



Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Γεωτεχνικής
ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ Ι

ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ

Β.Ν. Γεωργιάννου, Α. Ζερβός
Καθηγήτρια, Επ. Καθ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2/4/2024



ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΕΞΗΓΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

Κορεσμένο υλικό

Η **παρουσία του νερού** παίζει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά του εδαφικού υλικού.

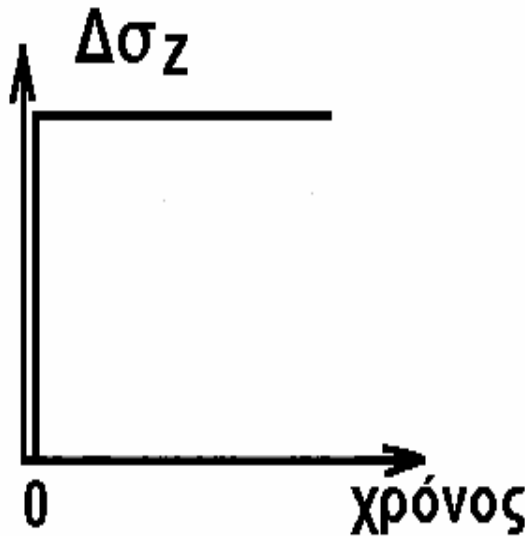
Αν το φορτίο επιβάλλεται σε **ξηρό** εδαφικό υλικό, το σύνολο του φορτίου αναλαμβάνεται **αυτόματα** από τον εδαφικό σκελετό, επομένως έχουμε παραμόρφωση και μεταβολή της ενεργού τάσης

Αν όμως το φορτίο επιβάλλεται σε **κορεσμένο** εδαφικό υλικό, οι κόκκοι δεν μπορούν να μετακινηθούν και να πλησιάσουν αφού οι μεταξύ τους θέσεις είναι γεμάτες με νερό που είναι ασυμπίεστο υλικό. Η ανάληψη του εξωτερικού φορτίου από τον εδαφικό σκελετό γίνεται **σταδιακά**.

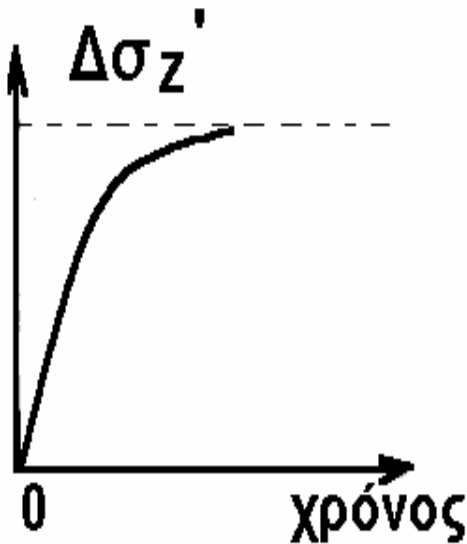
ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΕΞΗΓΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

Κορεσμένο υλικό

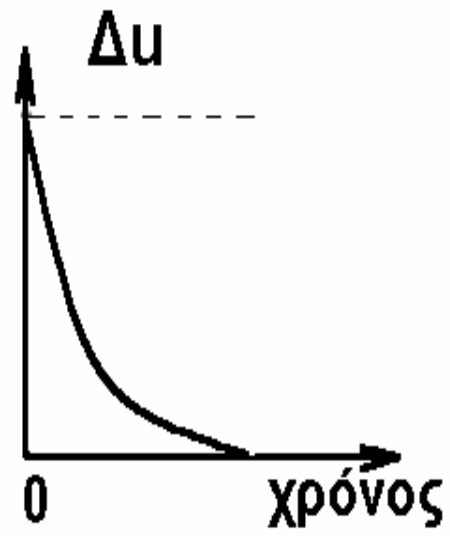
Μεταβολή κατ.
τάσης



Μεταβ. ενεργ. κατ.
τάσης

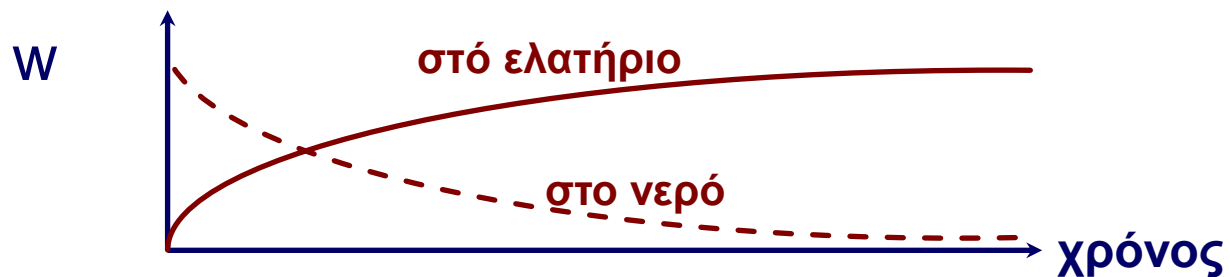
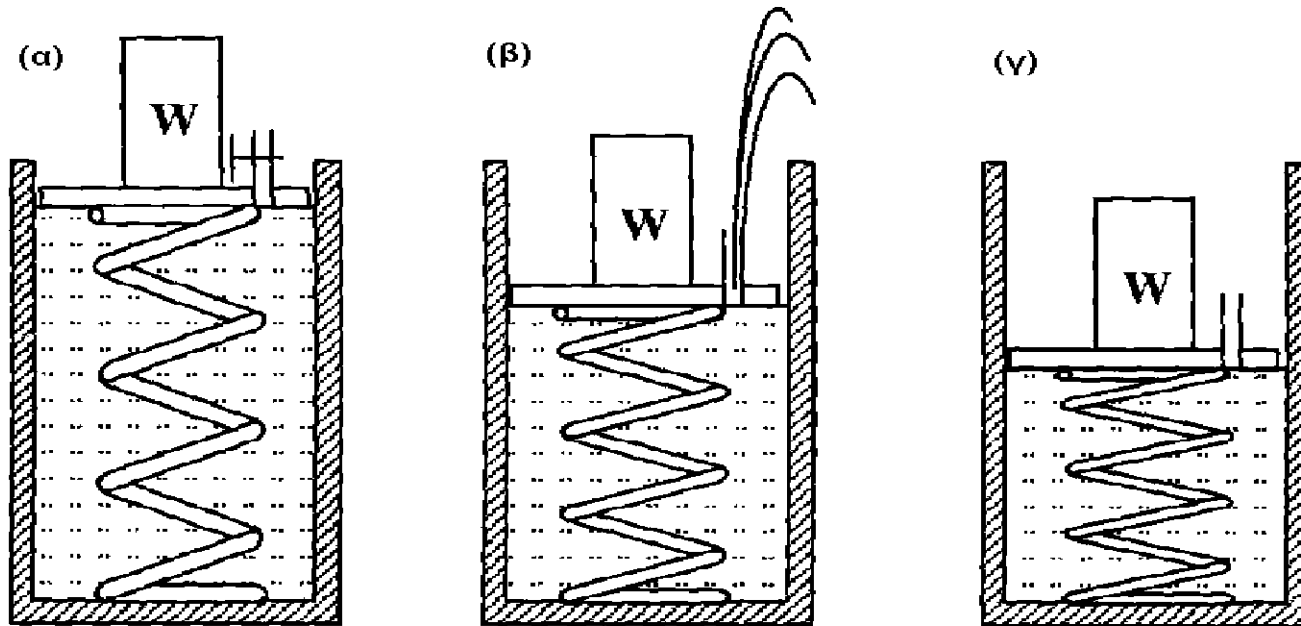


Μεταβολή πίεσης
πόρων νερού

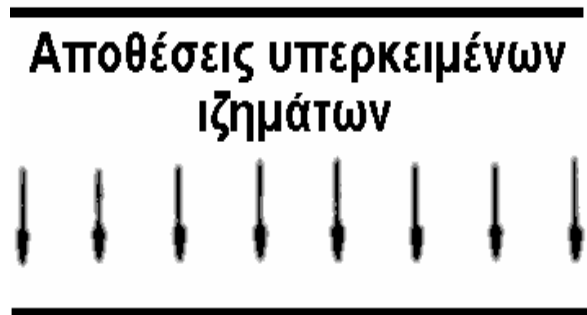


Επιβολή φόρτισης $\Delta\sigma_z$ στο χρόνο $t=0$

Υδρομηχανικό ανάλογο στερεοποίησης εδαφών



ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ



□ εδαφικό
στοιχείο

(α)

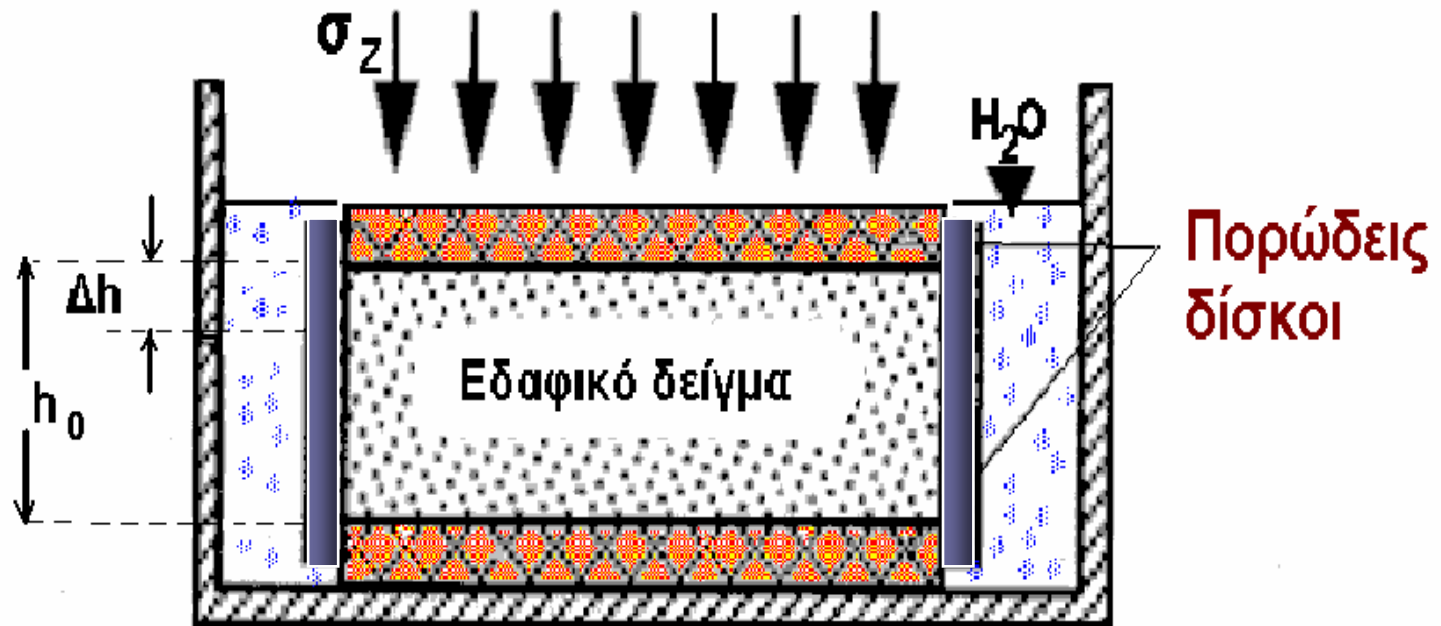


□ □ εδαφικό
στοιχείο

↓ ↑ παραμόρφωση
εδαφικού στοιχ.

(β)

1-ΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ



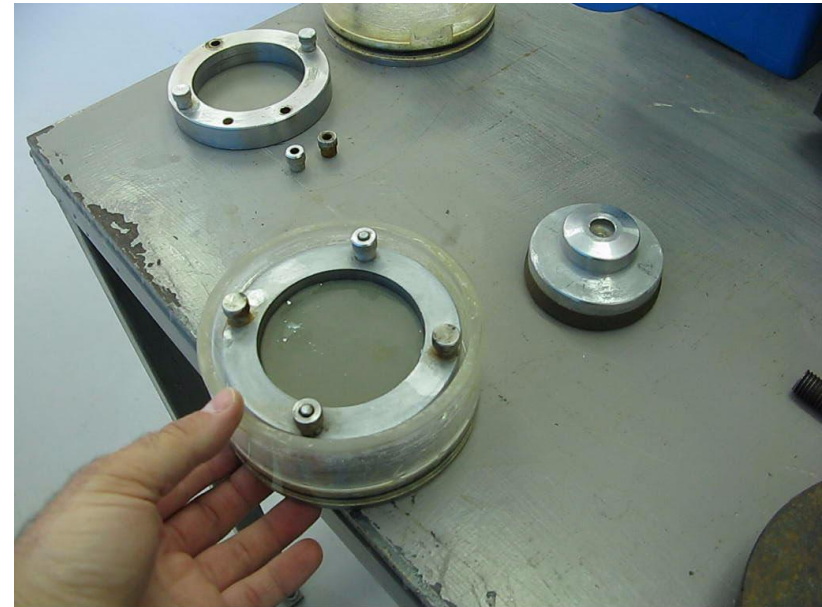
$$\varepsilon_z = \frac{\Delta h}{h_0}$$

→ στο πεδίο???

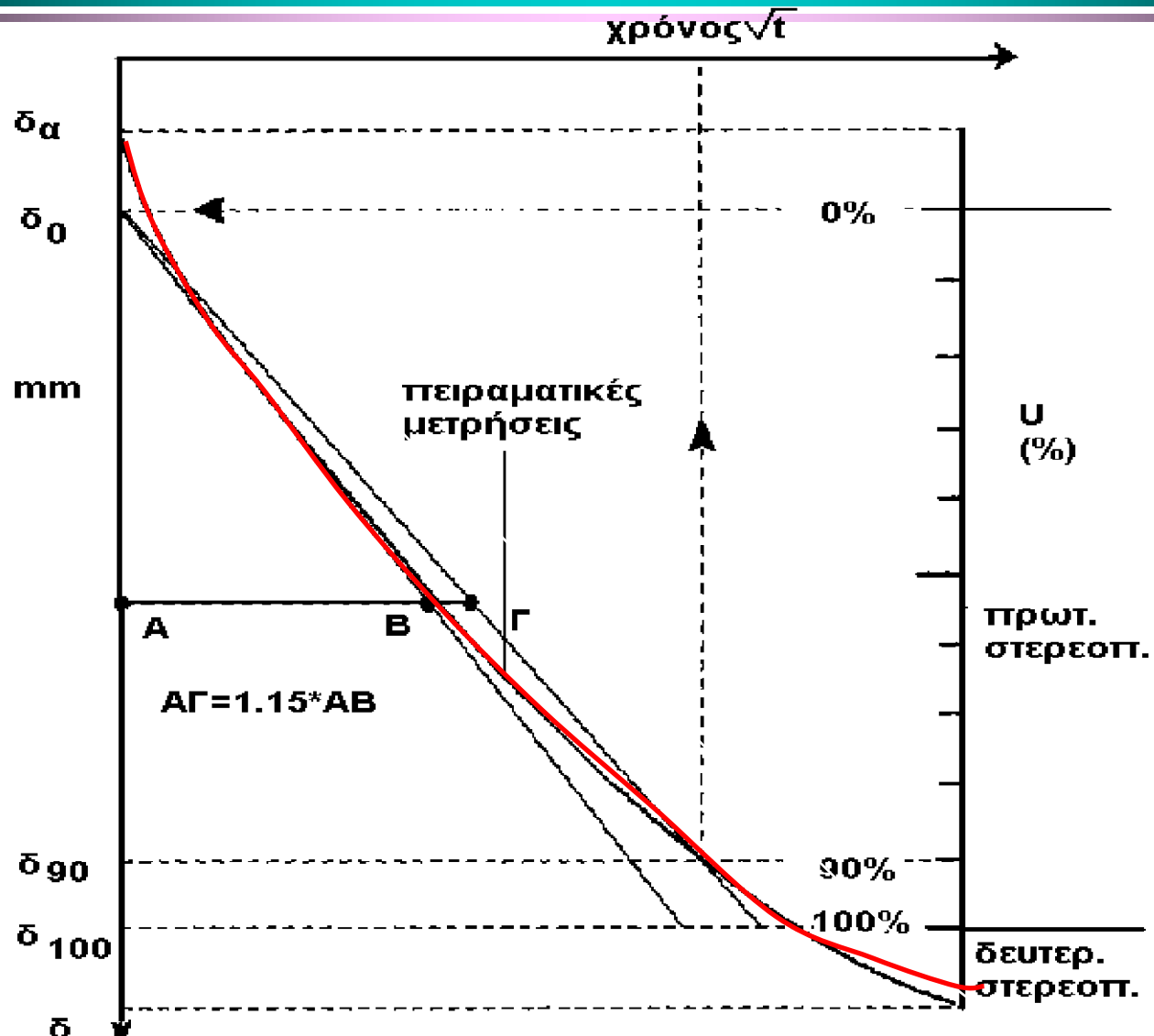


ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ

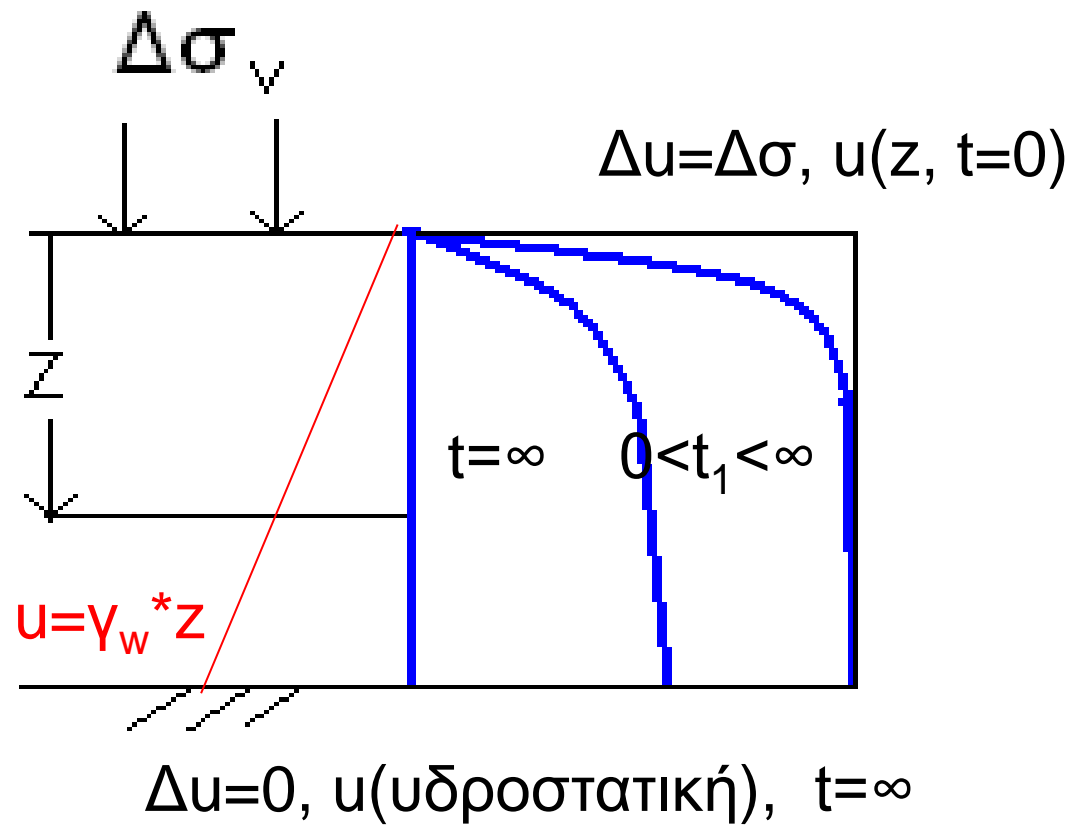
- Σκοπός του πειράματος: να μελετηθεί η σχέση τάσεων παραμορφώσεων υλικών με σχετικά μικρή διαπερατότητα (άργιλοι, ιλείς).
- Μετρήσεις:
 - επιβαλλόμενη τάση
 - παραμόρφωση δοκιμίου
 - χρόνος
- Δοκίμιο:
 - διαστάσεις $d=75\text{mm}$, $h=20\text{mm}$
 - τοποθετείται σε μεταλλικό δακτύλιο
 - καλύπτεται με νερό
- Φόρτιση: οι επιβαλλόμενες τάσεις αυξάνονται λογαριθμικά στη μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνονται γρήγορα π.χ. 50,100,200,400,800 και 400,50, πρέπει να καλύπτουν το εύρος που αναμένεται στο αντίστοιχο φυσικό πρόβλημα και τέλος το κάθε φορτίο επιβάλλεται για όσο χρόνο απαιτεί η ολοκλήρωση της στερεοποίησης.



ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Υπερπίεση νερού των πόρων Δu (kPa)



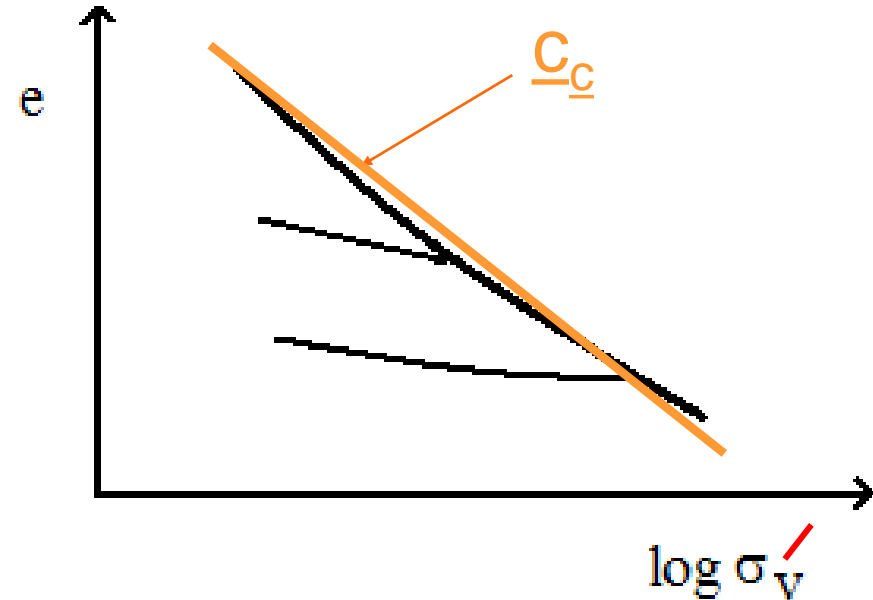
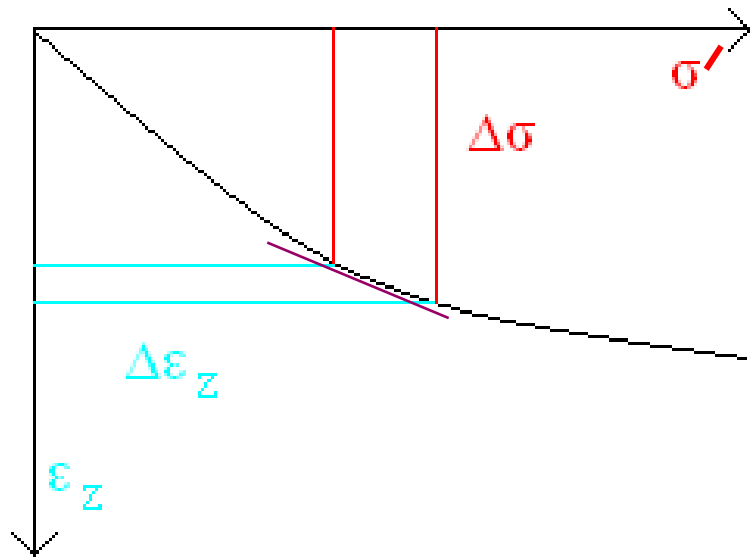
Σχέση ορθής παραμόρφωσης ε_z δείκτη πόρων e

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad \&$$
$$\varepsilon_v = \frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{V_0/V_s - V/V_s}{V_0/V_s} = \frac{e_0 - e}{1 + e_0} \rightarrow$$
$$\Delta e = \varepsilon_v * (1 + e_0) = \frac{\Delta h}{h_0} * (1 + e_0) \rightarrow$$
$$\varepsilon_z = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

Όπου V_0 , V αρχική και παρούσα τιμή του όγκου του δοκιμίου, V_s όγκος στερεών κόκκων, e_0 , e αρχική και παρούσα τιμή δείκτη πόρων δοκιμίου και $\varepsilon_x = \varepsilon_y$ αξονική και ογκομετρική παραμόρφωση δοκιμίου

Σχέση ορθής παραμόρφωσης ε_z δείκτη πόρων

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \Delta h/h_0 = \Delta e/(1+e_0)$$

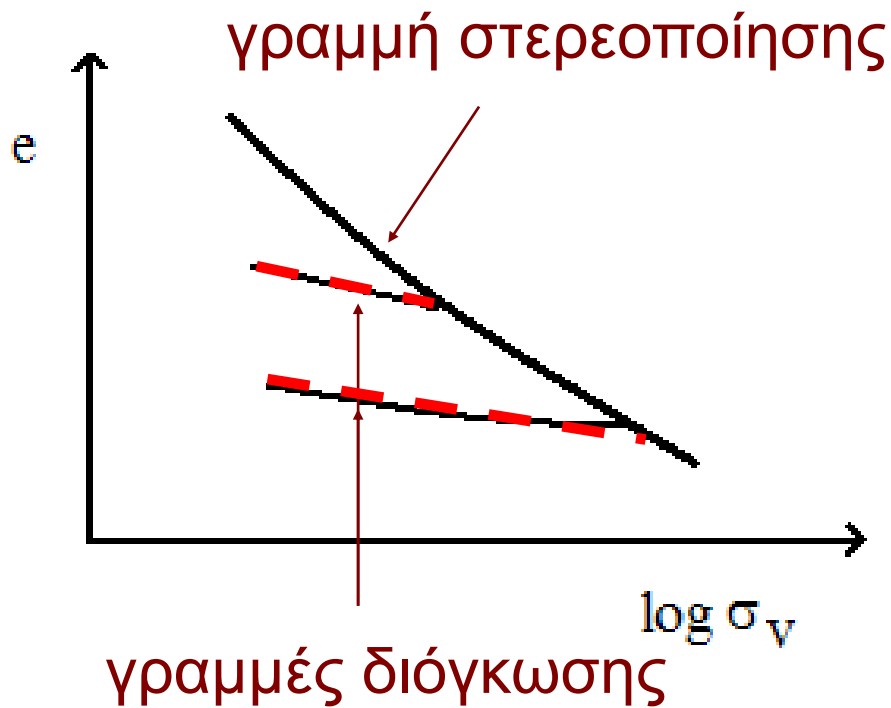


Μετρο
1-διάστατης = $D = \Delta \sigma / \varepsilon_z$
συμπίεσης

Καθιζήσεις: $\Delta h = h_0 * \Delta \sigma / D$ ή

$$\Delta h = h_0 * c_c / (1 + e_0) * \Delta \log \sigma'_v$$

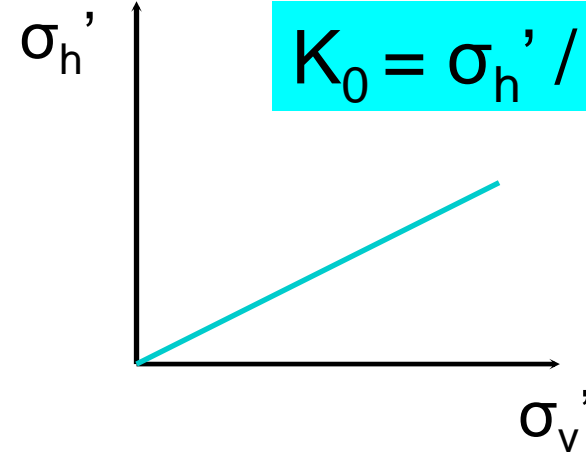
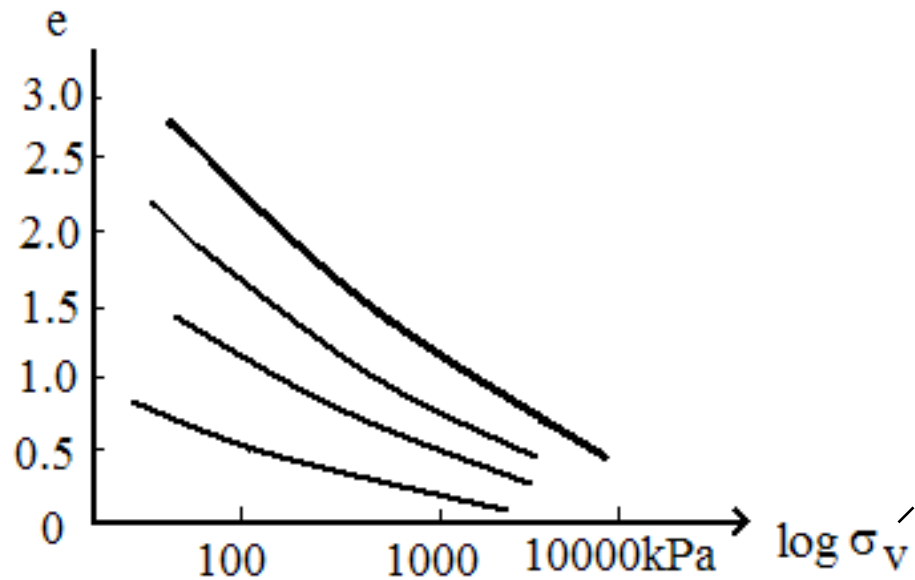
γραμμές στερεοποίησης & διόγκωσης



ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ εδαφικών υλικών



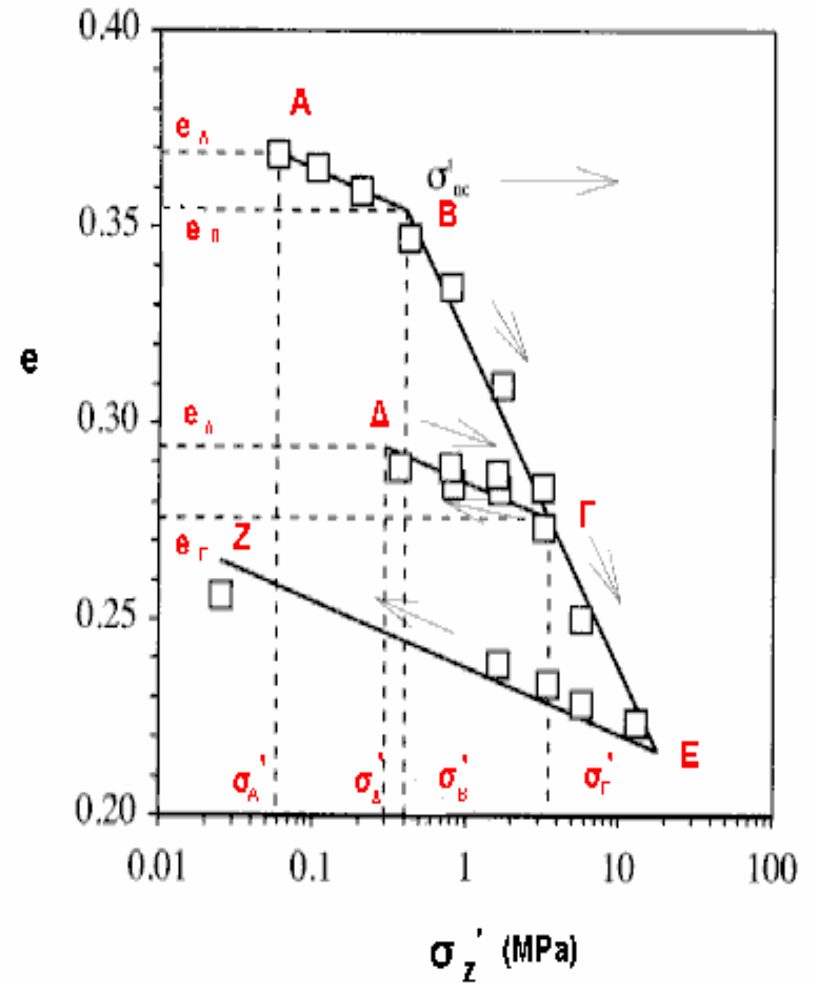
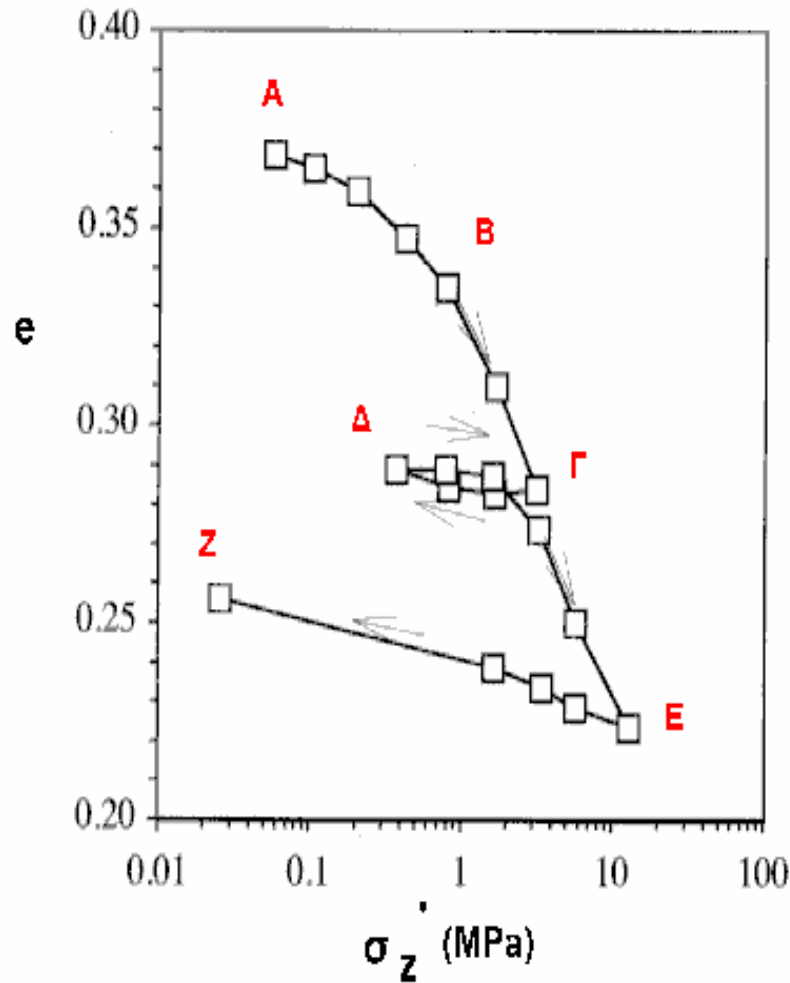
σ_h'



$$K_0 = \sigma_h' / \sigma_v'$$

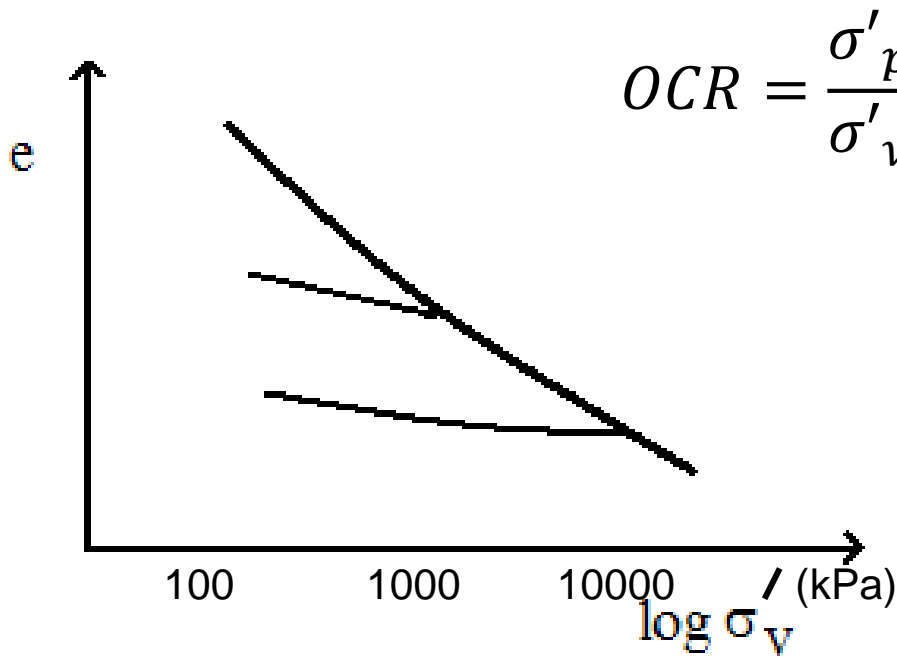
Κανονικώς φορτισμένα εδαφικά υλικά

ΤΥΠΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ



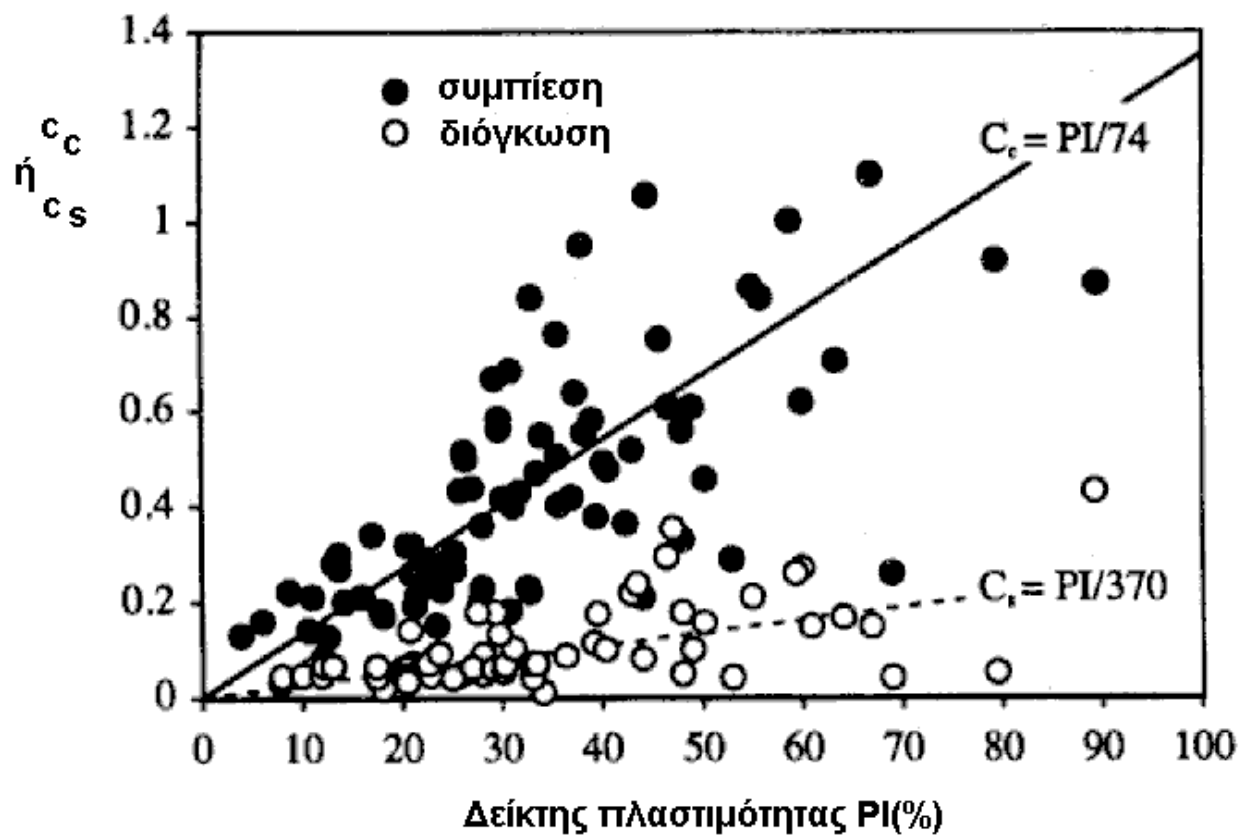
ΠΡΟΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Πώς θα αναγνωρίσουμε αν ένα υλικό είναι κανονικώς στερεοποιημένο ??

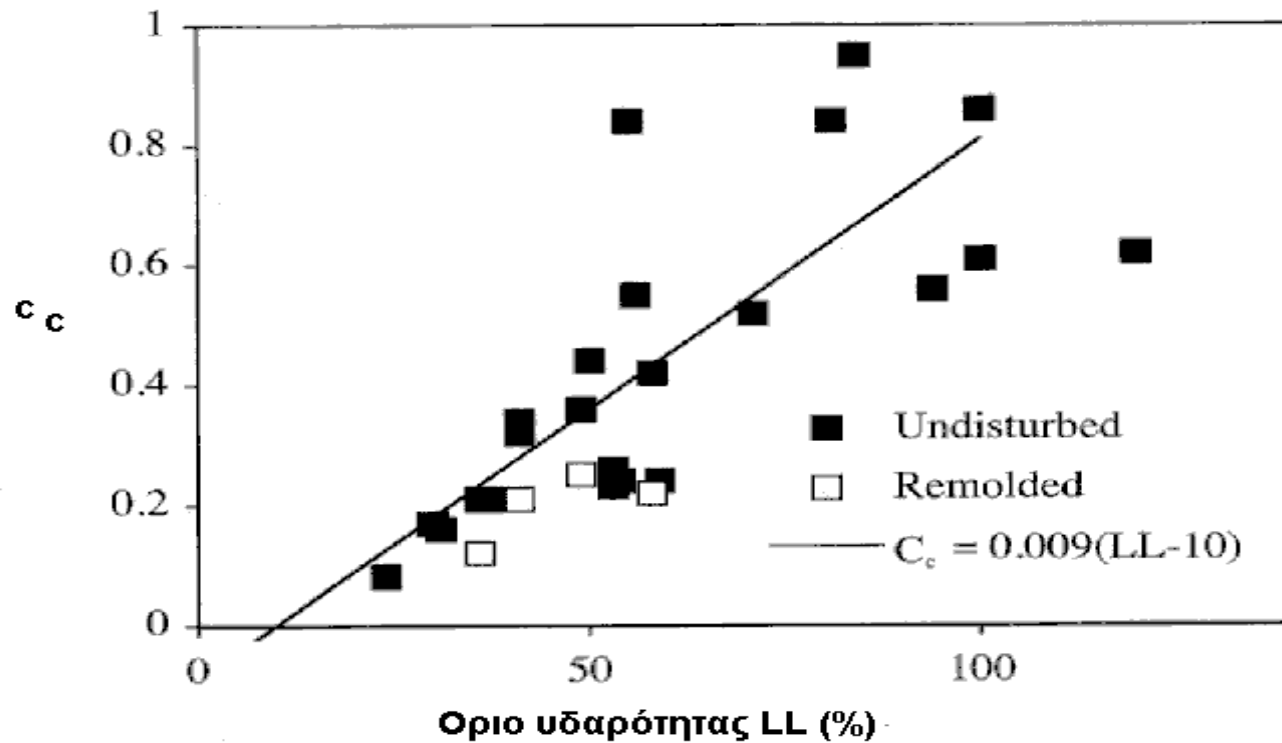


Κανονικώς στερεοποιημένο, χαλαρό

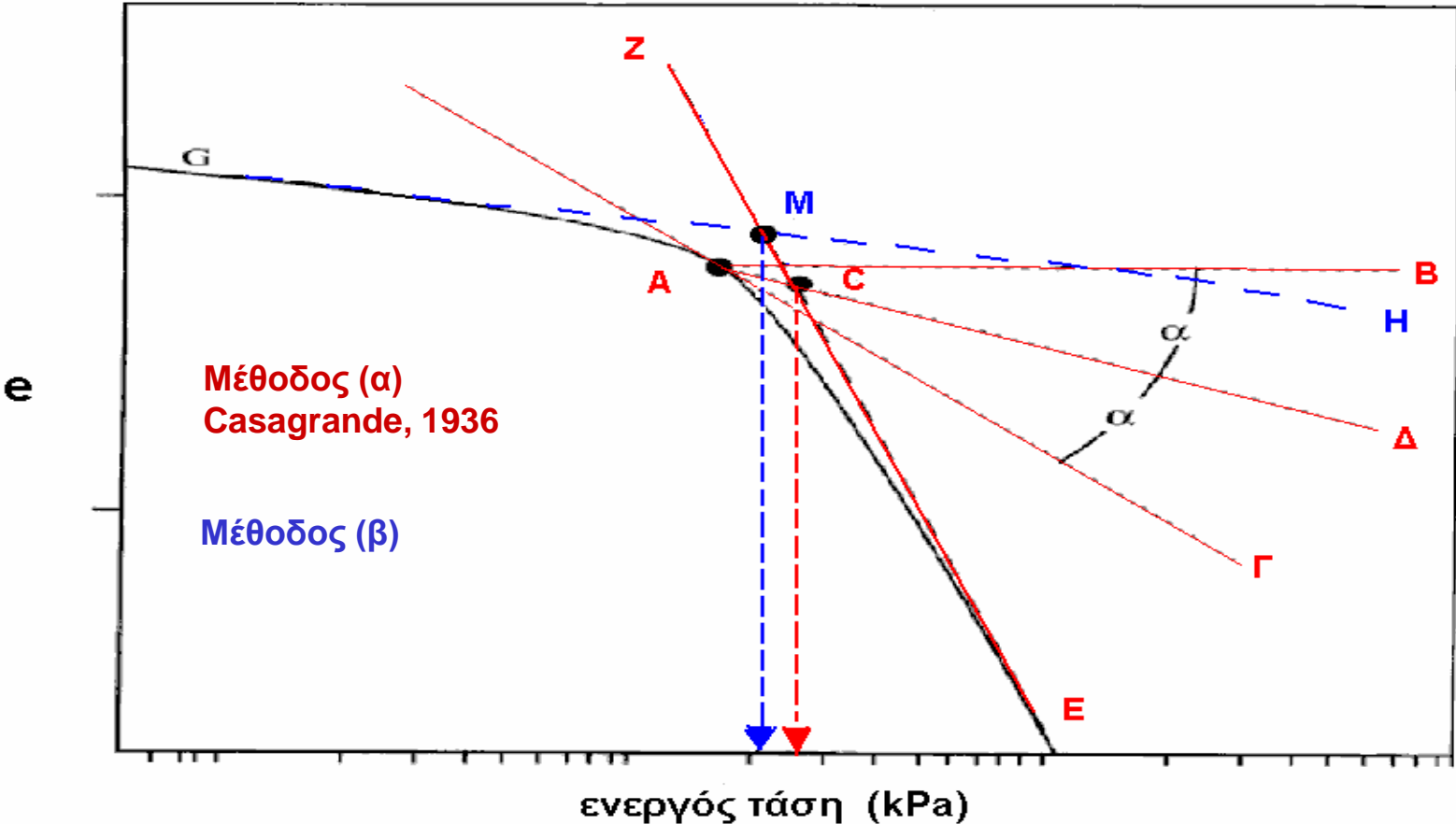
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ



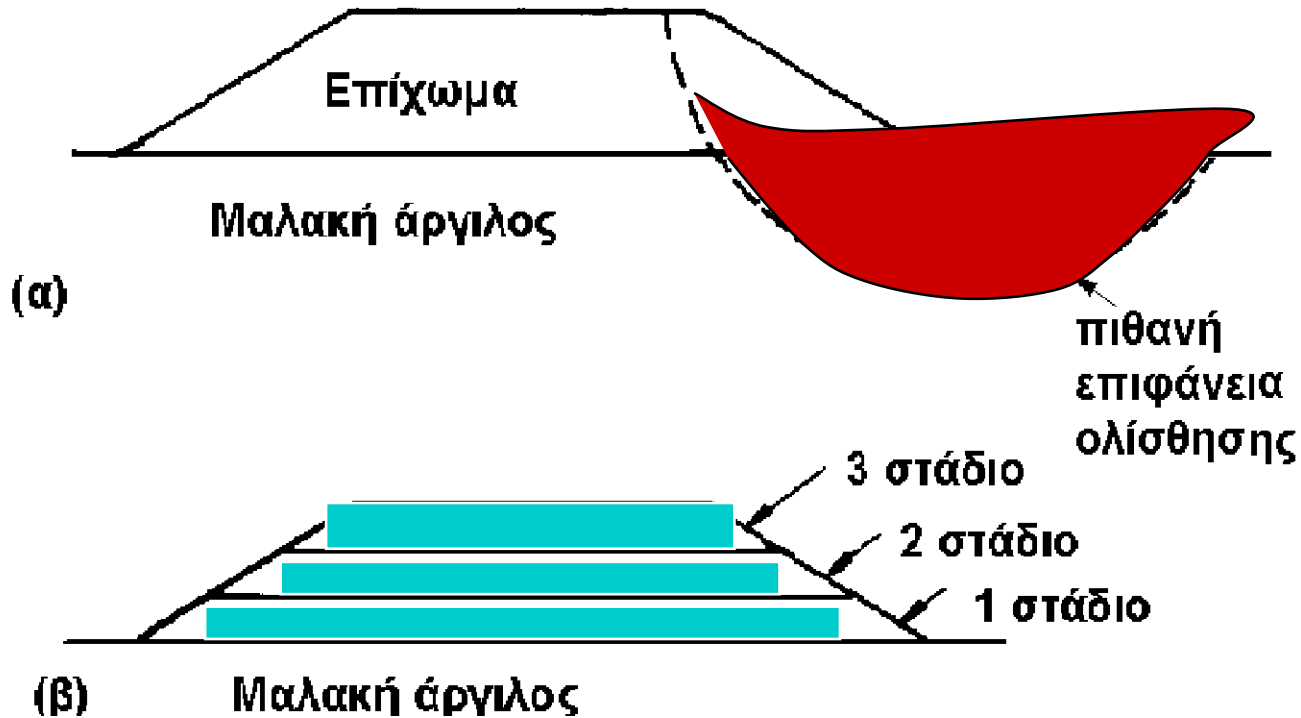
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ



ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΠΡΟΦΟΡΤΙΣΗΣ



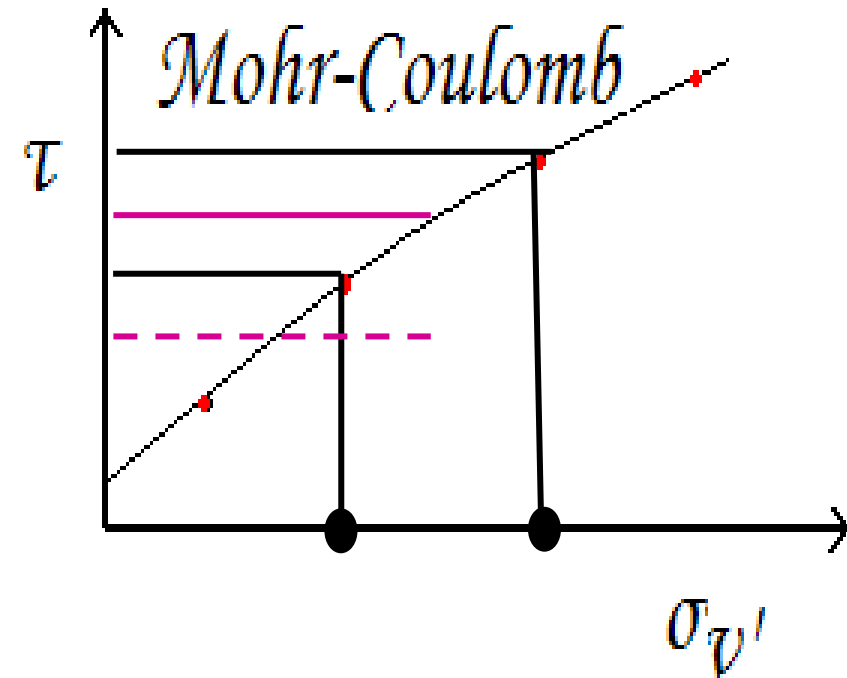
Χρονική εξέλιξη καθιζήσεων της φορτιζόμενης επιφάνειας



(α) Ταχεία κατασκευή επιχώματος

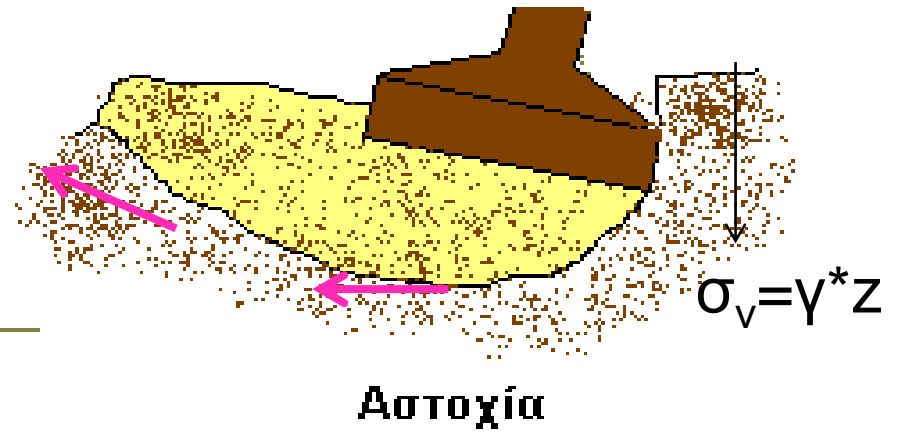
(β) Σταδιακή κατασκευή επιχώματος

Mohr-Coulomb κριτήριο αστοχίας



N

N'



Αστοχία

ΘΕΩΡΙΑ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

- Το εδαφικό υλικό είναι πλήρως κορεσμένο.
- Οι στερεοί κόκκοι και το νερό των πόρων είναι ασυμπίεστα.
- Το εδαφικό υλικό είναι ομοιογενές συμπεριφέρεται ελαστικά και εμποδίζεται η πλευρική του παραμόρφωση.
- Η υδατική ροή διαμέσου των πόρων είναι μονοδιάστατη και διέπεται από τον νόμο του Darcy με ισότροπη και σταθερή διαπερατότητα.

Μαθηματική ανάλυση μονοδιάστατης στερεοποίησης

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial u}{\partial t}$$

**ΕΞΙΣΩΣΗ
ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ
ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ**

$$c_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w}$$

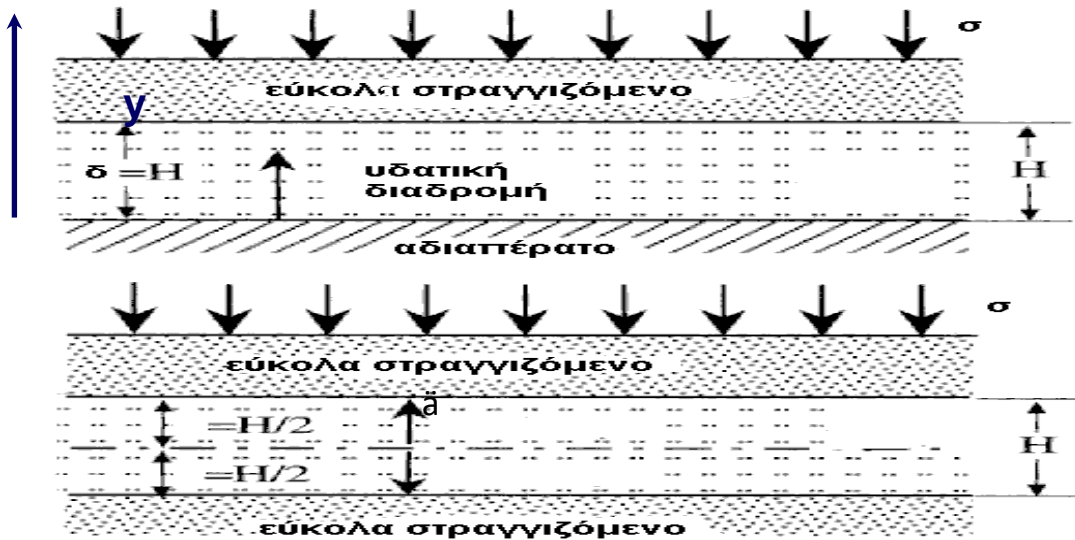
όπου c_v = συντελεστής στερεοποίησης

k = διαπερατότητα εδάφους

$u = 1$ υπερπίεση του νερού των πόρων

$m_v = \frac{1}{D}$ = συντελεστής μονοδιάστατης συμπίεσης

ΜΗΚΟΣ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ



Αρχικές συνθήκες

$$u(y, 0) = u_{\text{αρχ}} = \Delta\sigma_v, \quad 0 < y < H$$

Συνοριακές συνθήκες

$$u(0, t) = u(H, t) = 0, \quad t > 0$$

δ = μήκος μέγιστης

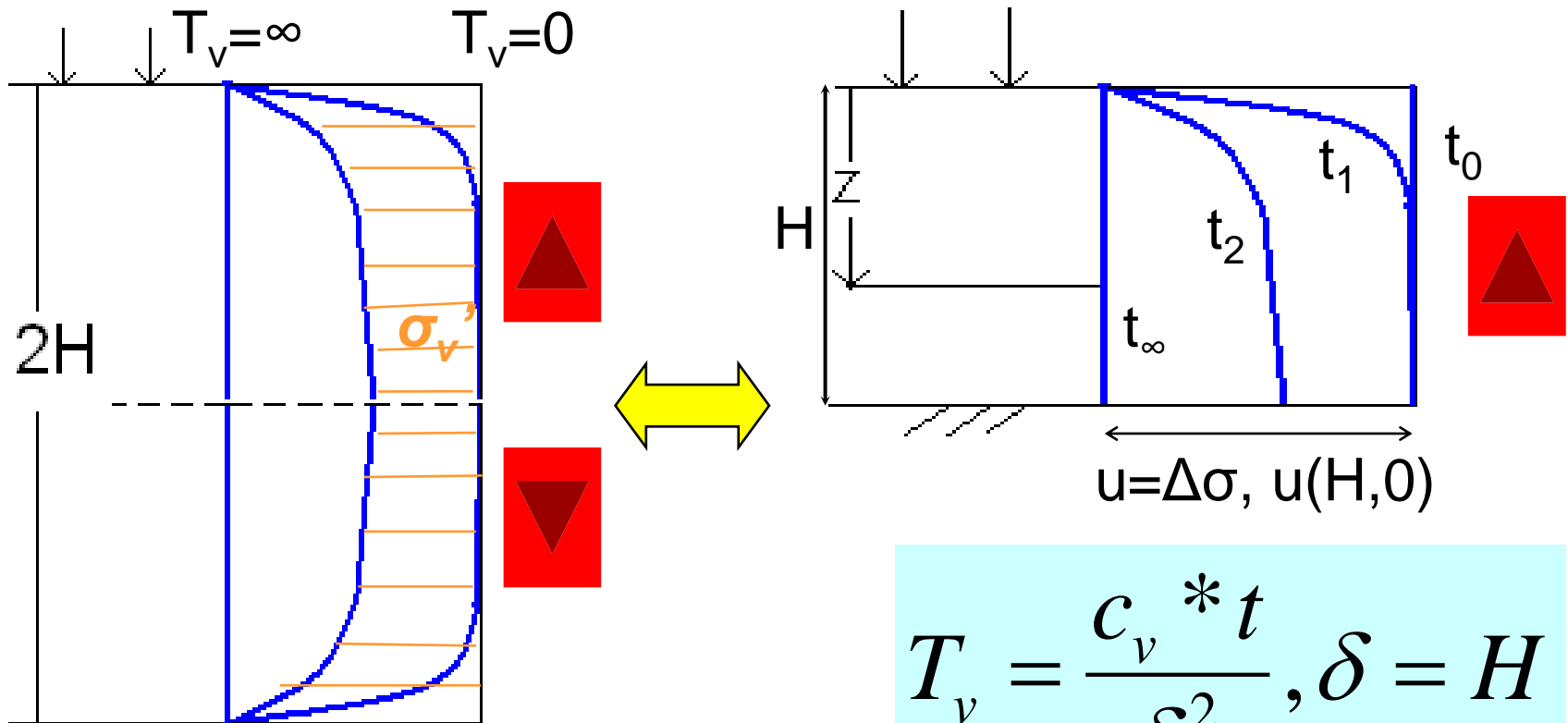
υδατικής διαδρομής

$$T_v = \frac{c_v * t}{\delta^2}$$

$$u(y, t) = u_{\text{αρχ}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)\pi} \sin\left((2n+1)\pi \frac{y}{H}\right) e^{-\frac{((2n+1)\pi)^2}{4} * T_v}$$

Ισόχρονες καμπύλες: $u(y,t)$

Καθιζήσεις ?



$$T_v = \frac{c_v * t}{\delta^2}, \delta = H$$

ΒΑΘΜΟΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ – ΧΡΟΝΙΚΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ

Αρχή στερεοποίησης

$$\Delta\sigma'(y, t) = 0 \text{ και } u(y, t) = u_{\text{αρχ}}$$

Τέλος στερεοποίησης

$$\Delta\sigma'(y, t) = \Delta\sigma \text{ και } u(y, t) = 0$$

Βαθμός στερεοποίησης

$$U y = \frac{u_{\text{αρχ}} - u(y, t)}{\Delta\sigma} = \frac{\Delta\sigma'(y, t)}{\Delta\sigma}$$

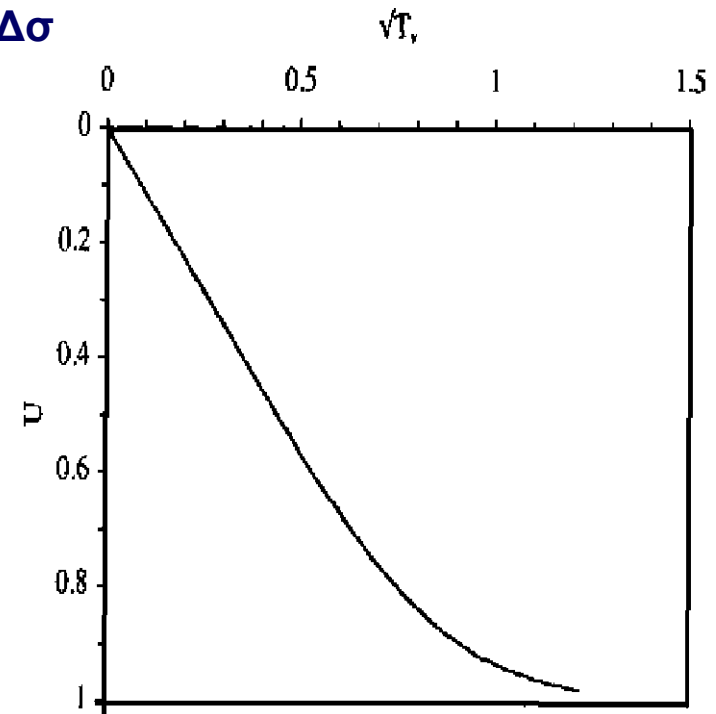
όπου $U y = 0$ στην αρχή της στερεοποίησης

και $U y = 1$ στο τέλος της στερεοποίησης

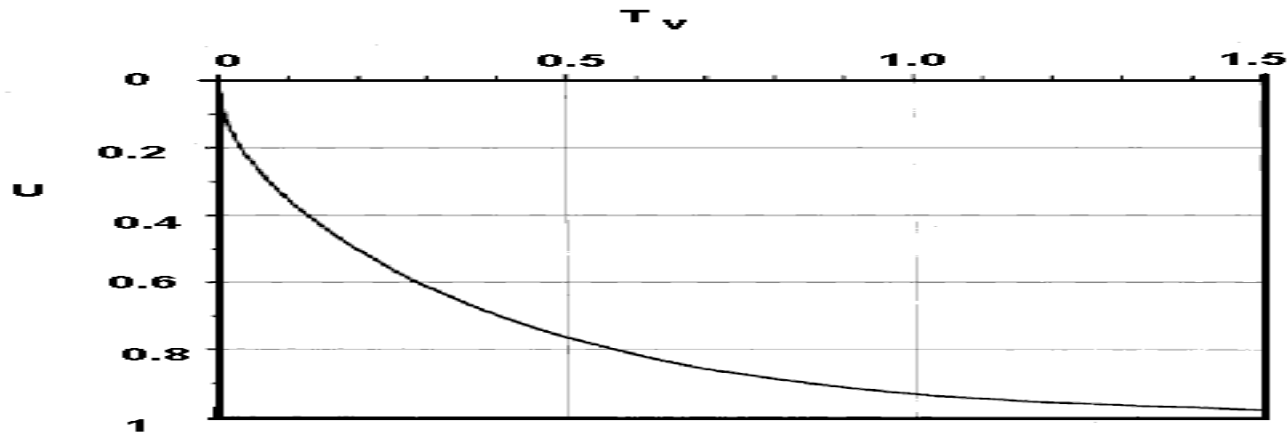
ο μέσος βαθμός στερεοποίησης $U = \frac{1}{H} \int_0^H U y \, dy$ είναι

συνάρτηση του $T_v = \frac{c_v \cdot t}{H^2}$ όπως φαίνεται

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-m^2 \pi^2 T_v / 4}}{m^2}$$

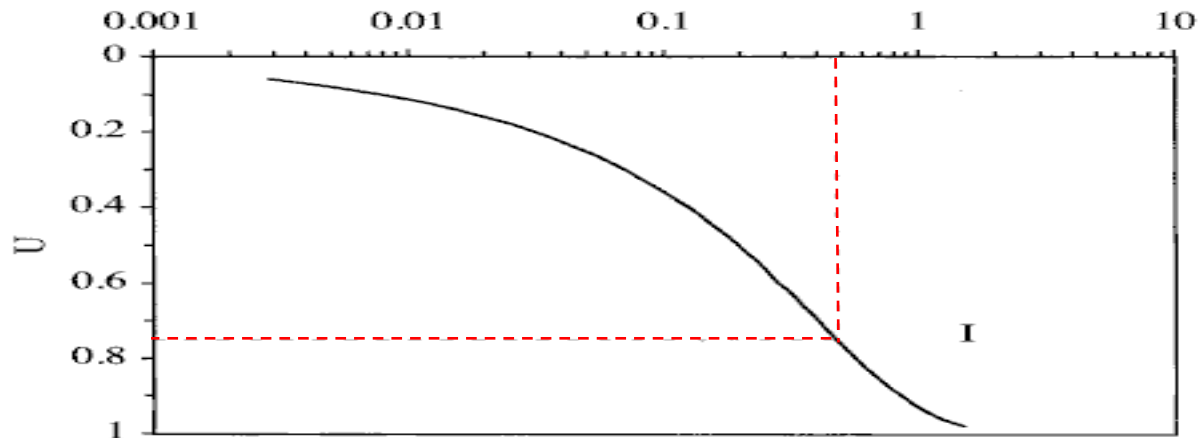


ΒΑΘΜΟΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ – ΧΡΟΝΙΚΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ



$$T_1(U) = \pi/4 * (U^2), \quad U < 0.6$$

$$T_2(U) = -0.085 - 0.933 \log(1-U), \quad U > 0.6$$

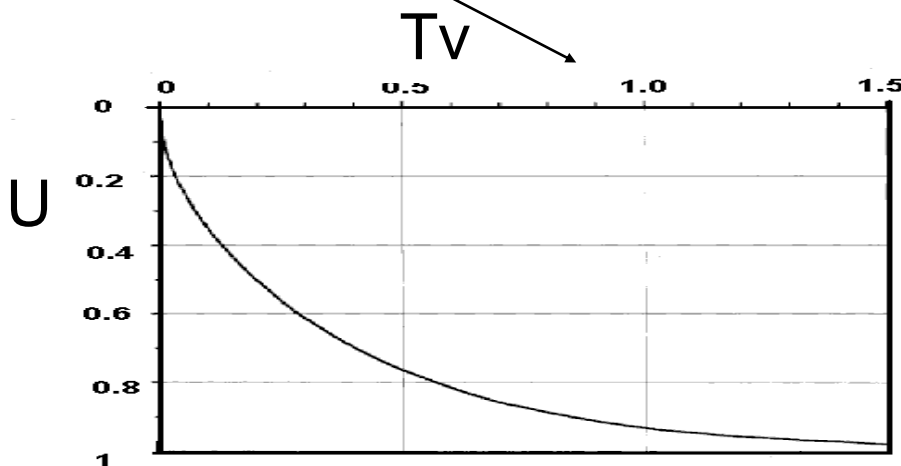


ΧΡΟΝΟΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ εδαφικής στρώσης

$$T_v = \frac{c_v * t}{\delta^2}$$

• χρόνος ολοκλήρωσης (90%)
στερεοποίησης εδαφικής
στρώσης

• πάχος εδαφικής στρώσης



$$T_1(U) = \pi/4 * (U^2), \quad U < 0.6$$

$$T_2(U) = -0.085 - 0.933 \log(1-U), \quad U > 0.6$$

χρόνος \sqrt{t}

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

δ_a

δ_0

mm

Πειραματικές
μετρήσεις

A

B

Γ

$$A\Gamma = 1.15 \cdot AB$$

δ_{90}

δ_{100}

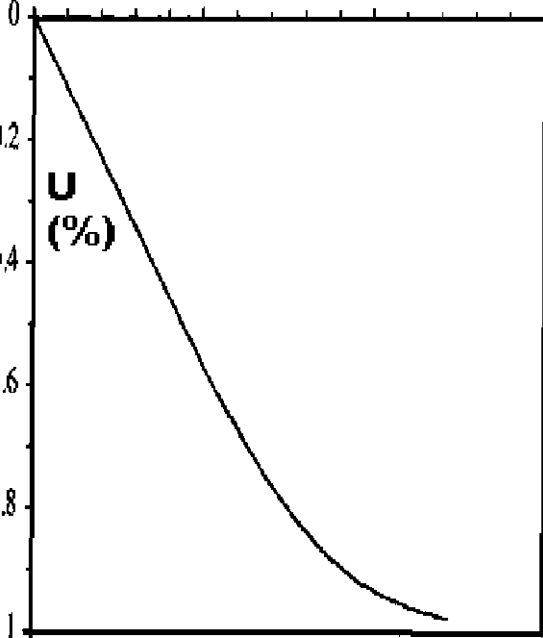
90%

100%

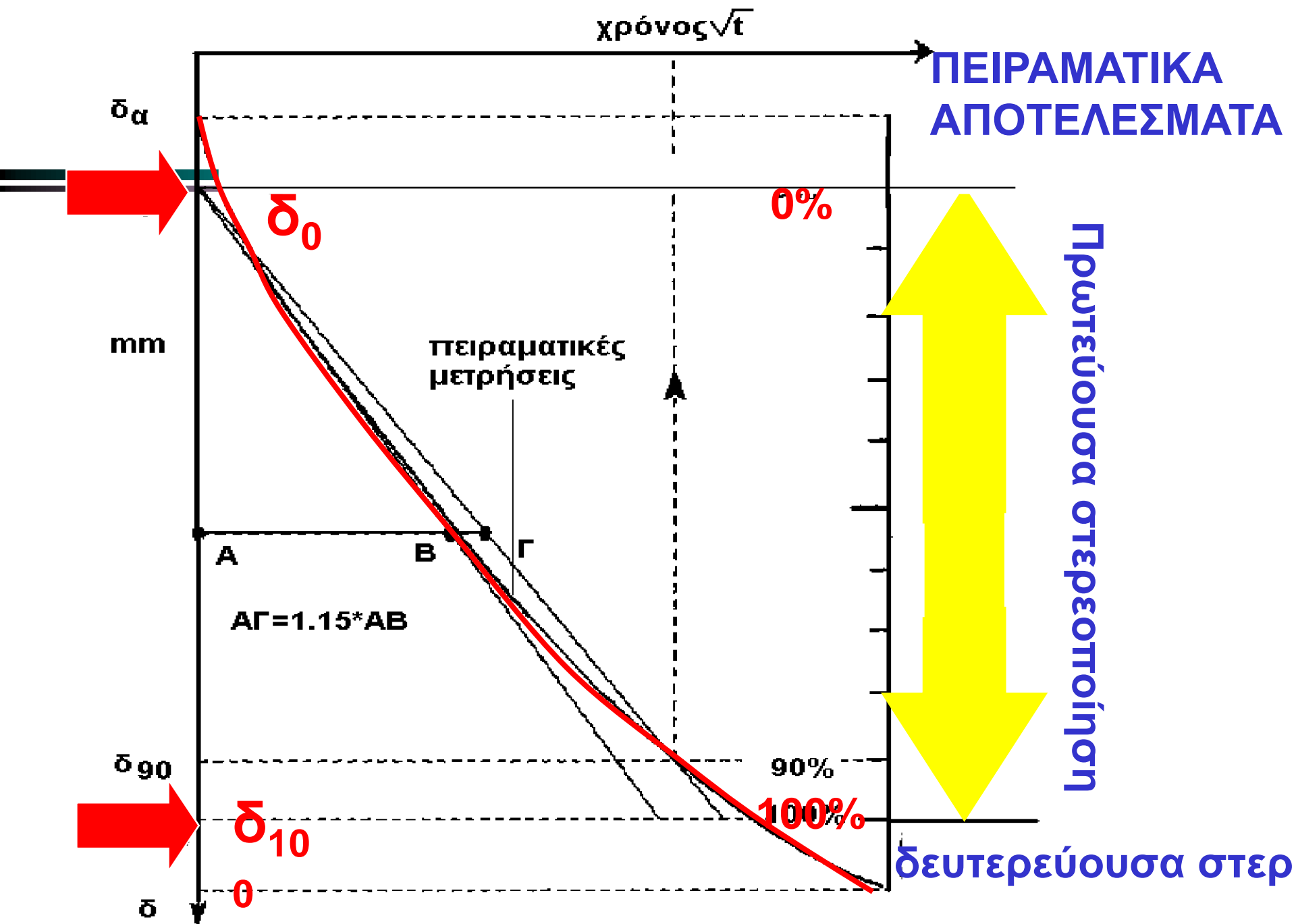
δ

$\sqrt{t_v}$

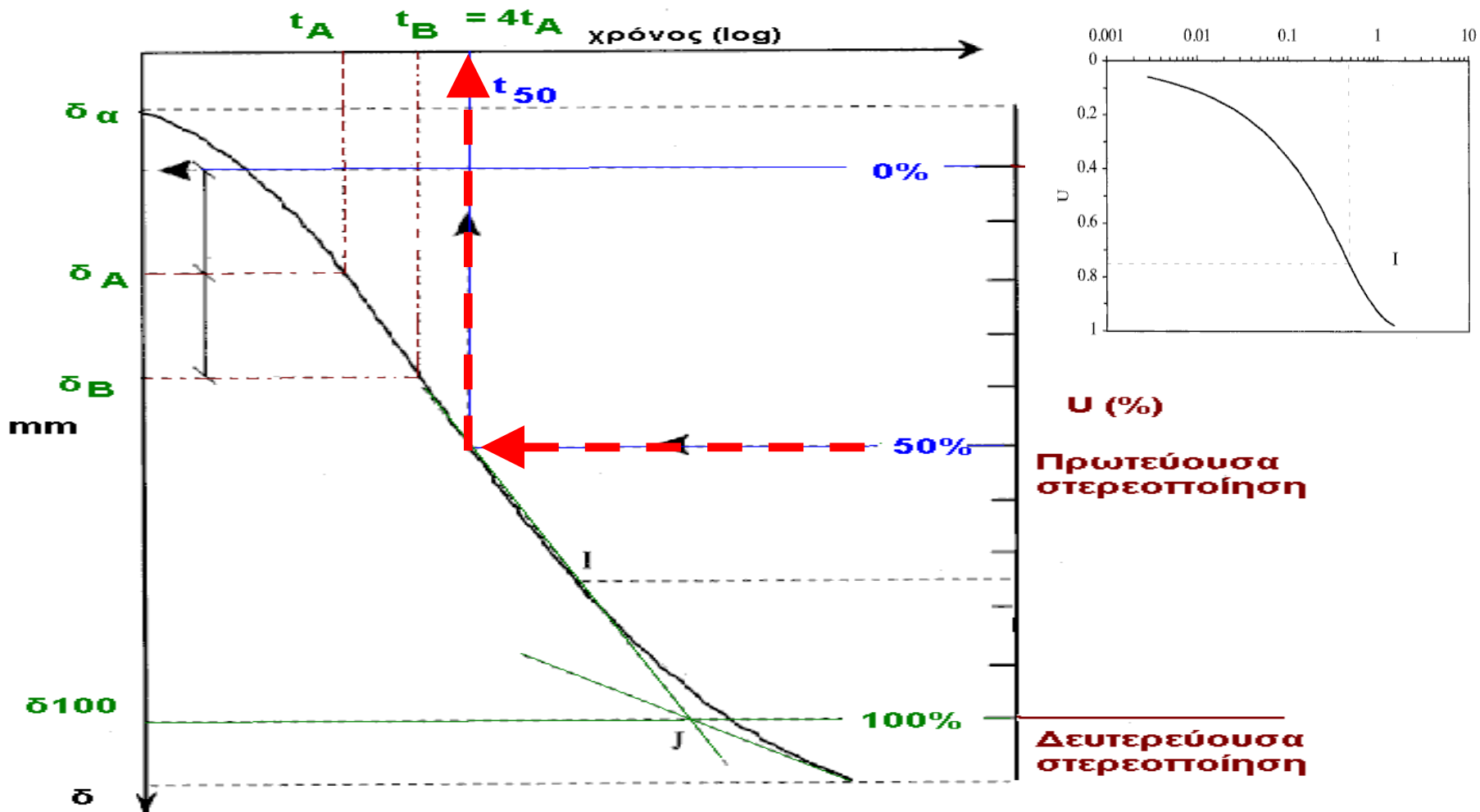
0 0.5 1 1.5



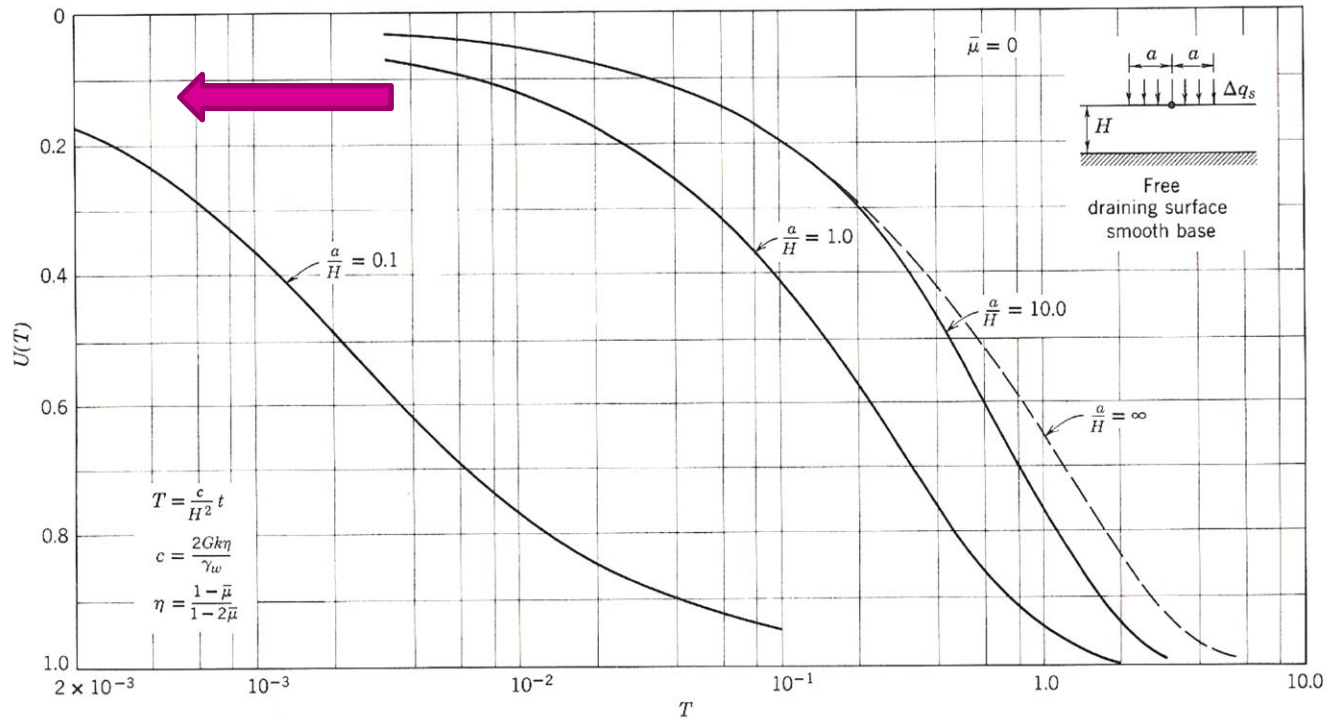
θεωρητική
καμπύλη $U - \sqrt{t_v}$



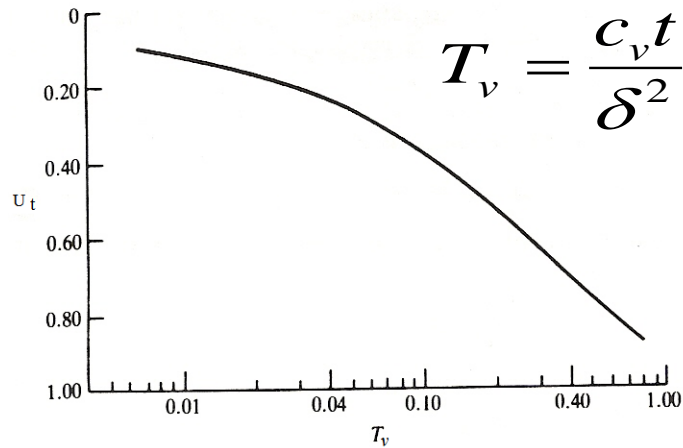
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



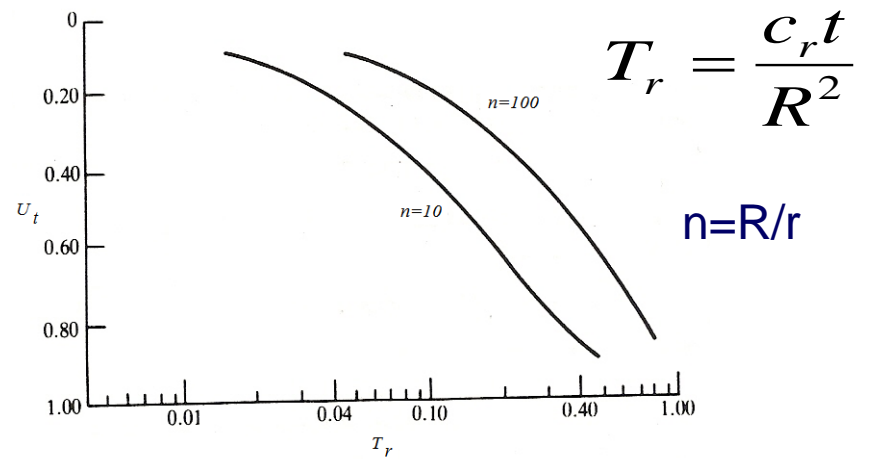
Στερεοποίηση κάτω από κυκλικό θεμέλιο- σχέση μεταξύ U_t και T_v



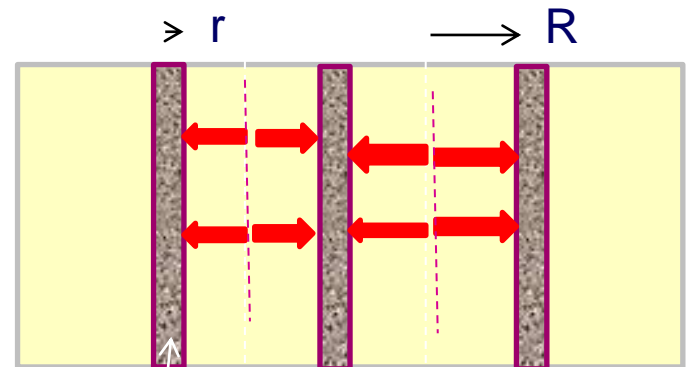
Μονοδιάστατη και ακτινική στερεοποίηση



Μονοδιάστατη στερεοποίηση (Taylor, 1948)



Ακτινική στερεοποίηση (Barron, 1948)



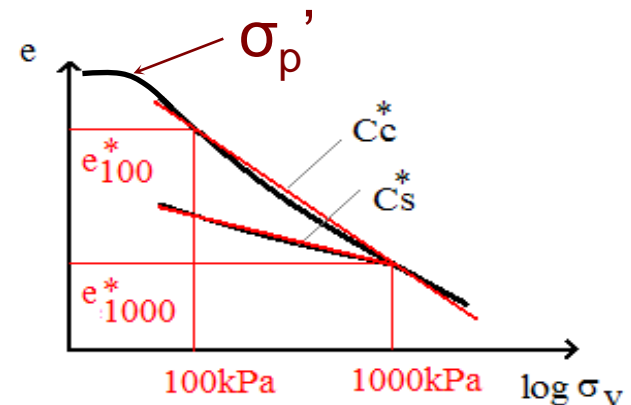
ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

- σε υλικά σχετικά μικρής διαπερατότητας (άργιλος, ιλύς) μελετάται το φαινόμενο της στερεοποίησης στο συμπιεσόμετρο για τον προσδιορισμό:

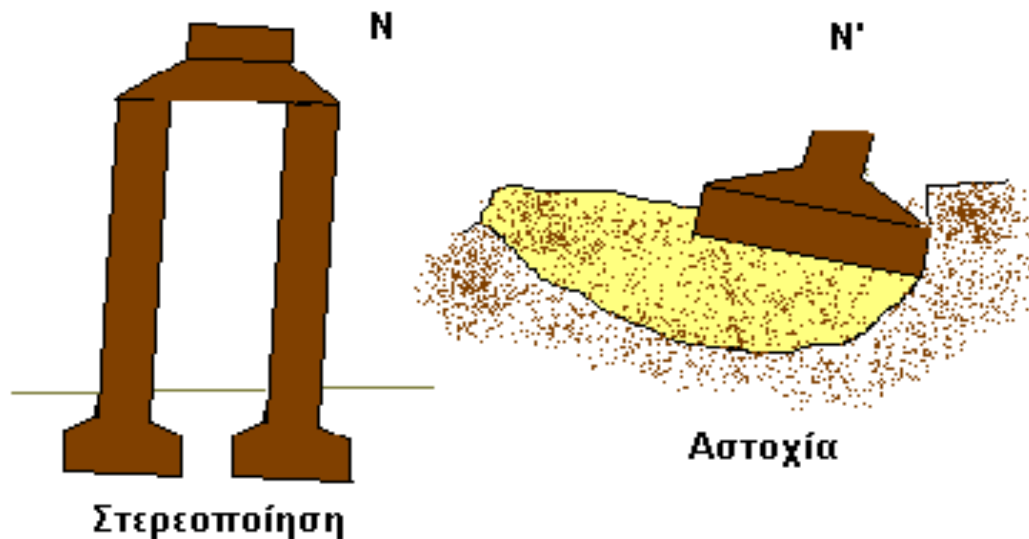
- του συντελεστή στερεοποίησης c_v

$$T_v = \frac{c_v * t}{\delta^2}$$

- του δείκτη συμπίεσης c_c
- του δείκτη διόγκωσης c_s
- της τάσης προφόρτισης σ_p'



ΑΣΤΟΧΙΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ



1. Φόρτιση θεμελίωσης, N ή N'
2. Στερεοποίηση του υποκειμένου εδάφους λόγω N
3. Για $N' > N$ αστοχία του εδάφους κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης