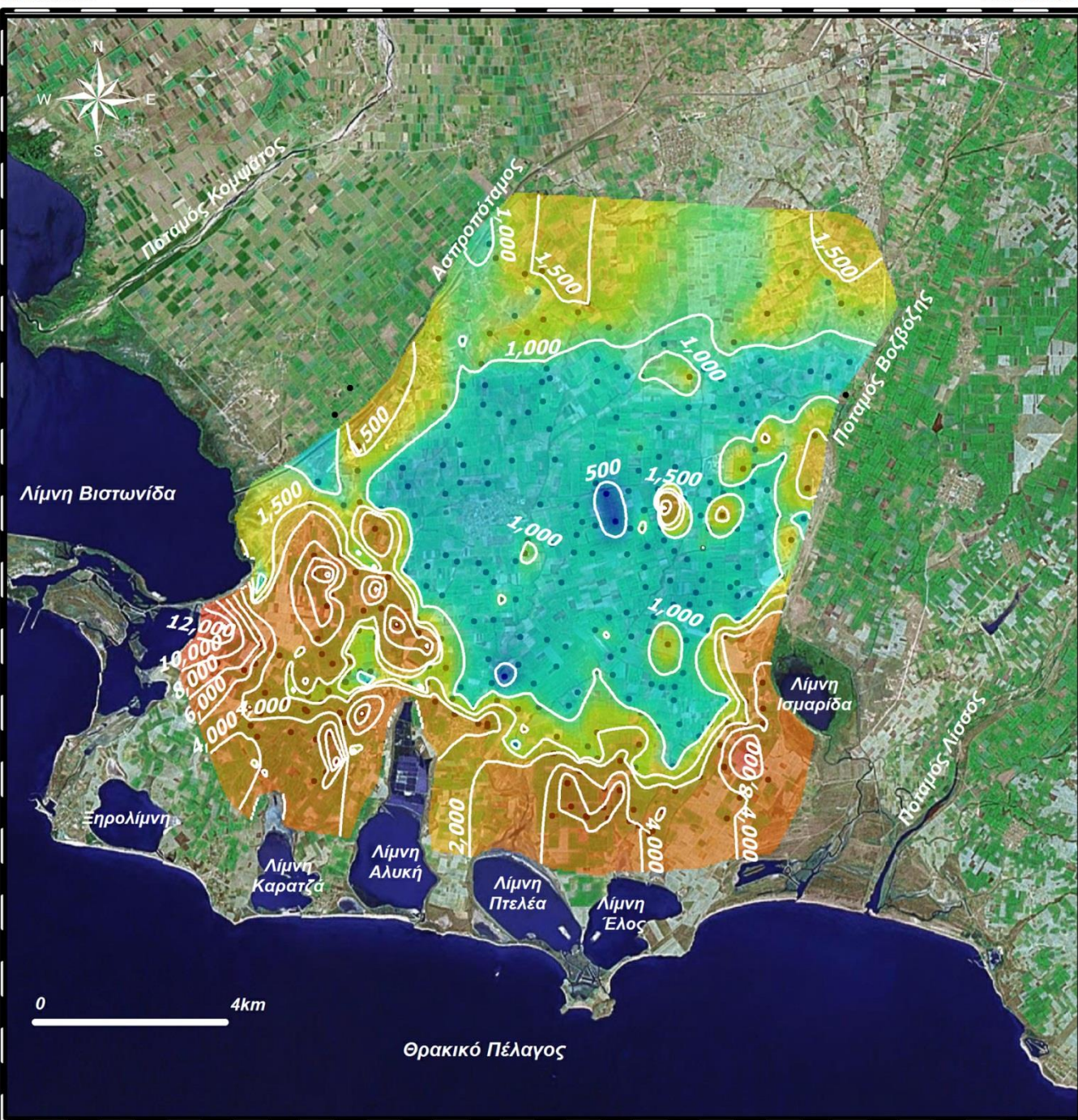
Προτεινόμενο όριο συντελεστή Revelle κατά Καλλέργη	Προτεινόμενο όριο συντελεστή Revelle κατά Simpson	Χαρακτηρισμός νερού
<1	0,5	Καλό υπόγειο νερό χωρίς ρύπανση από τη θάλασσα
1 – 2	1,3	Ελαφρά ρυπασμένο νερό
2 – 6	2,8	Μέτρια ρυπασμένο νερό
6 – 10	6,6	Σοβαρά ρυπασμένο νερό
10 – 150	15,5	Επικίνδυνα ρυπασμένο νερό
>150	200 +/-	Θαλασσινό νερό

25.118135

25.316180

41.11535

41.11535



07530604

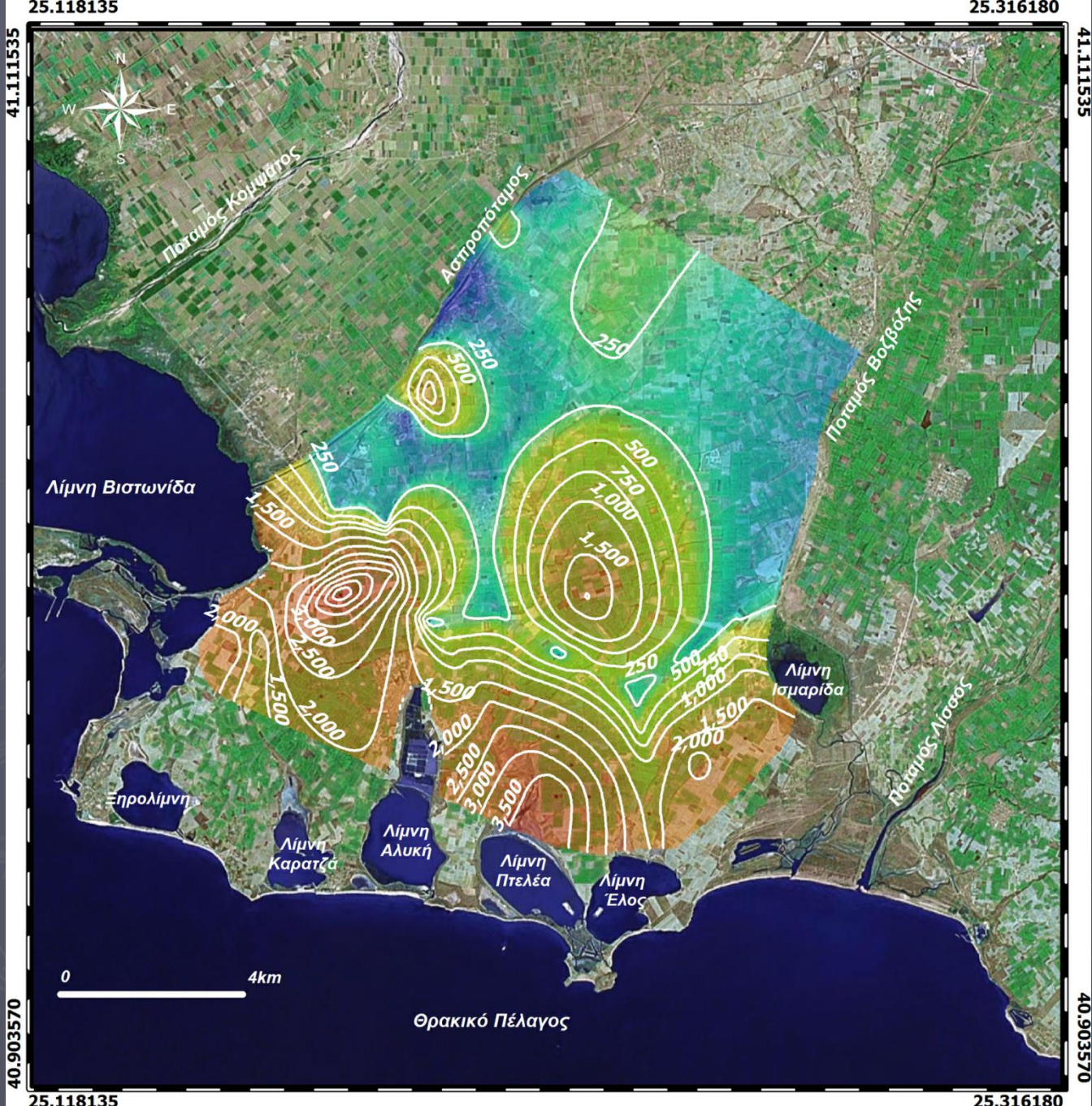
40.903570

25.118135

25.316180

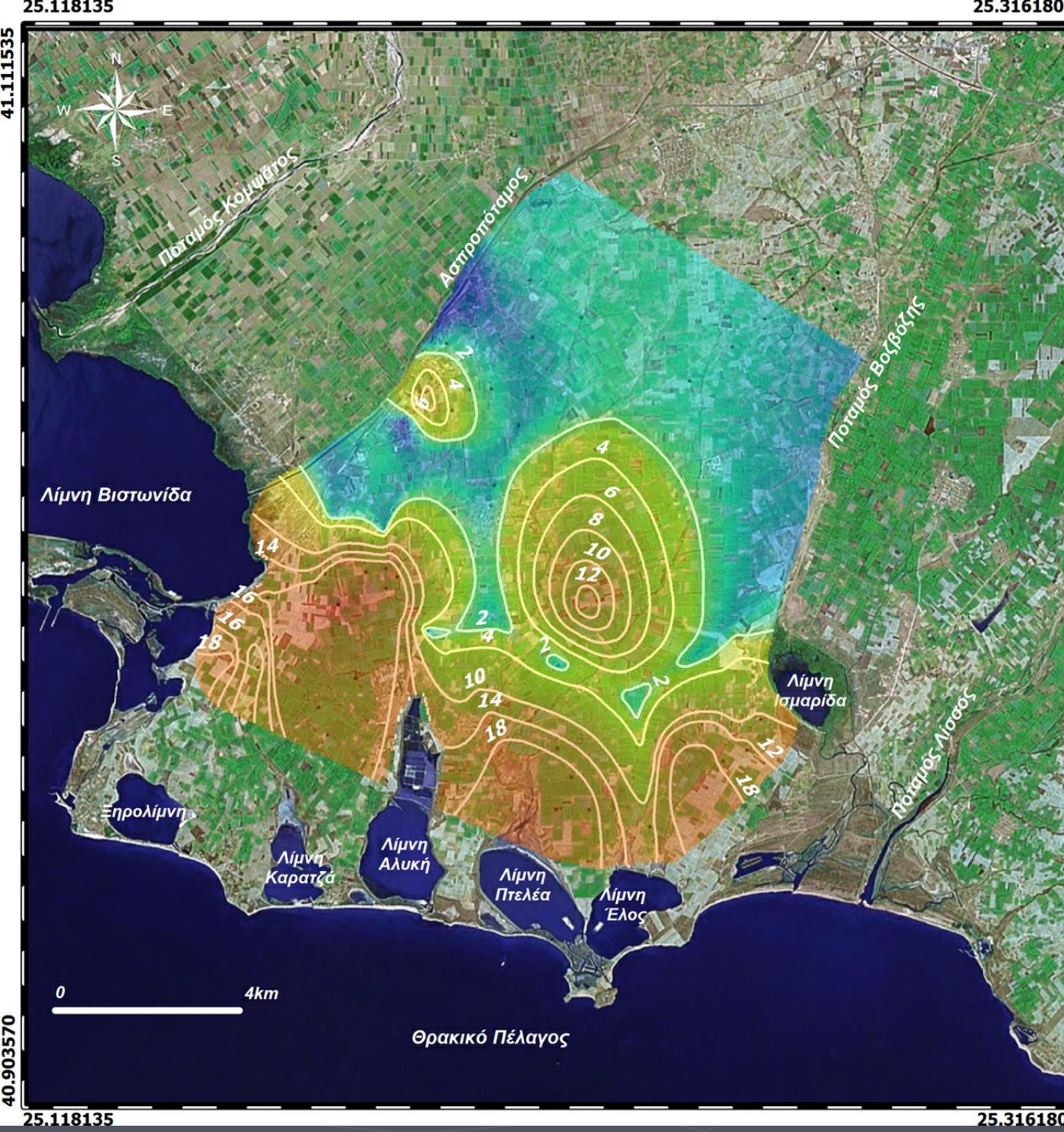
Χωρική κατανομή  
ειδικής ηλεκτρικής  
αγωγιμότητας, SEC  
( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) (από 375  
σημεία  
δειγματοληψίας)  
κατά την περίοδο  
Ιούλιος 2003

(Καλλιώρας, 2008)



Κατανομή ιόντων  $Cl^-$  της περιοχής έρευνας (2003)

(Καλλιώρας, 2008)

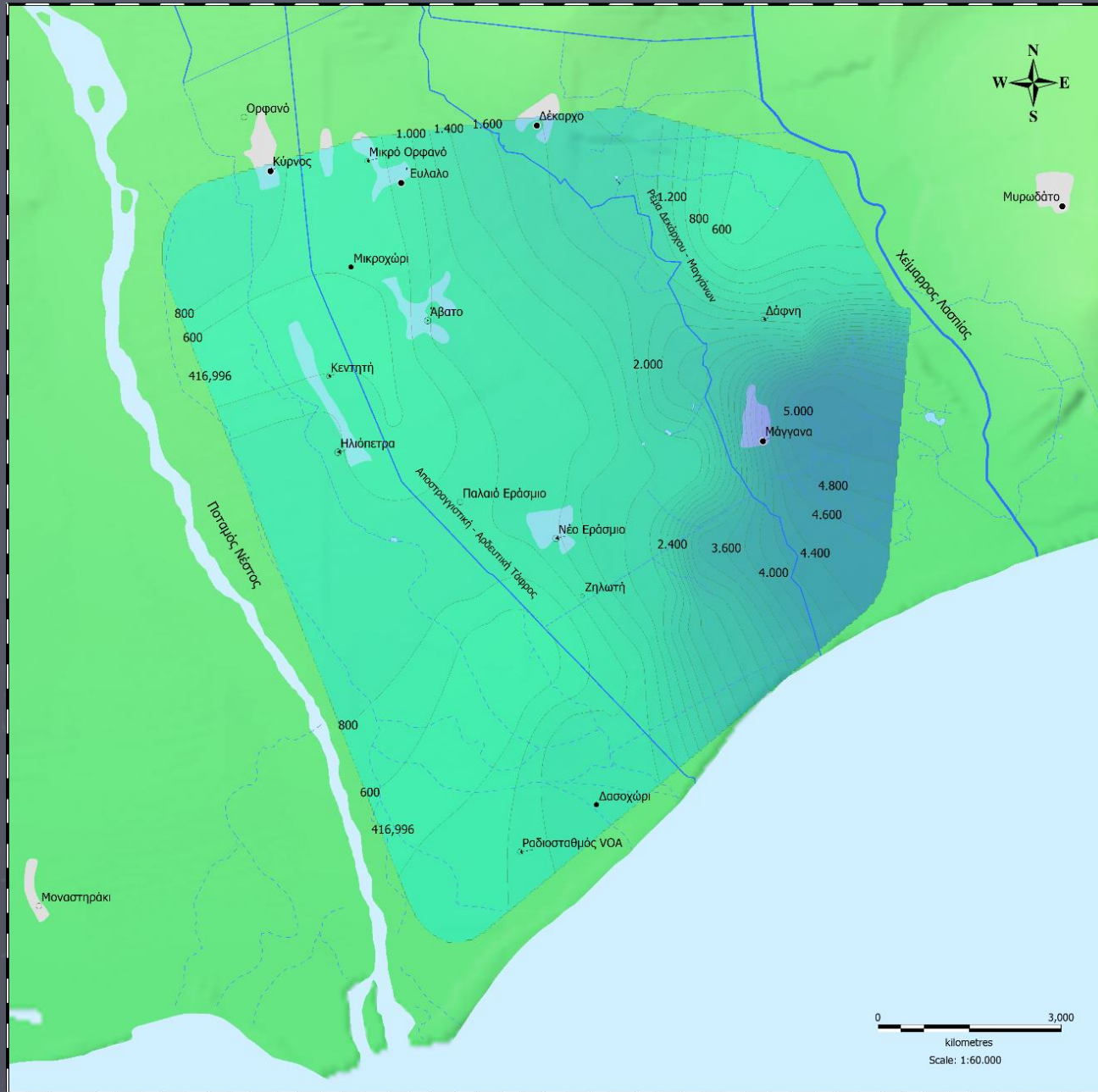


Χωρική κατανομή  
 συντελεστή Revelle  
 κατά την περίοδο  
 Ιούλιος 2003

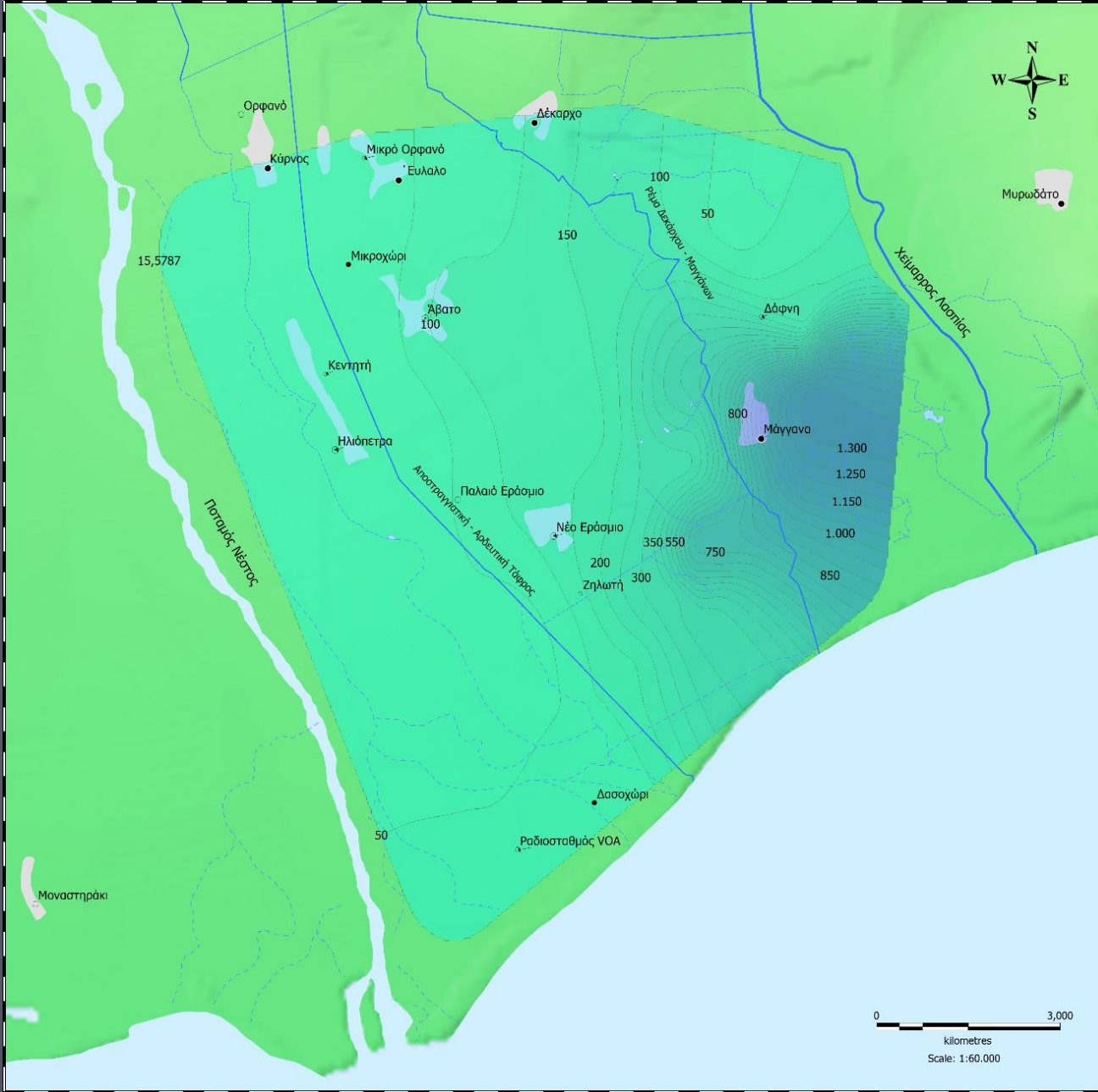
$$\text{Revelle, } R = \frac{[Cl]}{[CO_3] + [HCO_3]}$$

concentrations in meq/L

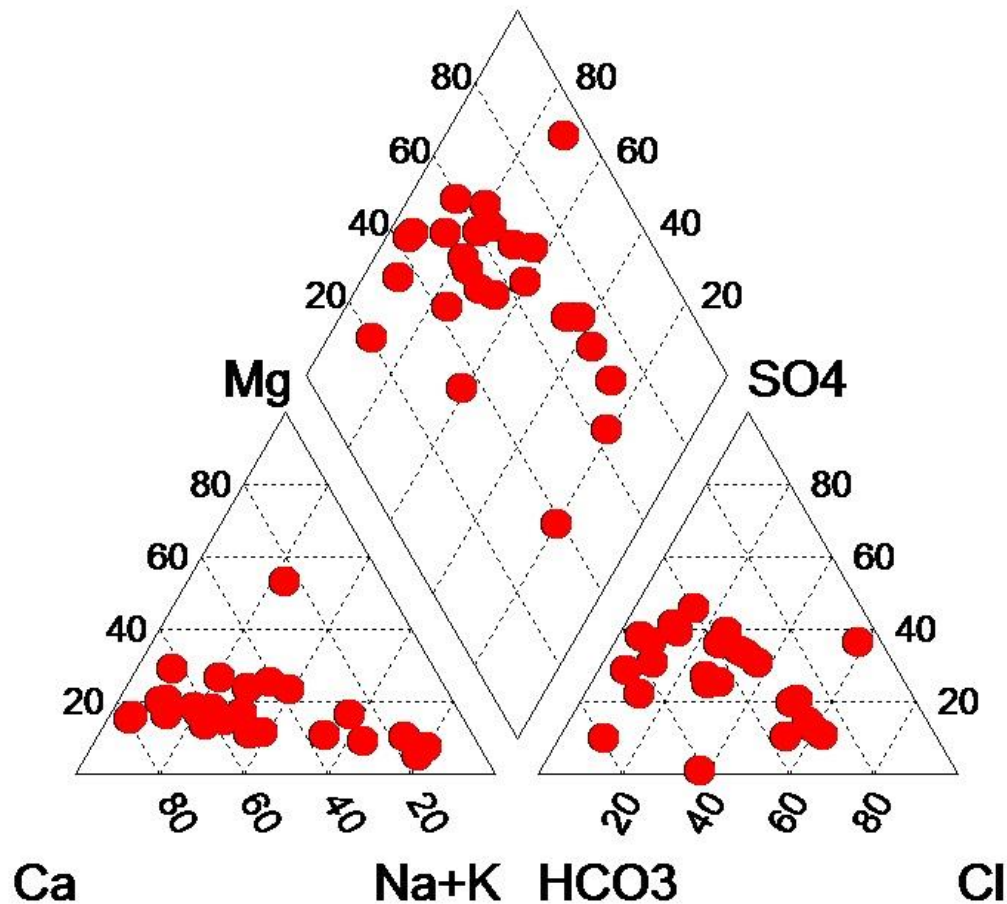
(Καλλιώρας, 2008)



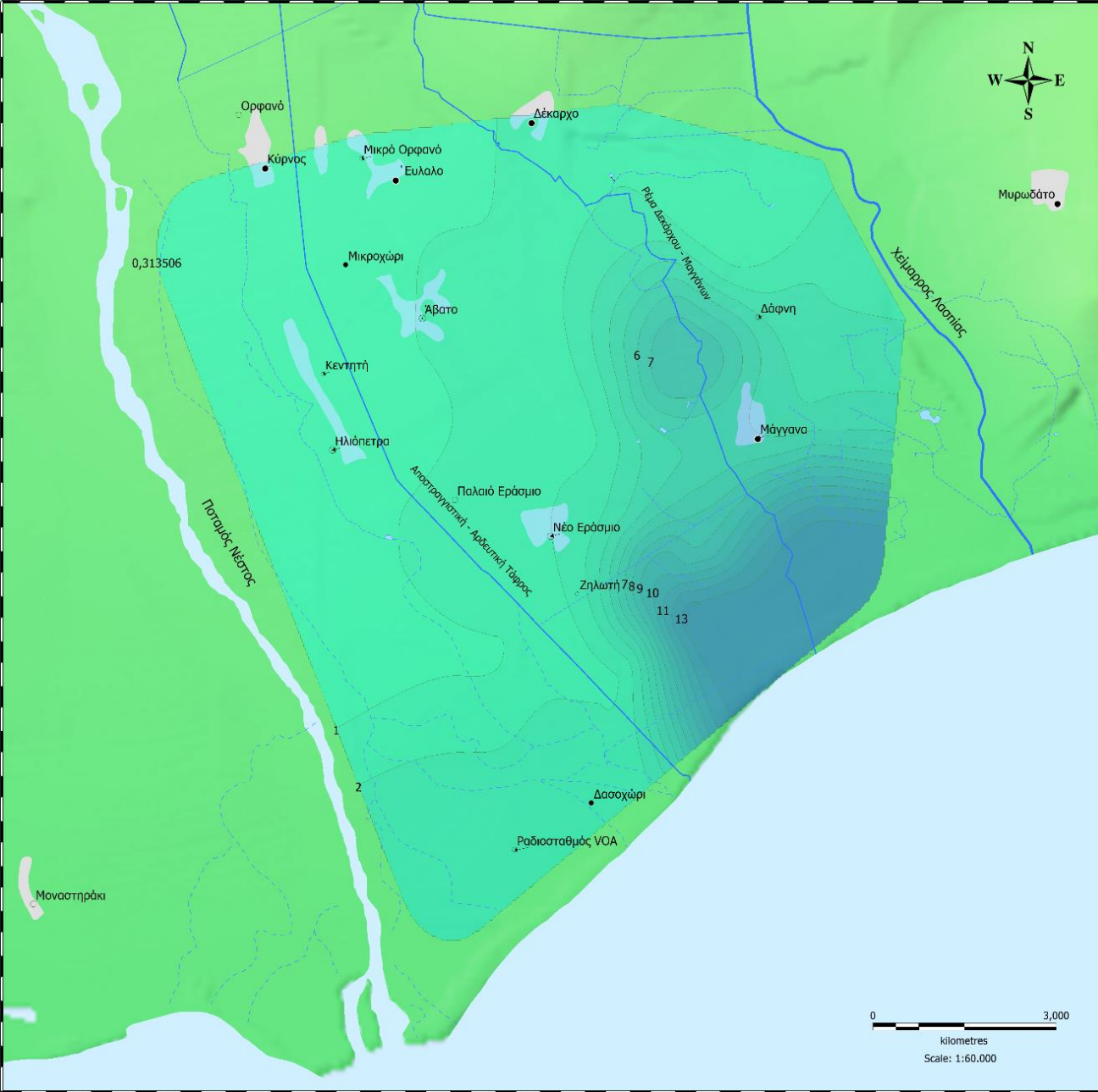
Χωρική κατανομή ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, SEC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), κατά την περίοδο Ιουλίου 2009.



Χωρική κατανομή ιόντων  
 χλωρίου (mg/L) κατά την  
 περίοδο Ιουλίου 2009.

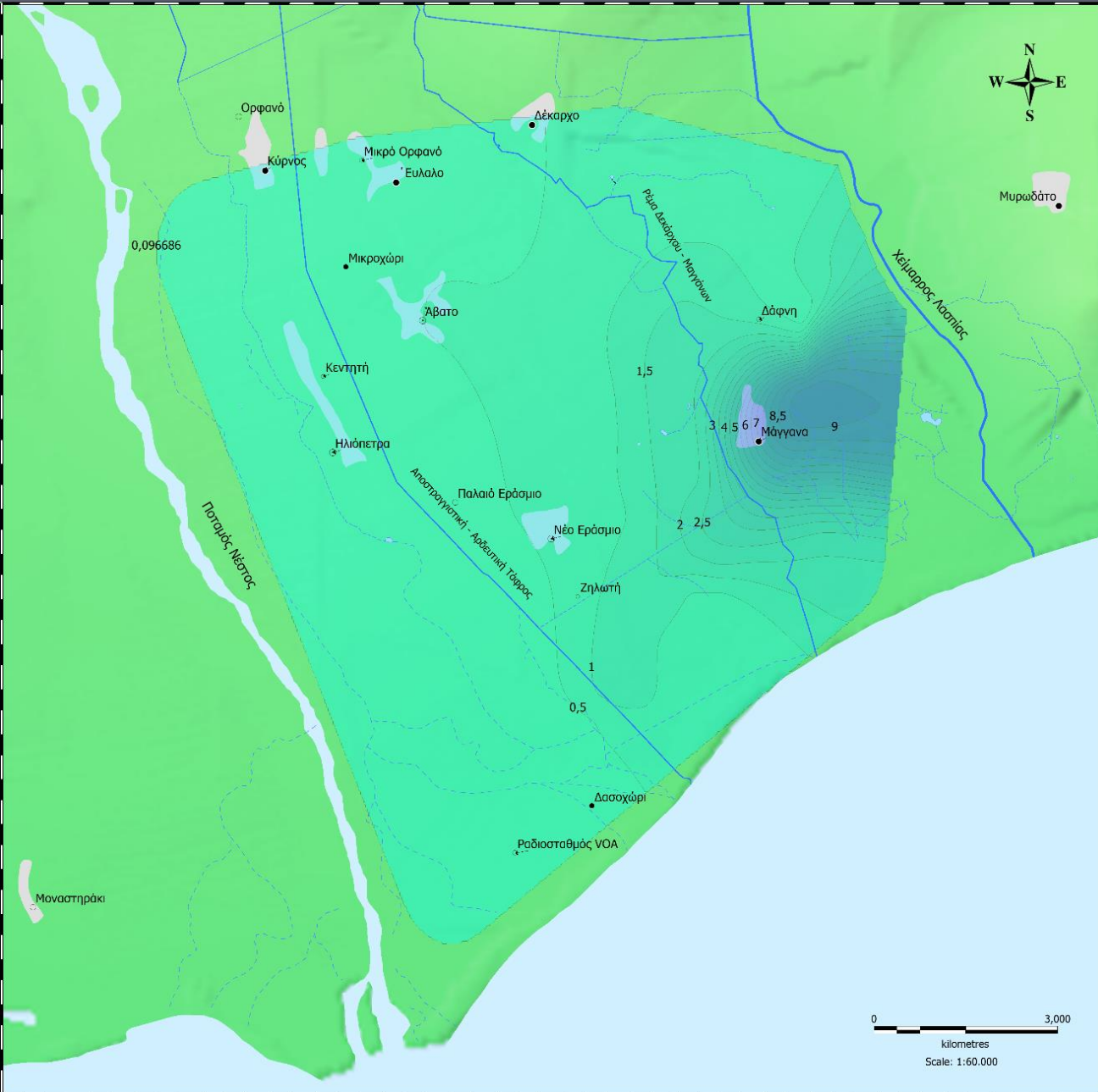


Τριγωνικό διάγραμμα κατά Piper με τα δείγματα των υπόγειων νερών του φρεάτιου υδροφορέα της περιοχής έρευνας από τη χημική ανάλυση του Ιουλίου 2009.

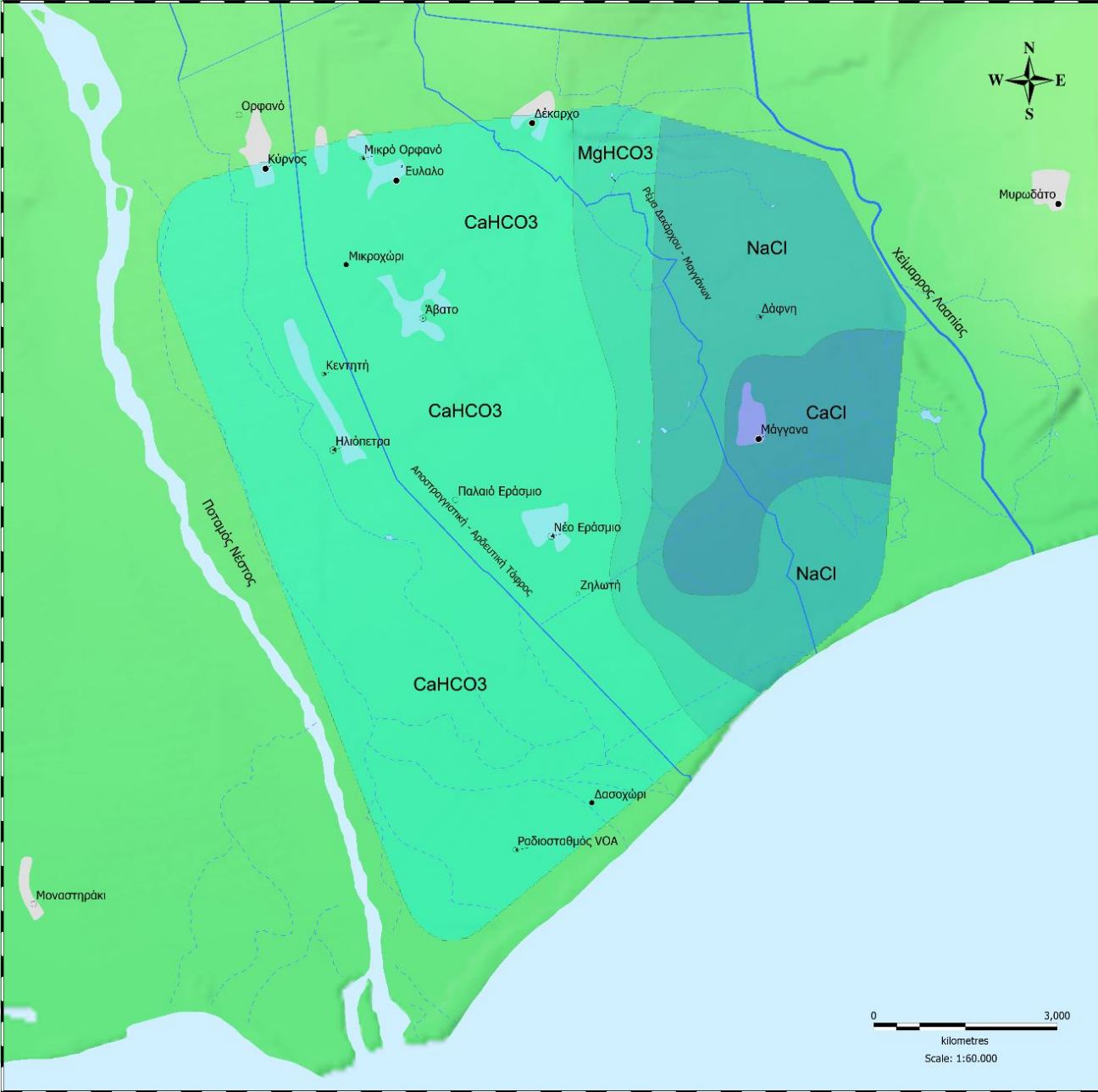


Χωρική κατανομή  
 συντελεστή προσρόφησης  
 νατρίου, SAR, περιόδου  
 Ιουλίου 2009.





Χωρική κατανομή  
 συντελεστή Reville κατά την  
 περίοδο Ιουλίου 2009.



Χωρική κατανομή  
 κυριότερων υδροχημικών  
 τύπων των υπόγειων νερών  
 του φρεατίου υδροφορέα  
 της περιοχής έρευνας  
 (Ιούλιος 2009).

➤ **Br<sup>-</sup>**

<0,01 mg/L (fgw)

65-67 mg/L (sw)

➤ **Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup>**

= 0,876 ± 10% (fgw)

< 0,876 ± 10% (salinization)

➤ **Mg<sup>2+</sup>/Ca<sup>2+</sup>**

0,2-1,5 (fgw)

≈5 (sw)

➤ **SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/Cl<sup>-</sup>**

0,07-0,1 (sw)

➤ Συγκεντρώσεις σε (meq/L)

# ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

---

- Απαιτεί γνώση των υδραυλικών συνθηκών
- Η βέλτιστη λύση είναι η παρεμπόδιση
- Ελαχιστοποίηση περαιτέρω διείσδυσης ή/και μείωση της έκτασης του αλμυρού μετώπου
- Σε ορισμένες περιπτώσεις η ανάκτηση του υδροφόρου δεν είναι εφικτή
- Κίνδυνος τεχνητής επικοινωνίας σε επάλληλους υδροφόρους μέσω γεωτρήσεων (κακοτεχνίες)

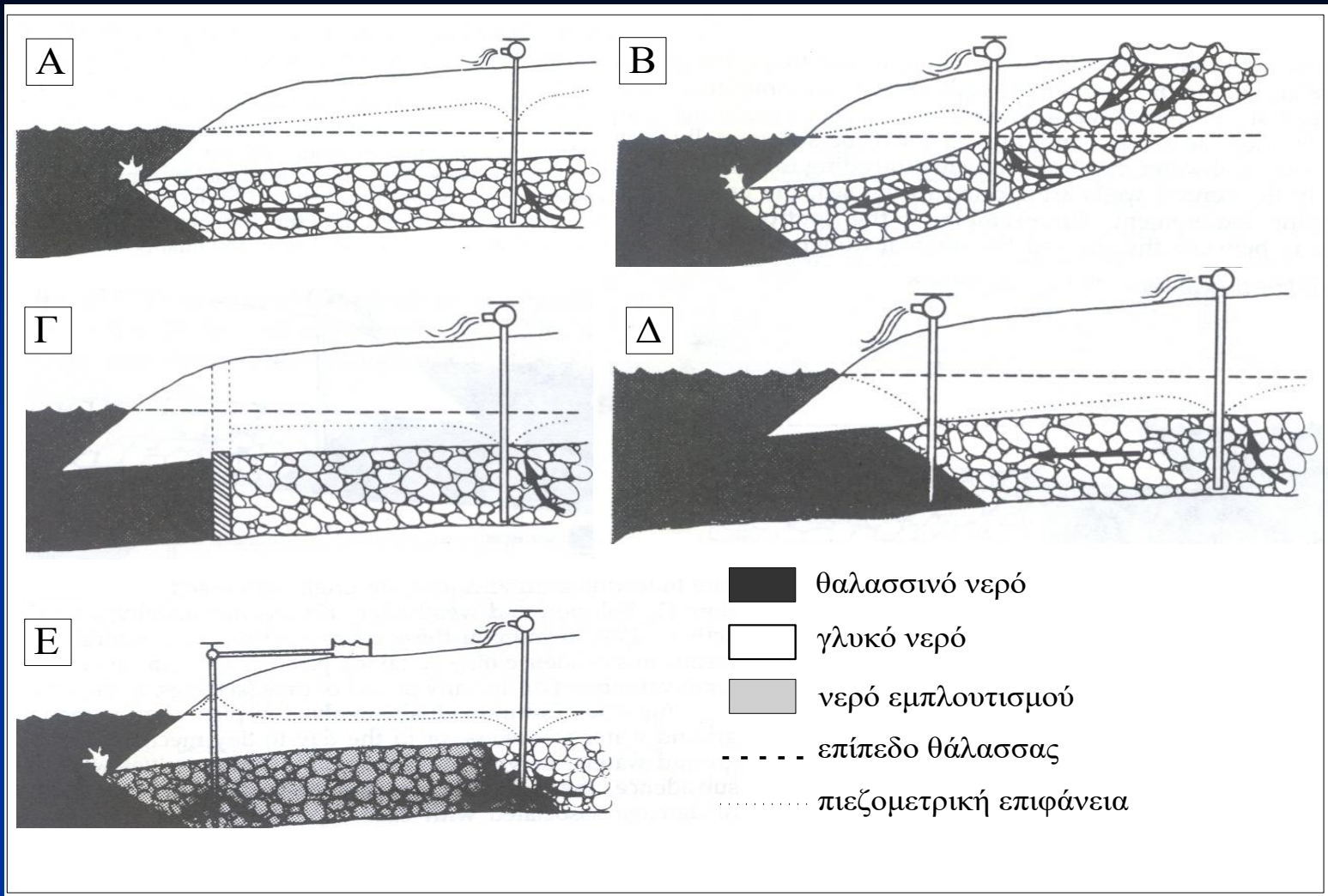
# ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΗΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

- Φραγμοί ελέγχου της θαλάσσιας διείσδυσης (barriers)
- Τεχνητός εμπλουτισμός (artificial recharge)
- Έλεγχος των αντλήσεων (pumping control)
- Ανακατανομή των αντλήσεων (relocation and redesign of wells)
- Τροποποιημένα σχέδια αντλήσεων (modification of pumping patterns)
- Εγκαταλειμμένες γεωτρήσεις (abandoned wells)
- Αντιμετώπιση της επιφανειακής διείσδυσης αλμυρού νερού στις εκβολές ποταμών
- Άμεση διάθεση επιφανειακού νερού σε αντικατάσταση της χρήσης του υπόγειου νερού
- Τεχνικές αφαλάτωσης

# ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΗ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

Οι μέθοδοι που θα εφαρμοστούν, εξαρτώνται από:

- Την προέλευση του αλμυρού νερού
- Την έκταση της διείσδυσης
- Τις γεωλογικές, υδρογεωλογικές και υδρολογικές συνθήκες
- Τη χρήση του νερού
- Οικονομικούς παράγοντες



Μέθοδοι αντιμετώπισης της θαλάσσιας διείσδυσης σε υπό πίεση υδροφόρους με:

(Α) ελεγχόμενες αντλήσεις, (Β) επιφανειακό τεχνητό εμπλουτισμό, (Γ) υπόγειο φυσικό φραγμό, (Δ) κοίλωμα άντλησης (rumping-trough), (Ε) συνδυασμό ελεγχόμενων αντλήσεων και γεωτρήσεων εμπλουτισμού (από *ASCE, 1987*).

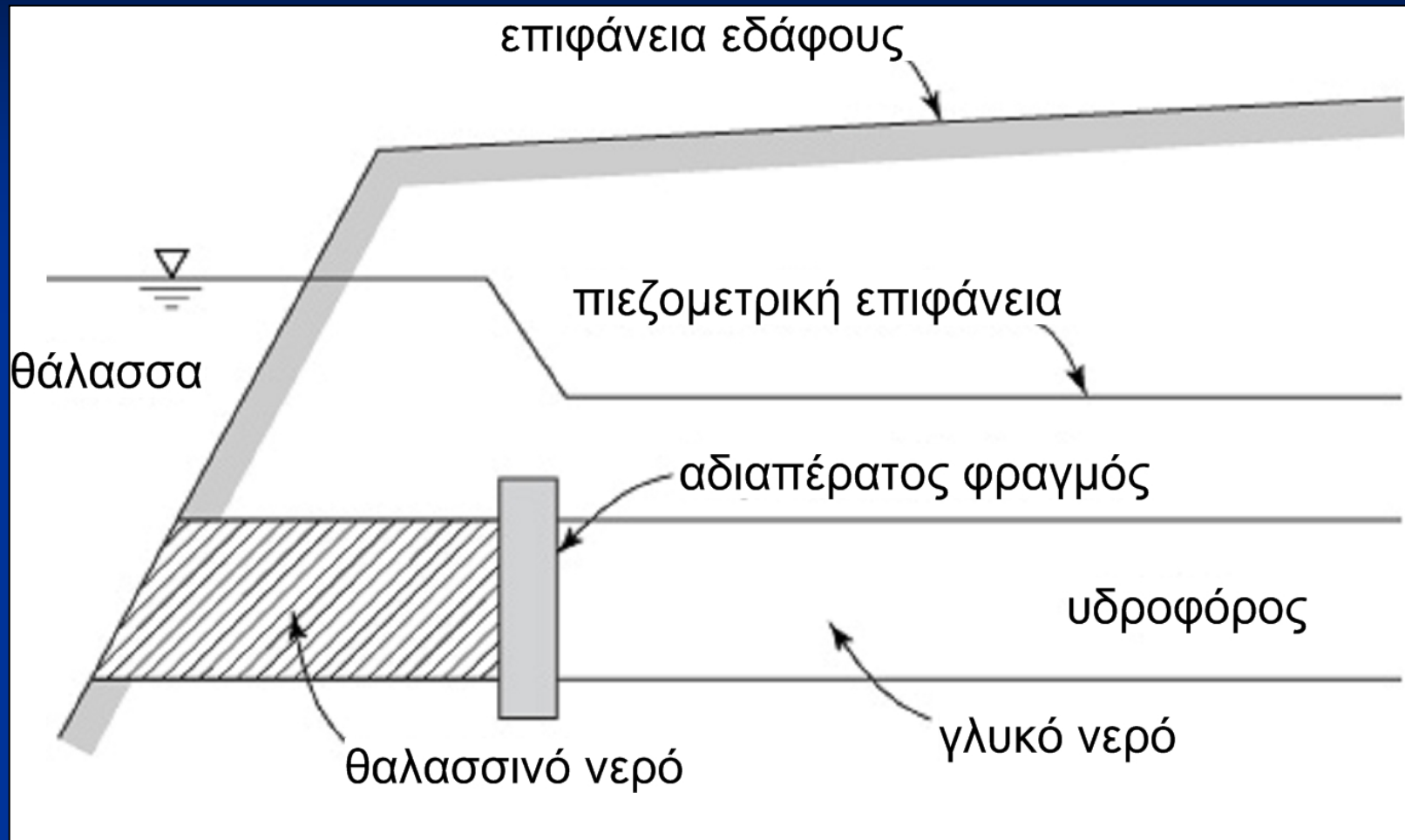
# ΦΡΑΓΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

---

- Φραγμοί άντλησης (pumping trough barriers)
- Φραγμοί εμπλουτισμού (έγχυσης) (injection barriers)
- Υπόγειοι τεχνητοί φραγμοί (subsurface impermeable barriers)
- Βιολογικοί φραγμοί (biological barriers)



# ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΦΡΑΓΜΟΥ



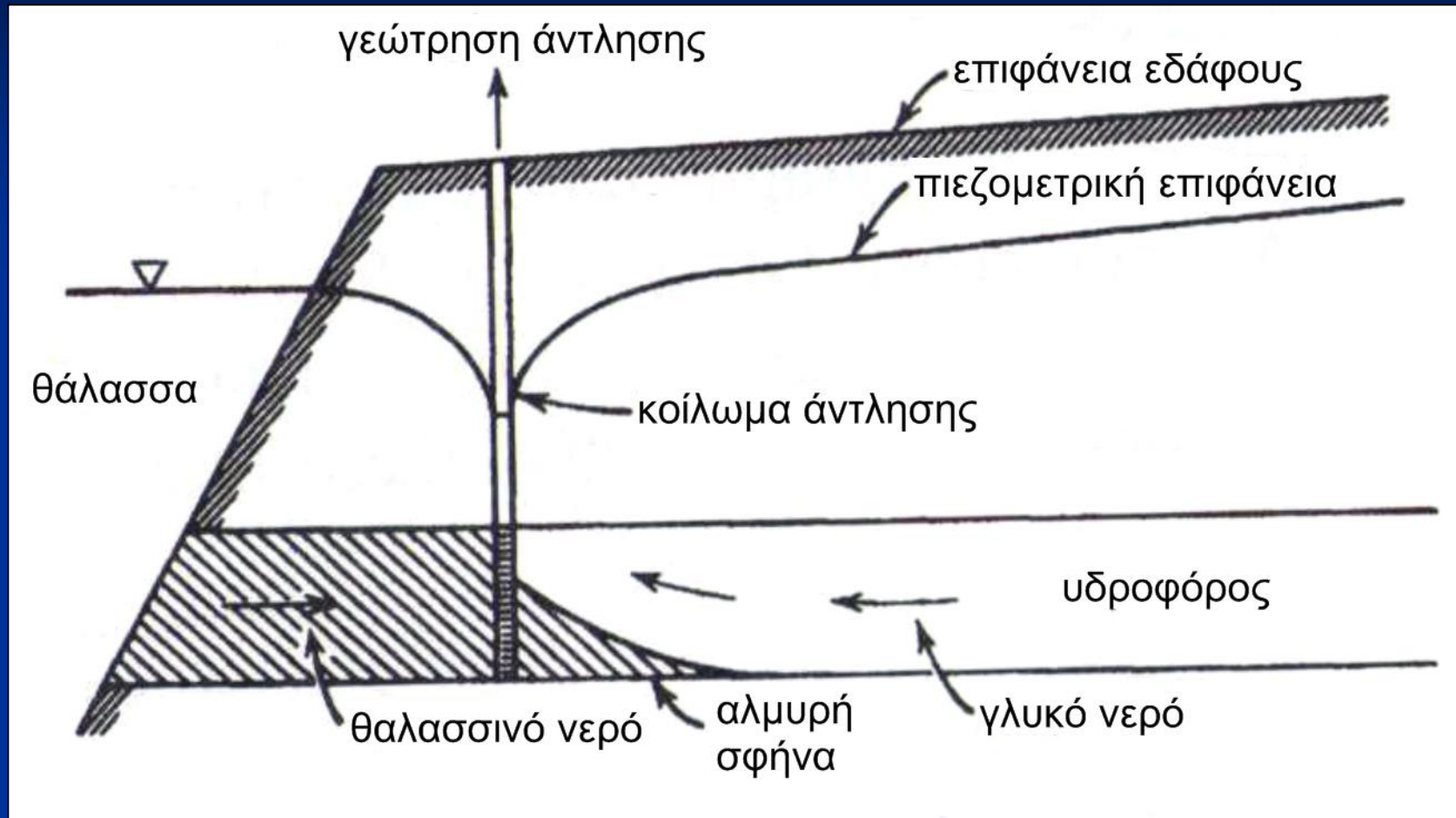
Έλεγχος θαλάσσιας διείσδυσης με κατασκευή υπόγειου τεχνητού φραγμού παράλληλα προς την ακτογραμμή (από Todd and Mays, 2005).

# ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΦΡΑΓΜΟΥ

Υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή υπόγειου τεχνητού φραγμού:

- Τοίχωμα από πασσαλοσανίδες - Sheet piling
- Υδατοστεγές αργιλώδες επίχρισμα - Puddled clay
- Γαλακτωποιημένη άσφαλτος - Emulsified asphalt
- Ρευστοκονίαμα τσιμέντου - Cement grout
- Μπεντονίτης - Bentonite
- Ξηροπηκτή πυριτικού οξέος - Silica gel
- Ακρυλικό ασβέστιο - Calcium acrylate
- Πλαστικά - Plastics

# ΦΡΑΓΜΟΙ Ή ΚΟΙΛΩΜΑΤΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ

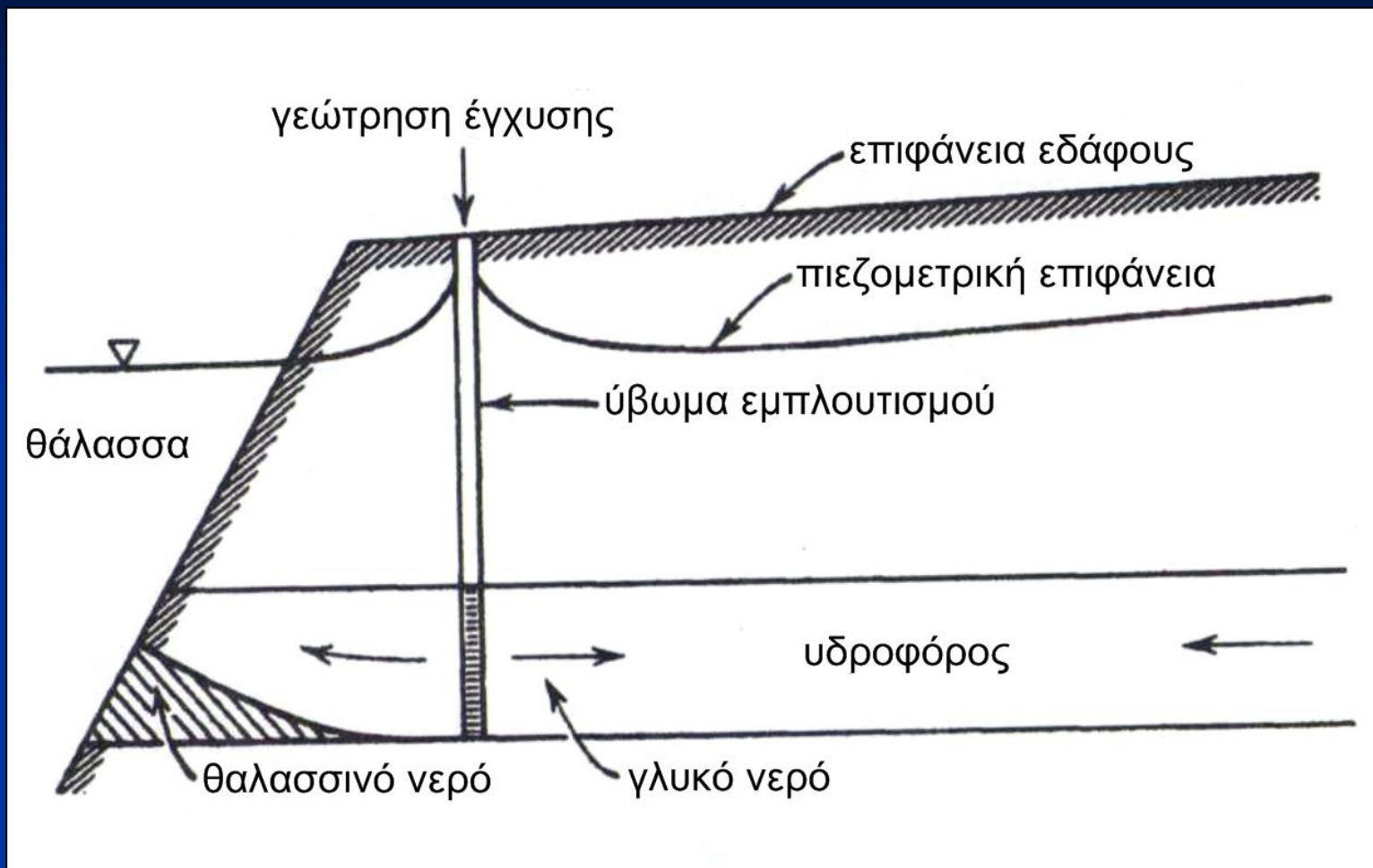


Έλεγχος θαλάσσιας διείσδυσης με φραγμό άντλησης (από Todd and Mays, 2005).

# ΦΡΑΓΜΟΙ Ή ΚΟΙΛΩΜΑΤΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ

- Δημιουργούνται από τις συνεχείς αντλήσεις κατά μήκος μιας γραμμής γεωτρήσεων πολύ κοντά στην ακτογραμμή
- Είναι πιο δαπανηρή από τους φραγμούς έγχυσης
- Σημαντική πτώση της στάθμης του υπόγειου νερού σε όλη τη λεκάνη
- Το κόστος άντλησης αυξάνεται συνεχώς
- Κάποιες γεωτρήσεις στερεύουν
- Ενεργοποίηση της κατακόρυφης κίνησης αλμυρού νερού προς το γλυκό υδροφόρο

# ΦΡΑΓΜΟΙ ΕΓΧΥΣΗΣ ΓΛΥΚΟΥ ΝΕΡΟΥ



Έλεγχος θαλάσσιας διείσδυσης με φραγμό έγχυσης (από Todd and Mays, 2005).

# ΦΡΑΓΜΟΙ ΕΓΧΥΣΗΣ ΓΛΥΚΟΥ ΝΕΡΟΥ

---

- Διατήρηση ενός υβώματος πίεσης κατά μήκος της ακτογραμμής
- Γραμμή από γεωτρήσεις παράλληλα προς την ακτή
- Απαιτείται κατάλληλος σχεδιασμός των αποστάσεων μεταξύ των γεωτρήσεων
- Απαιτείται μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων

# ΦΡΑΓΜΟΙ ΕΓΧΥΣΗΣ ΓΛΥΚΟΥ ΝΕΡΟΥ

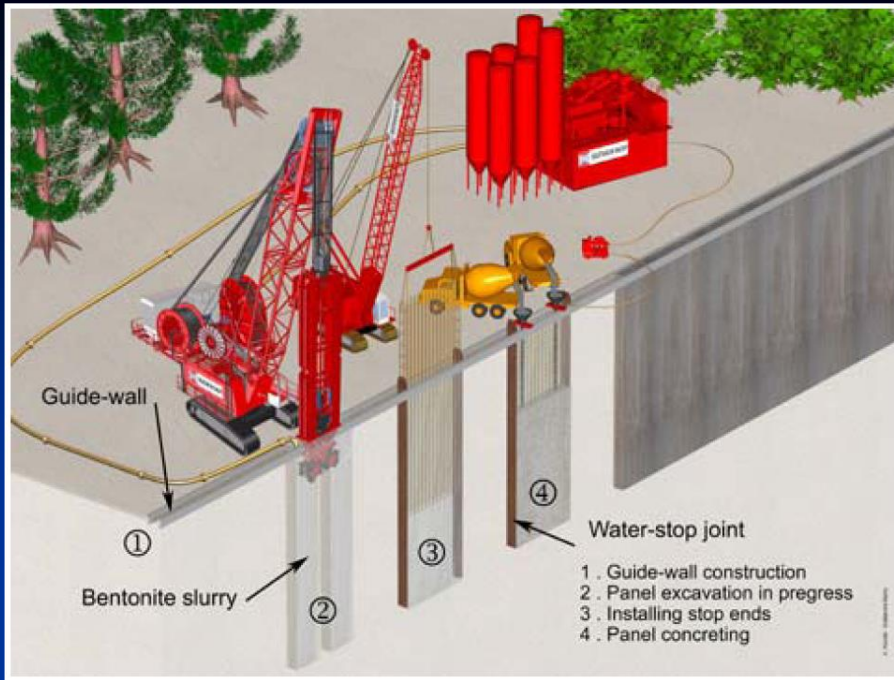
---

- έχουν υψηλό κόστος συντήρησης
- γεωτρήσεις ελέγχου πλησίον της γραμμής του φραγμού εμπλουτισμού
- απαιτούν μια πηγή γλυκού νερού υψηλής ποιότητας για τη μείωση της συχνότητας απόφραξης (clogging)

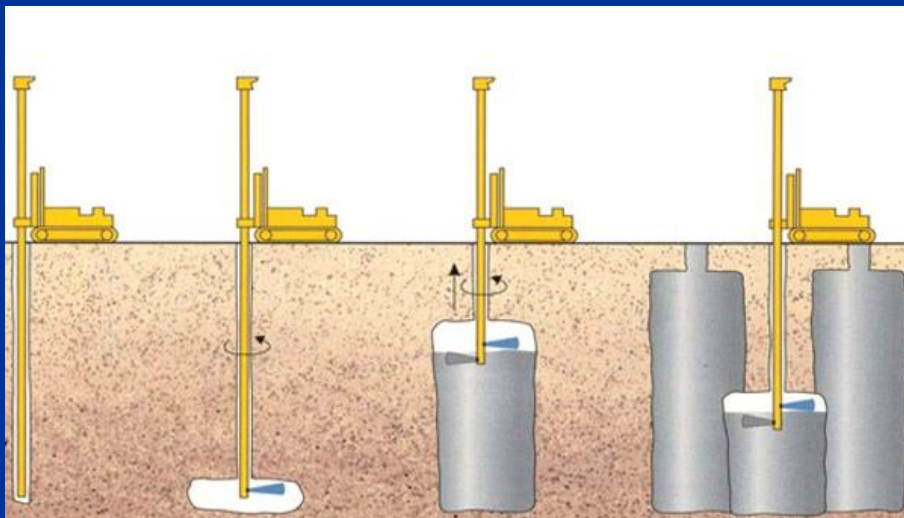
# ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΗΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ – ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΡΕΧΟΥΣΑΣ ΓΝΩΣΗΣ

- ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΥΔΑΡΟΥΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ - Slurry walls
- ΑΝΑΜΙΞΗ ΒΑΘΕΟΥΣ ΕΔΑΦΟΥΣ - Deep soil mixing
- ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΚΑΝΑΛΙΩΝ - Channel lining
- ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ - Rubber dams
- ΚΟΥΡΤΙΝΕΣ ΡΕΥΣΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ - Grout curtains
- ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΩΘΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ - Jet grouting
- ΕΓΧΥΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΑΖΩΤΟΥ - Nitrogen gas injection
- ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΡΑΓΜΩΝ- Biological barrier walls
- ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΥΑΛΟΠΟΙΗΣΗ - Insitu vitrification

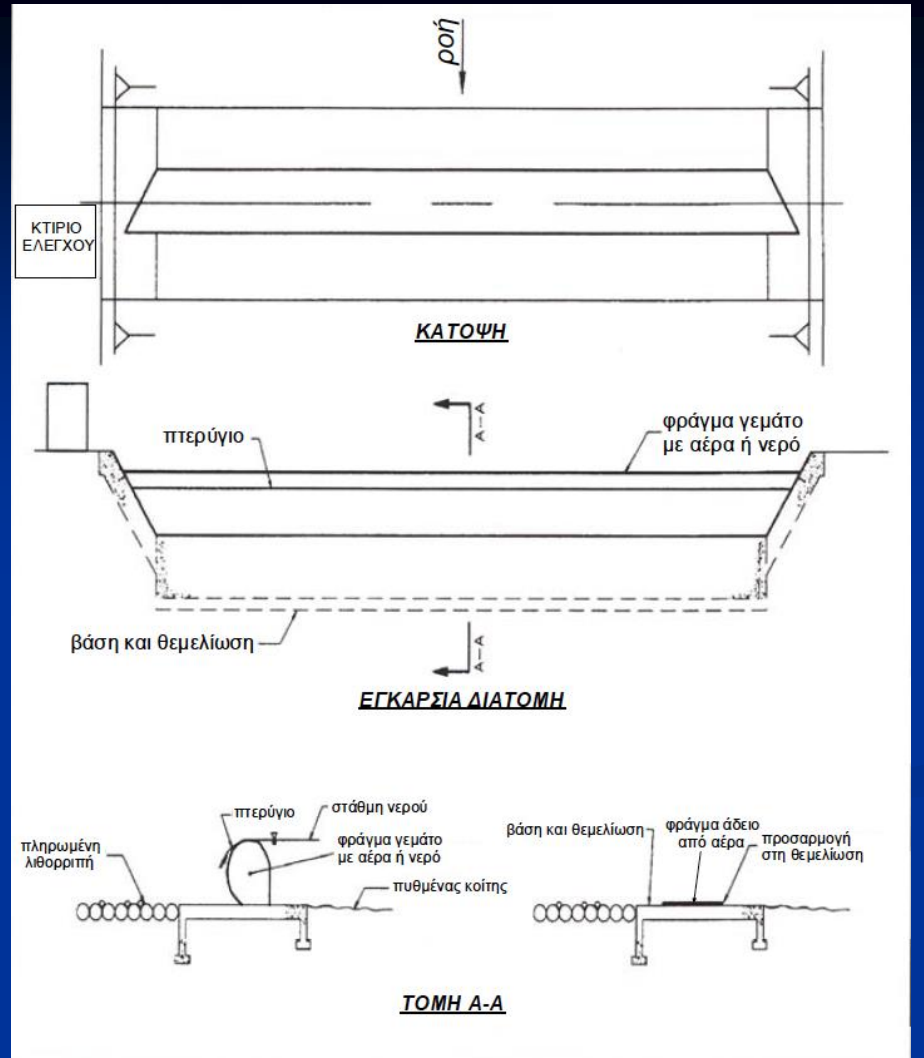
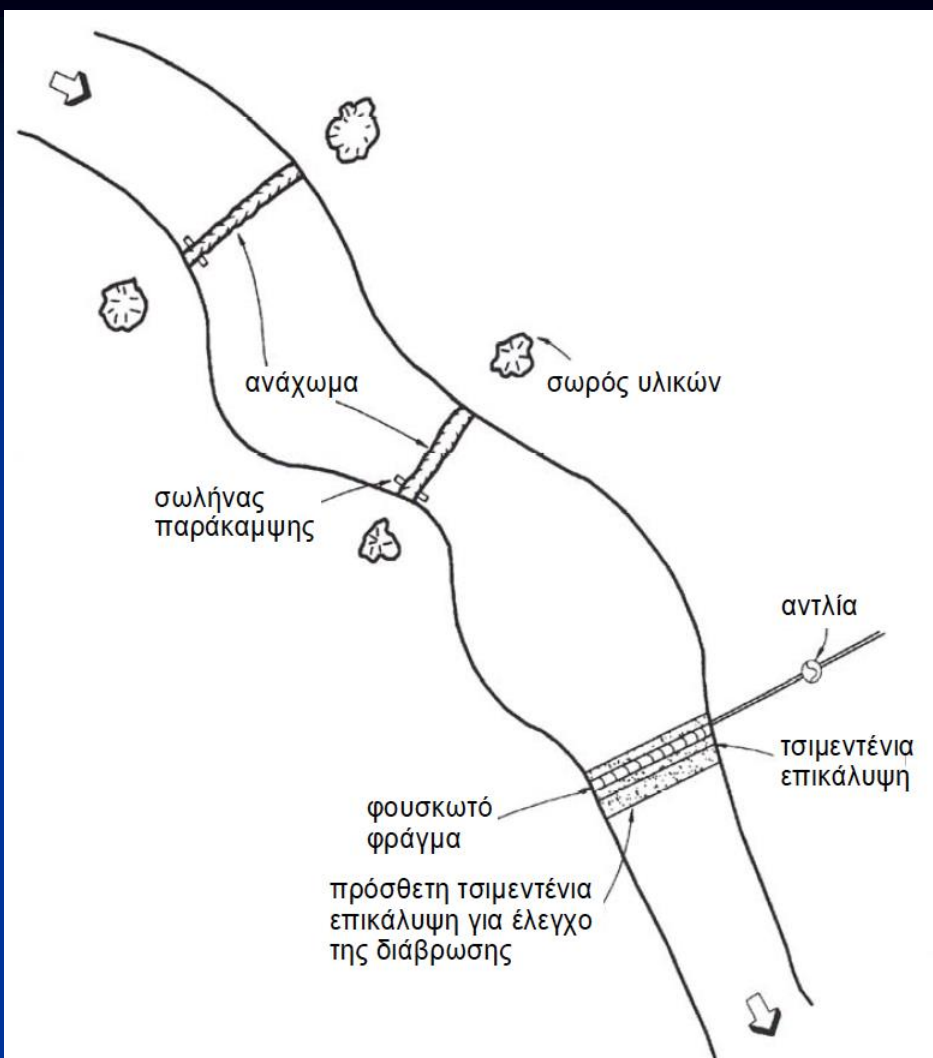




Διαδικασία κατασκευής διαφραγματικού τοίχου με διαφραγματική αρπάγη →



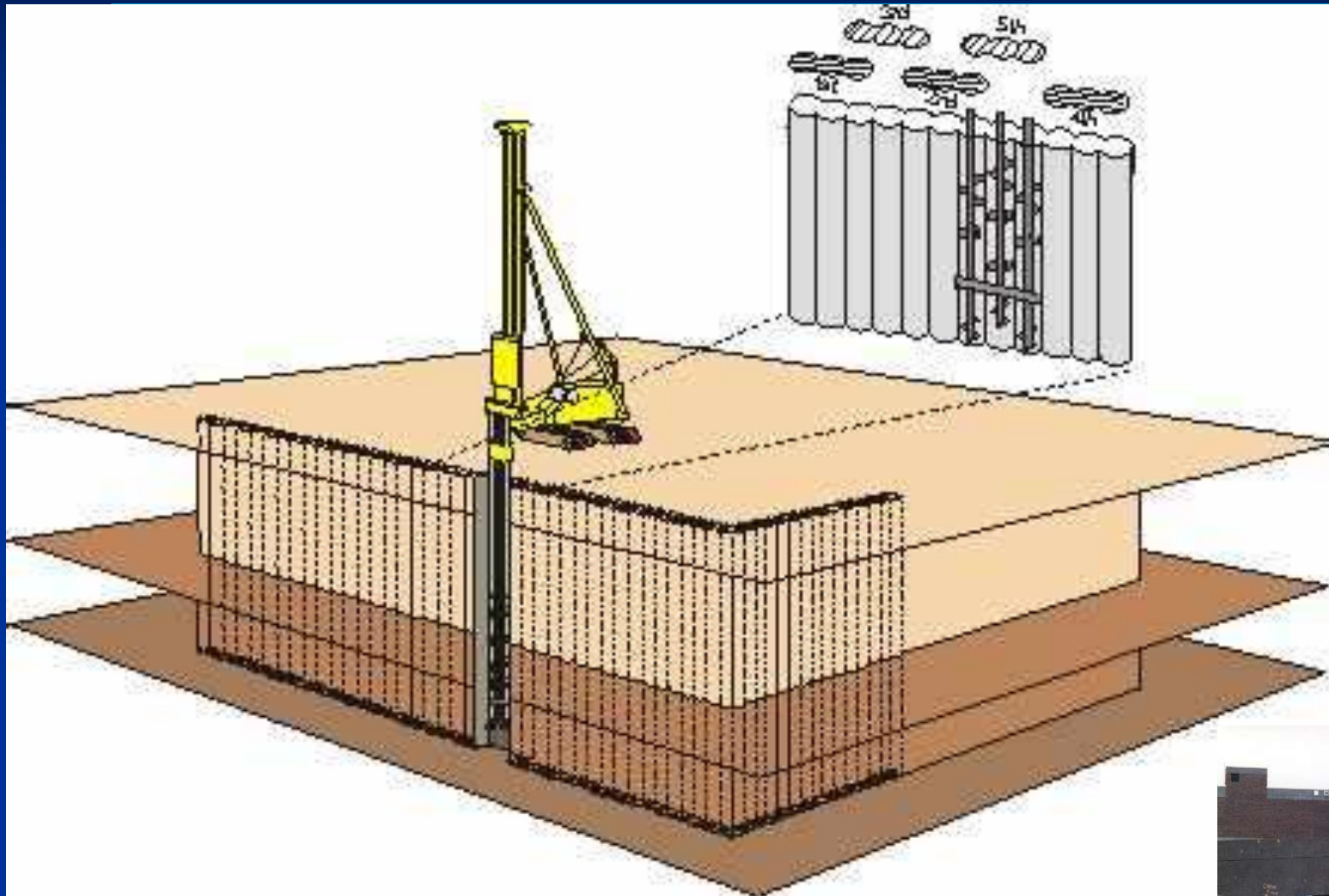
← Jet grouting



Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού σε χείμαρρο (ASCE, 2001).

Φουσκωτό φράγμα σε κάτοψη, εγκάρσια διατομή και σε κατάσταση γεμάτο με νερό και αέρα, όπως και σε κατάσταση άδειο από αέρα (ASCE, 2001).

# Δημιουργία τεχνητών υπόγειων φραγμών (Deep Soil Mixing, DSM)



Εφαρμογή  
τεχνολογιών για  
συγκράτηση  
ρυπασμένων  
εδαφών



Δημιουργία φυσικών φραγμών για την  
παρεμπόδιση της θαλάσσιας διείσδυσης



Στοιχεία υδρογεωλογικής έρευνας για τη διαχείριση παράκτιων υδροφόρων

(από Καλλιώρας, 2008, Kallioras et al., 2006)

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ - 1

- Γκιουγκής Ι., (2018). Διερεύνηση της θαλάσσιας διείσδυσης σε παράκτιους υδροφορείς σε δελταϊκό περιβάλλον. Η περίπτωση του Δέλτα του Ποταμού Νέστου. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη.
- Καλλέργης Γ., (2000). Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. Τόμος Β΄. Έκδοση Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
- Καλλιώρας Α., (2008). Διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων σε υδροφόρους που υπόκεινται σε καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης. Η περίπτωση του δυτικού παράκτιου τμήματος του Νομού Ροδόπης. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Δ.Π.Θ., Ξάνθη, 285 σελ.
- Appelo C.A.J., and D. Postma, (1993). Geochemistry, groundwater and pollution, A. A. Balkema, Rotterdam.
- ASCE, (1987). Ground Water Management. Third Edition, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No 40, New York.
- Fetter C.W., (1994). Applied hydrogeology, Macmillan College Publishing Company Inc., 3rd Edition.
- Goldberg E. D., Broecker W. S., Gross M. G., Turekian K. K., (1971). Marine Chemistry, in Radioactivity in the Marine Environment: Washington D. C., National Academy of Sciences, D, p. 137–146.
- Hem J.D., (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. 3rd ed., U.S. Geological Survey Water – Supply Paper 2254, 363p.
- Kallioras A., F. Pliakas, and I. Diamantis, (2006). Conceptual model of a coastal aquifer system in northern Greece and assessment of saline vulnerability due to seawater intrusion conditions. Environmental Geology, Springer, Vol. 51, No 3, pp. 349-361.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ - 2

- Oude Essink G.H.P., (2001). Density Dependent Groundwater Flow, Academic Publishing of Utrecht University, f. 12.50.
- Revelle, R., (1941). Criteria for recognition of sea water in ground-waters. Transactions of American Geophysical, Union, 22, pp. 593-597.
- Simpson T.R., (1946). Salinas Basin Investigation, Division of Water Resources, State of California, Sacramento, Bulletin, 52, pp. 138-139.
- Stuyfzand P.J., (1985). Hydrochemistry and hydrology of the dune area between Egmond and Wijk aan Zee (in Dutch). KIWA, SWE, 85.012, Nieuwegein.
- Stuyfzand P.J., (1993). Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands, Ph.D. Thessis, Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands, 366p.
- Todd D.K. and L.W. Mays, (2005). Groundwater Hydrology (3<sup>rd</sup> edition). John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.