

Στερεοποίηση

(consolidation)

Χρονική εξέλιξη καθίζησης κορεσμένων εδαφών

Εδαφομηχανική I:

Μονοδιάστατη (1D) συμπίεση εδαφών

Εδαφομηχανική II:

Επανάληψη 1D συμπίεσης (διαφάνειες 2-6)

Το φαινόμενο της στερεοποίησης (8-22)

Μαθηματική έκφραση της 1D στερεοποίησης (24-31)

Οι μεταβλητές & οι παράμετροι (34-35)

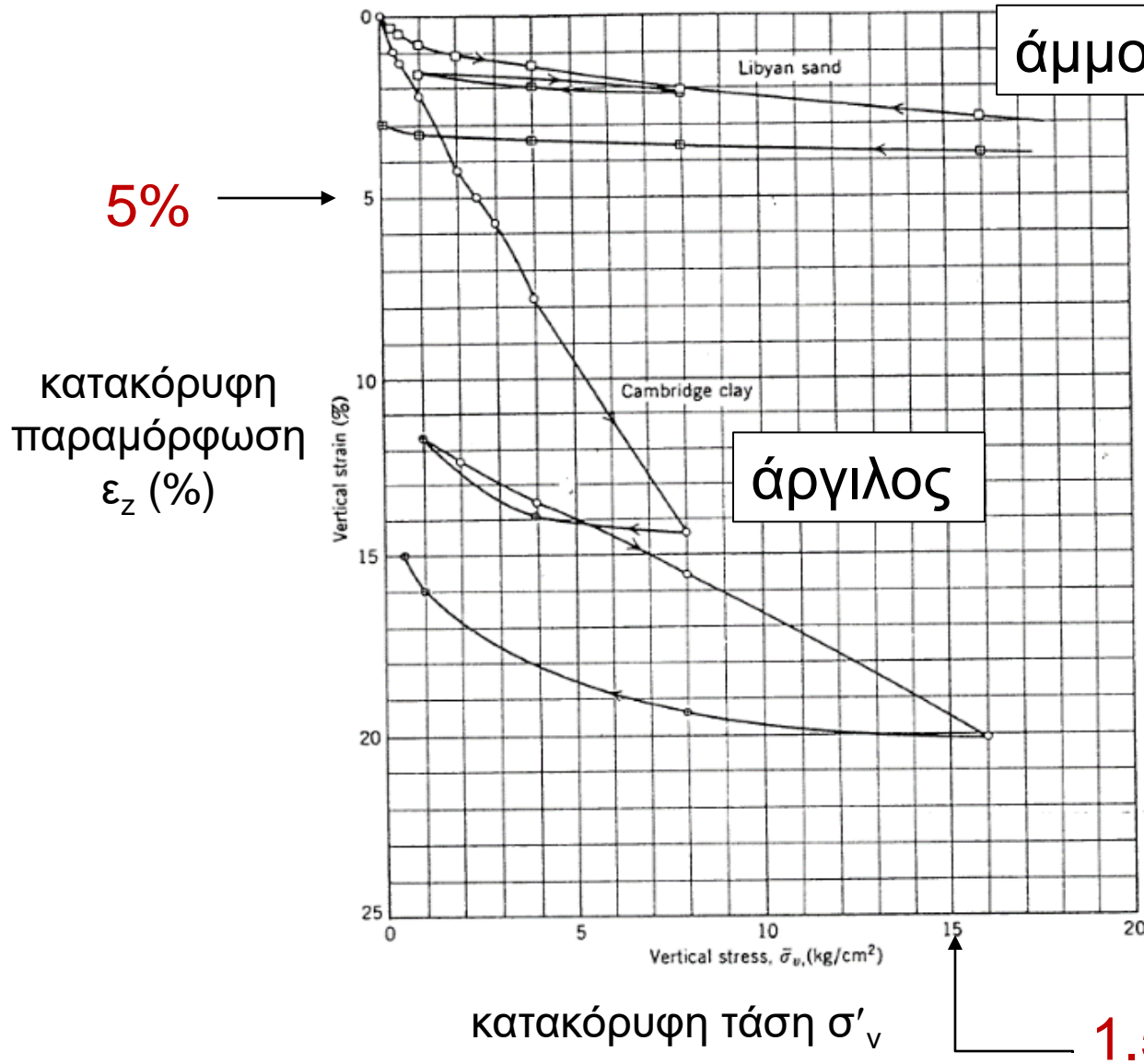
Τύποι προβλημάτων (37-47)

Κύρια σημεία (49)

δείτε και: <https://www.issmge.org/education/recorded-webinars/what-happens-when-soil-compresses-greek>

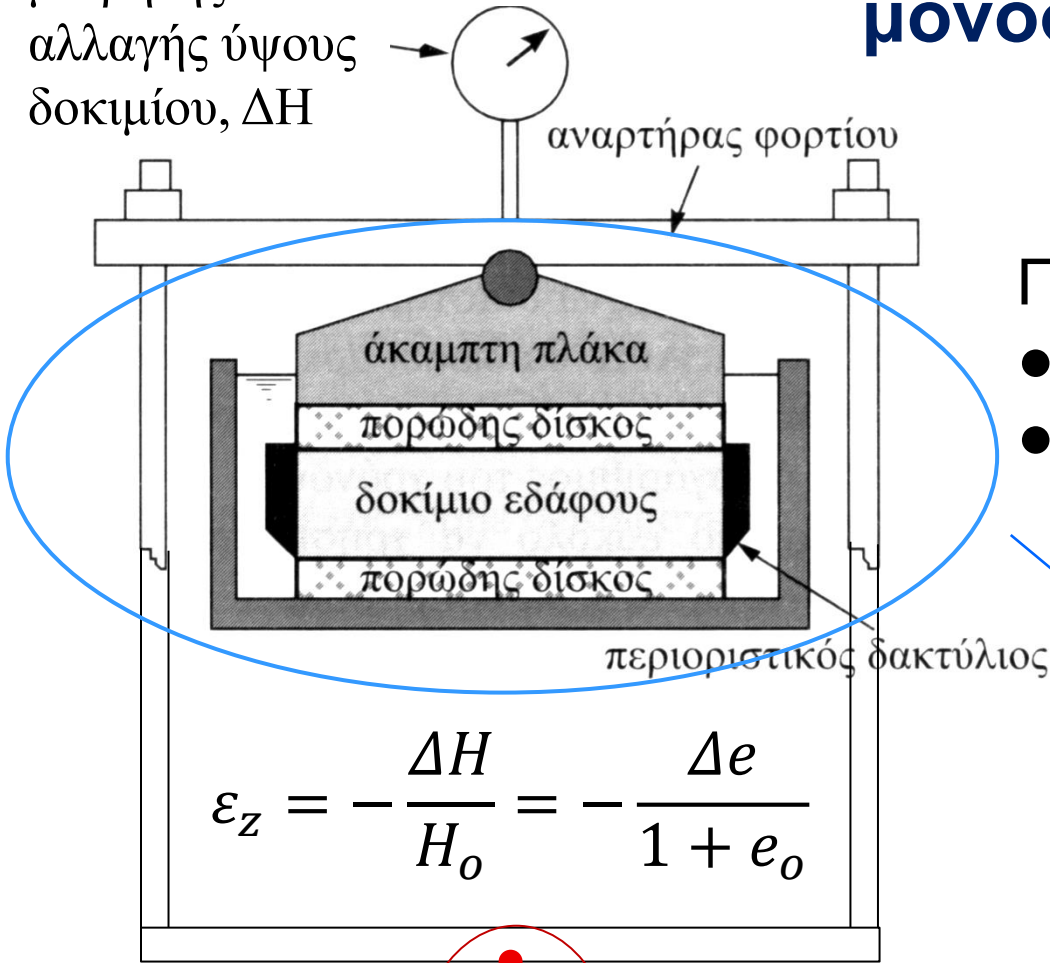
Επανάληψη συμπίεσης (Εδαφομηχανική Ι): σε κορεσμένα εδάφη, για να μπορέσει να μειωθεί ο όγκος των πόρων πρέπει να φύγει νερό

Αποτελέσματα δοκιμής συμπιεσομέτρου σε άμμο & σε άργιλο

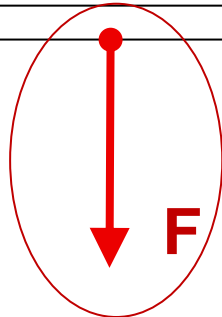


άργιλος: γενικά μεγαλύτερη καθίζηση σε σχέση με άμμο, πάντα πολύ μικρότερη περατότητα σε σχέση με άμμο

αναλογικός
μετρητής
αλλαγής ύψους
δοκιμίου, ΔH



$$\varepsilon_z = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

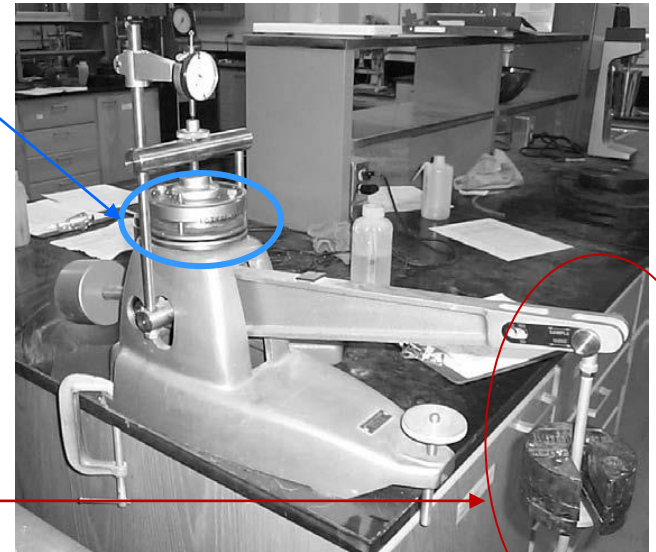


Ανάγουμε δύναμη F
στην επιφάνεια του
δοκιμίου $\rightarrow \sigma_z$

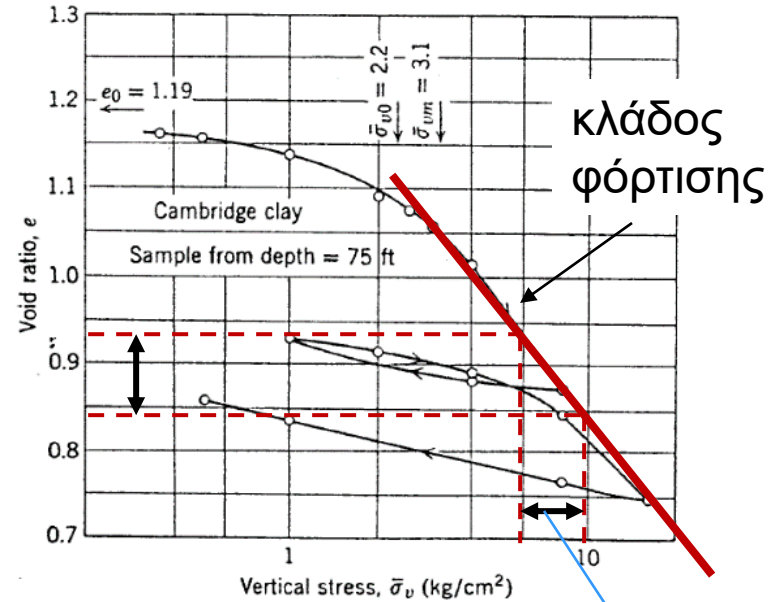
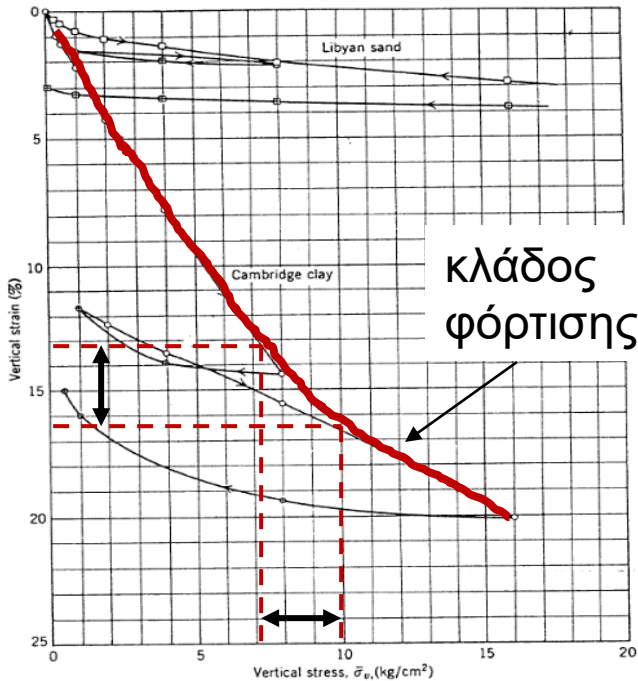
Πειραματική διάταξη μονοδιάστατης συμπίεσης: συμπιεσόμετρο

Πειραματικά δεδομένα:

- σε διαδοχικές σ'_z, ε_z (σ'_z)
- για κάθε $\sigma'_z, \varepsilon_z(t), t_{\max}=1d$



Αποτελέσματα δοκιμής συμπιεσομέτρου σε άργιλο: διαφορετικοί άξονες & παράμετροι



Άξονες: κατακόρυφη παραμόρφωση –
κατακόρυφη τάση

$$\Delta \varepsilon_z = \frac{1}{D} \cdot \Delta \sigma'_z$$

D: (τέμνον) μέτρο μονοδιάστατης παραμόρφωσης (συμπίεσης)

Άξονες: δείκτης πόρων –
λογάριθμος κατακόρυφης
τάσης

$$\Delta e = C_c \cdot \log \frac{\sigma'_{z0} + \Delta \sigma'_z}{\sigma'_{z0}}$$

C_c: συντελεστής συμπιεστότητας

Υπολογισμός καθίζησης, ΔH

- Αν έχουμε δεδομένα ε_z (σ'_z) ή τέμνον μέτρο μονοδιάστατης παραμόρφωσης D (για το κατάλληλο εύρος τάσεων)

$$\Delta H = \Delta \varepsilon_z \cdot H_o = \frac{\Delta \sigma'_z \cdot H_o}{D}$$

- Αν έχουμε δεδομένα e ($\log \sigma'_z$) ή συντελεστή συμπίεστικότητας C_c

$$\Delta H = \frac{H_o}{1 + e_o} \cdot \Delta e = \frac{H_o}{1 + e_o} \cdot C_c \cdot \log \frac{\sigma'_{zo} + \Delta \sigma'_z}{\sigma'_{zo}}$$

- Εύρος τιμών παραμέτρων

$D = 2 - 120 \text{ MN/m}^2$ (ενδεικτικές τιμές για ιλεις-άμμους, Lambe & Whitman 1969)

$C_c = 0.1 - 0.8$ (τυπικές τιμές, Budhu 2011)

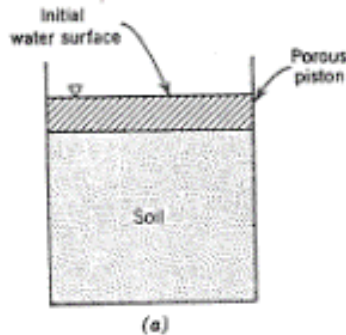
Το φαινόμενο της στερεοποίησης (περιγραφή, παραδείγματα)

Στερεοποίηση

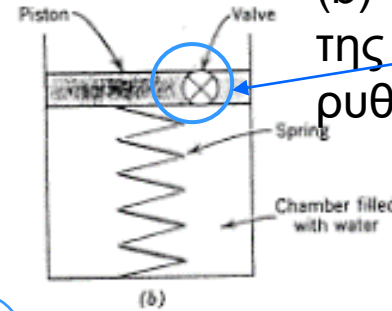
- Στερεοποίηση = συμπίεση του σκελετού κορεσμένου εδάφους με ταυτόχρονη εκροή νερού
- Οι άμμοι έχουν μεγάλη περατότητα κι έτσι το νερό φεύγει πολύ γρήγορα και η καθίζηση ολοκληρώνεται ομοίως πολύ γρήγορα
- Οι άργιλοι έχουν μικρή περατότητα κι έτσι το νερό καθυστερεί να φύγει και ομοίως καθυστερεί η ολοκλήρωση της καθίζησης
 - Γι' αυτό στις αργίλους απαιτούνται δύο υπολογισμοί: 1) της συνολικής καθίζησης και 2) του απαιτούμενου χρόνου για να ολοκληρωθεί το φαινόμενο της στερεοποίησης

Περιγραφή στερεοποίησης με υδρομηχανικό μοντέλο: πιστόνι + ελατήριο μέσα σε νερό

(a) κορεσμένο εδαφικό δείγμα συμπιέζεται μέσω πορώδους πιστονιού

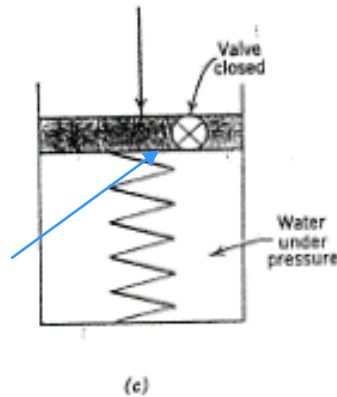


(b) το μέγεθος του ανοίγματος της βαλβίδας στο πιστόνι ρυθμίζει την «περατότητα»

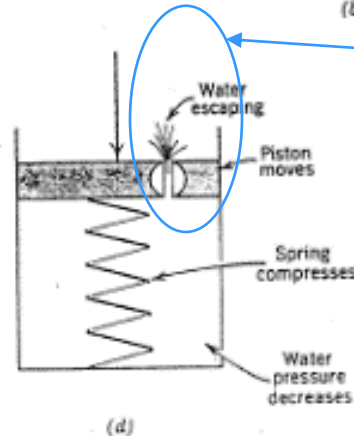


το ελατήριο αναπαριστά τον εδαφικό σκελετό

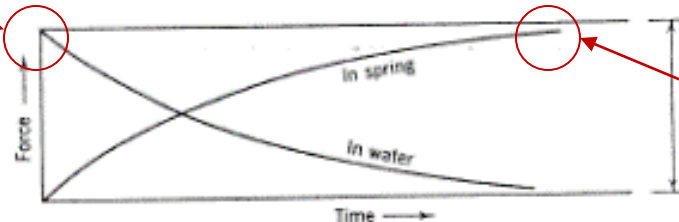
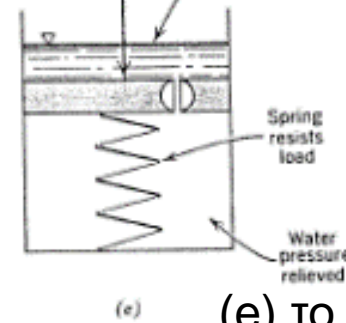
(c) το ελατήριο πρακτικώς δεν συμπιέζεται όσο η βαλβίδα είναι κλειστή, όλο το φορτίο αναλαμβάνεται από το νερό



(d) καθώς το νερό ρέει, το πιστόνι κινείται και το φορτίο μεταβιβάζεται στο ελατήριο

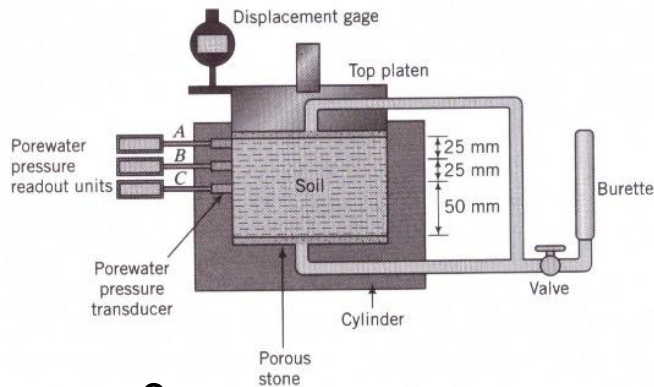


(e) το πιστόνι παύει να κινείται και το νερό παύει να ρέει όταν όλο το φορτίο μεταβιβάζεται στο ελατήριο

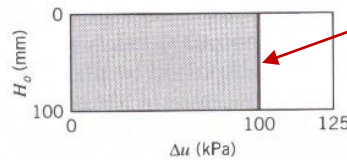
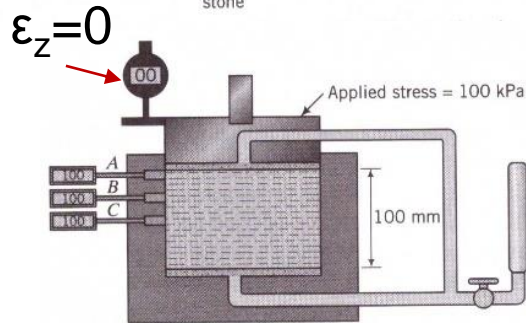


χρονική εξέλιξη φόρτισης νερού – ελατηρίου, $t=0$ άνοιγμα βαλβίδας

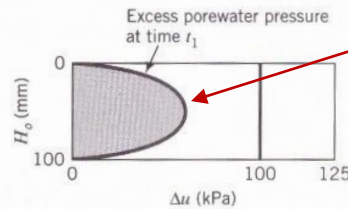
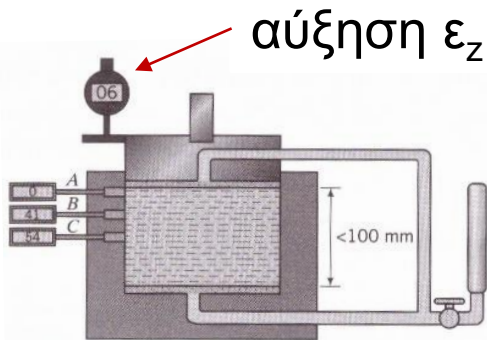
Περιγραφή στερεοποίησης σε δοκιμή συμπίεσόμετρου



Πριν την επιβολή φορτίου:
αρχική πίεση πόρων = 0



$t = 0$ επιβάλλεται φορτίο 100 kPa,
ομοιόμορφη $\Delta u = 100$ kPa,



$t = t_1$, $\Delta u = 0$ στα δύο στραγγιζόμενα
άκρα, $\max \Delta u$ στο μέσον του δοκιμίου

Στερεοποίηση: υδραυλικό & μηχανικό φαινόμενο

- Η στερεοποίηση από **υδραυλική σκοπιά**: όταν η πίεση του νερού των πόρων επιστρέψει στην αρχική τιμή της (ή, ισοδύναμα, όταν η υπερπίεση μηδενιστεί), τότε ολοκληρώνεται το φαινόμενο της στερεοποίησης. Στο τέλος της στερεοποίησης, αν πριν την επιβολή φορτίου:
 - το νερό είχε υδροστατική κατανομή πιέσεων (=ίδιο υδραυλικό φορτίο παντού), το νερό σταματάει να ρέει
 - υπήρχε ροή υπό σταθερή κλίση i , αποκαθίστανται αυτές οι αρχικές συνθήκες ροής
- Η στερεοποίηση από **γεωτεχνική σκοπιά**: καθώς η πίεση του νερού μειώνεται υπό σταθερή ολική τάση (=ίδιο βάρος + επιβληθέν φορτίο), αυξάνει σταδιακά η ενεργός τάση, όπως είναι αναμενόμενο όταν το έδαφος συμπιέζεται.

Άντληση → Καθίζηση

- Η συνδυασμένη υδραυλική-γεωτεχνική θεώρηση βοηθάει να καταλάβουμε τι συμβαίνει όταν αντλούμε νερό (από περατό στρώμα σε γειτνίαση αργιλικό στρώμα)
- Όταν αντλούμε νερό μειώνεται η πίεση του νερού, άρα αυξάνεται η ενεργός τάση –χωρίς αύξηση εξωτερικού φορτίου– και το έδαφος καθιζάνει.
- Παραδείγματα: Βενετία και Πόλη του Μεξικού

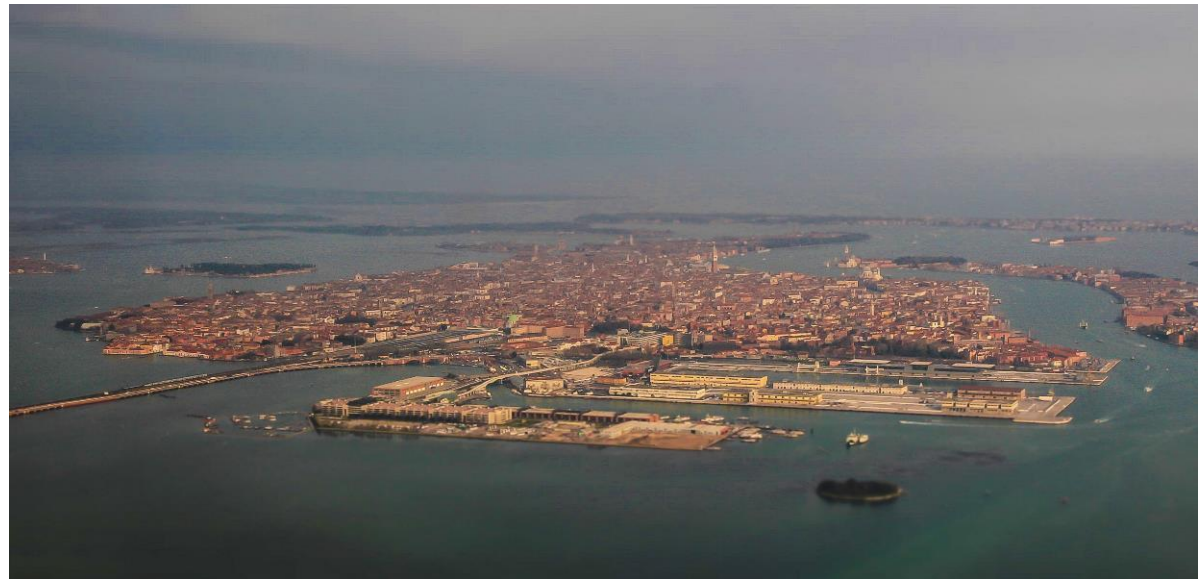
Βενετία: επίπεδα νησιά σε λιμνοθάλασσα



Βενετία: ευρύτερη περιοχή



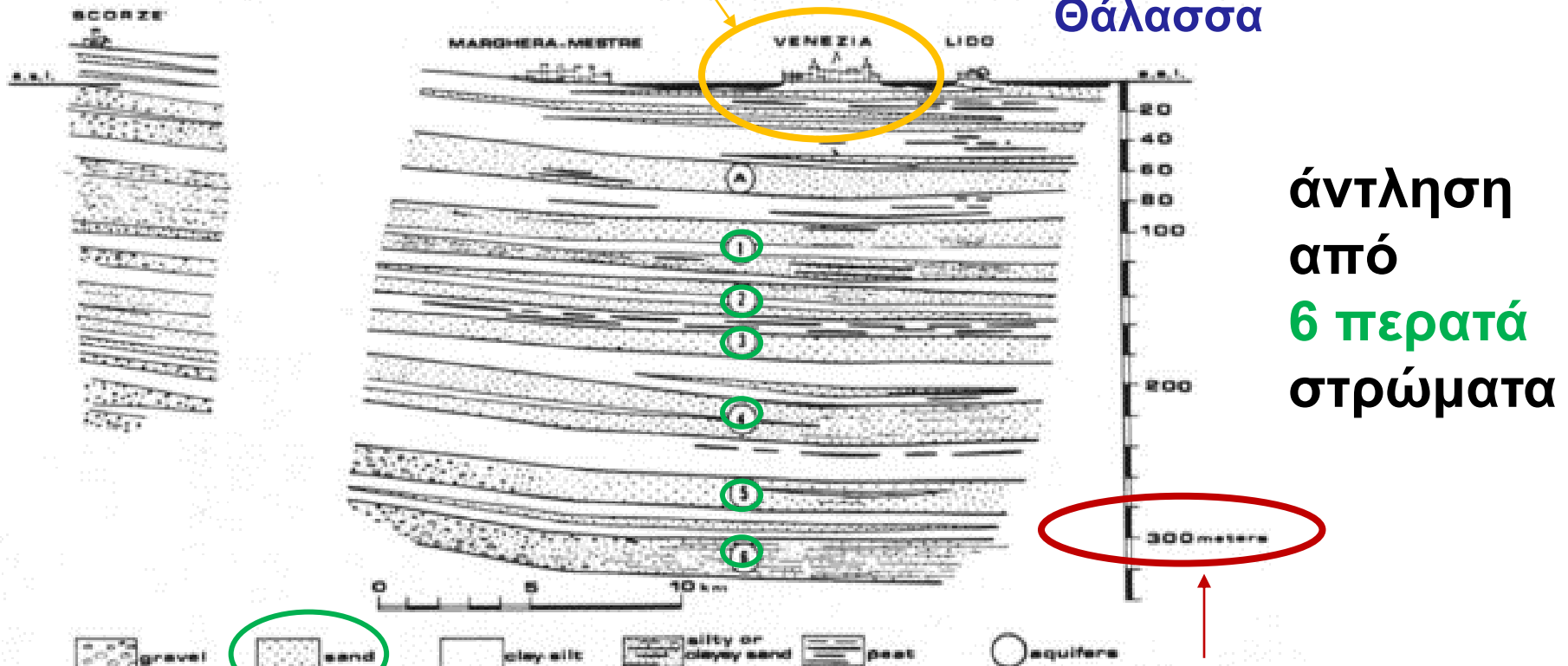
Marghera (βιομηχανική περιοχή):
άντληση νερού



Τομή επόμενης διαφάνειας

Περιοχή Βενετίας, εδαφικό προφίλ: εναλλαγές στρωμάτων άμμου και ιλύος

Αδριατική
Θάλασσα



άντληση
από
6 περατά
στρώματα

300 μέτρα

άμμος

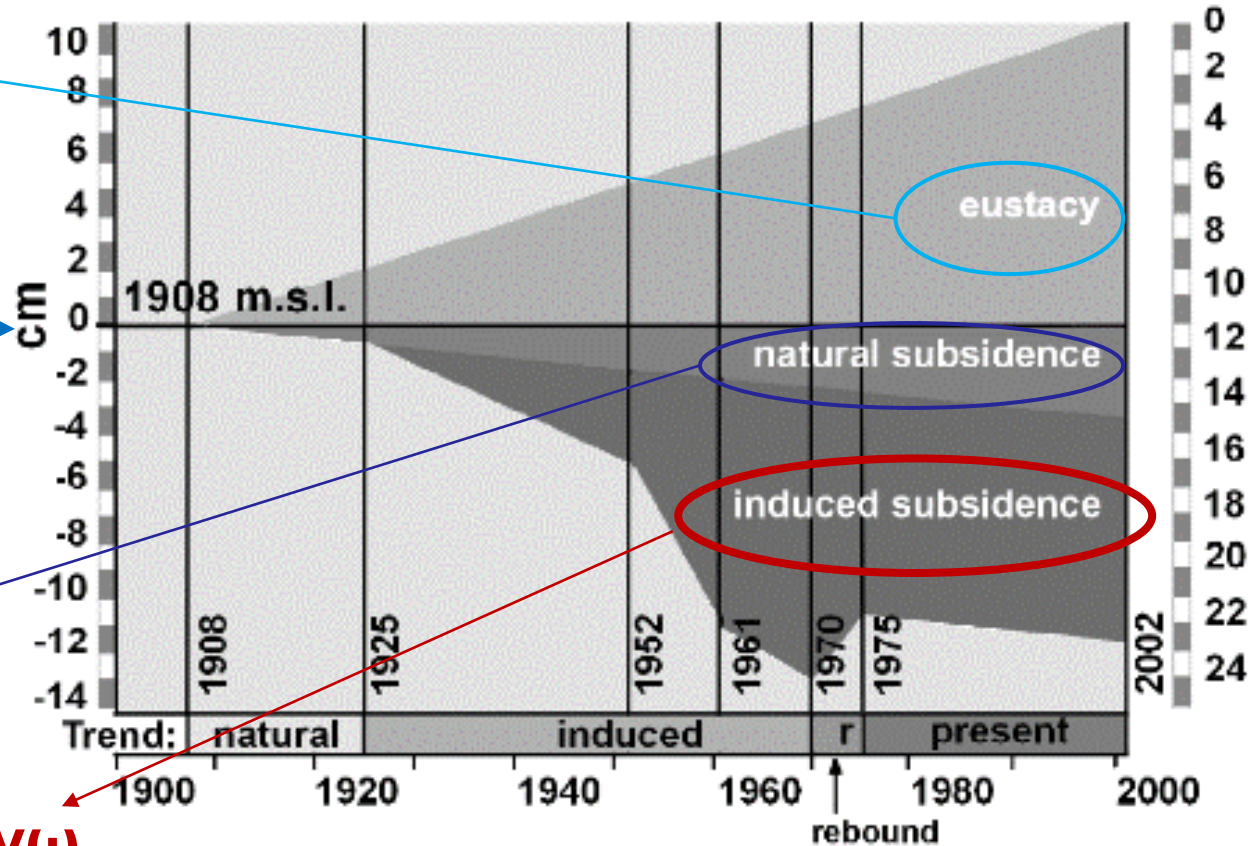
Βενετία: αποτελέσματα άντλησης (1925-1975)

Άνοδος
στάθμης της
θάλασσας

Στάθμη
αναφοράς =
στάθμη
θάλασσας το
1908

Αναμενόμενη-
φυσική
καθίζηση

Καθίζηση λόγω
άντλησης (μέγιστη
τιμή: 13 εκ)



ΧΡΟΝΟΣ (έτη)

ΜΕΙΩΣΗ ΥΨΟΜΕΤΡΟΥ ΣΤΕΡΙΑΣ ΣΕ
ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (εκ)

Πόλη του Μεξικού (21 εκατομμύρια κάτοικοι)



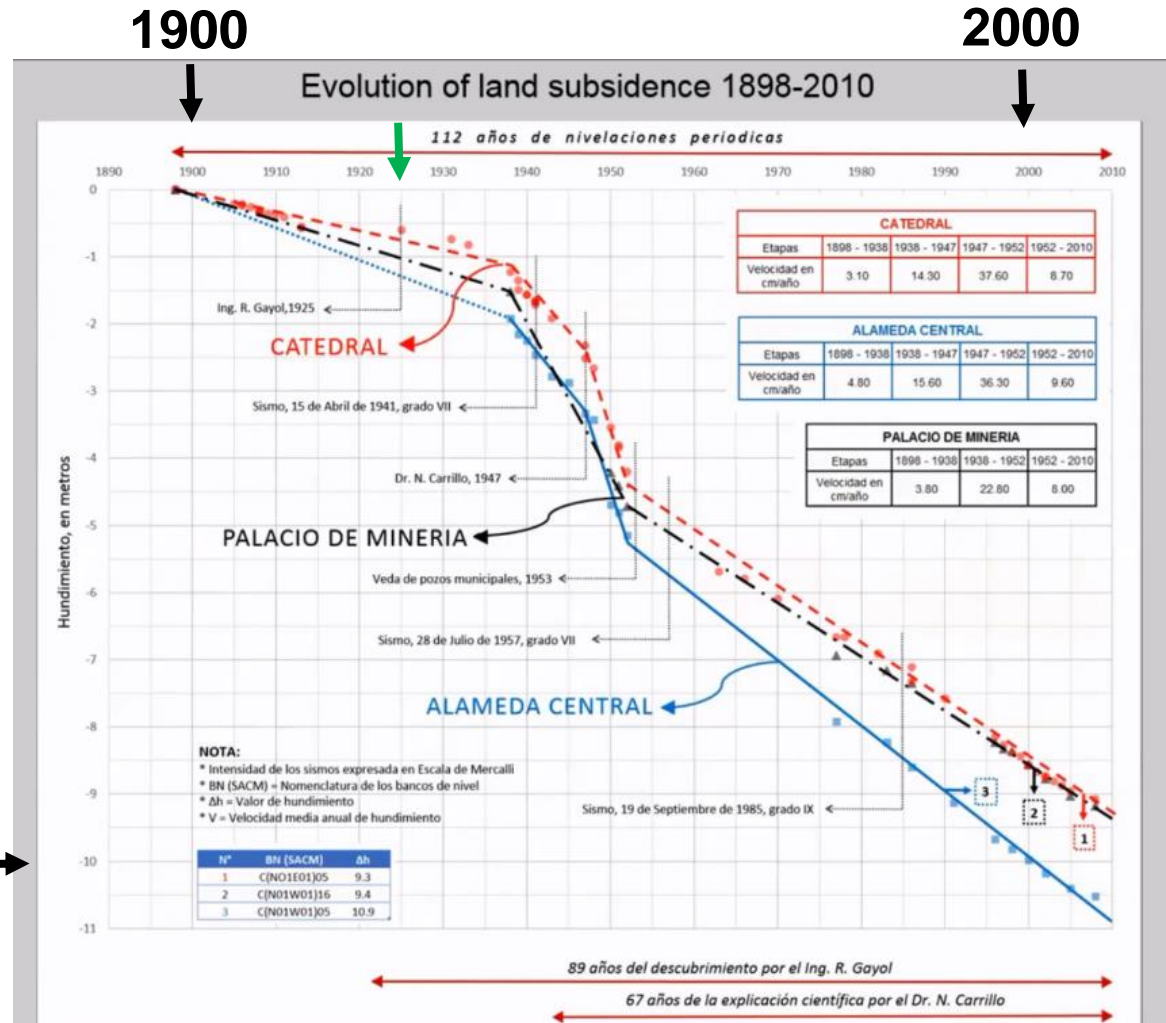
Καθίζηση στην Πόλη του Μεξικού

Άντληση ξεκινά
τέλη του 19^{ου} αιώνα
και συνεχίζεται ως
σήμερα

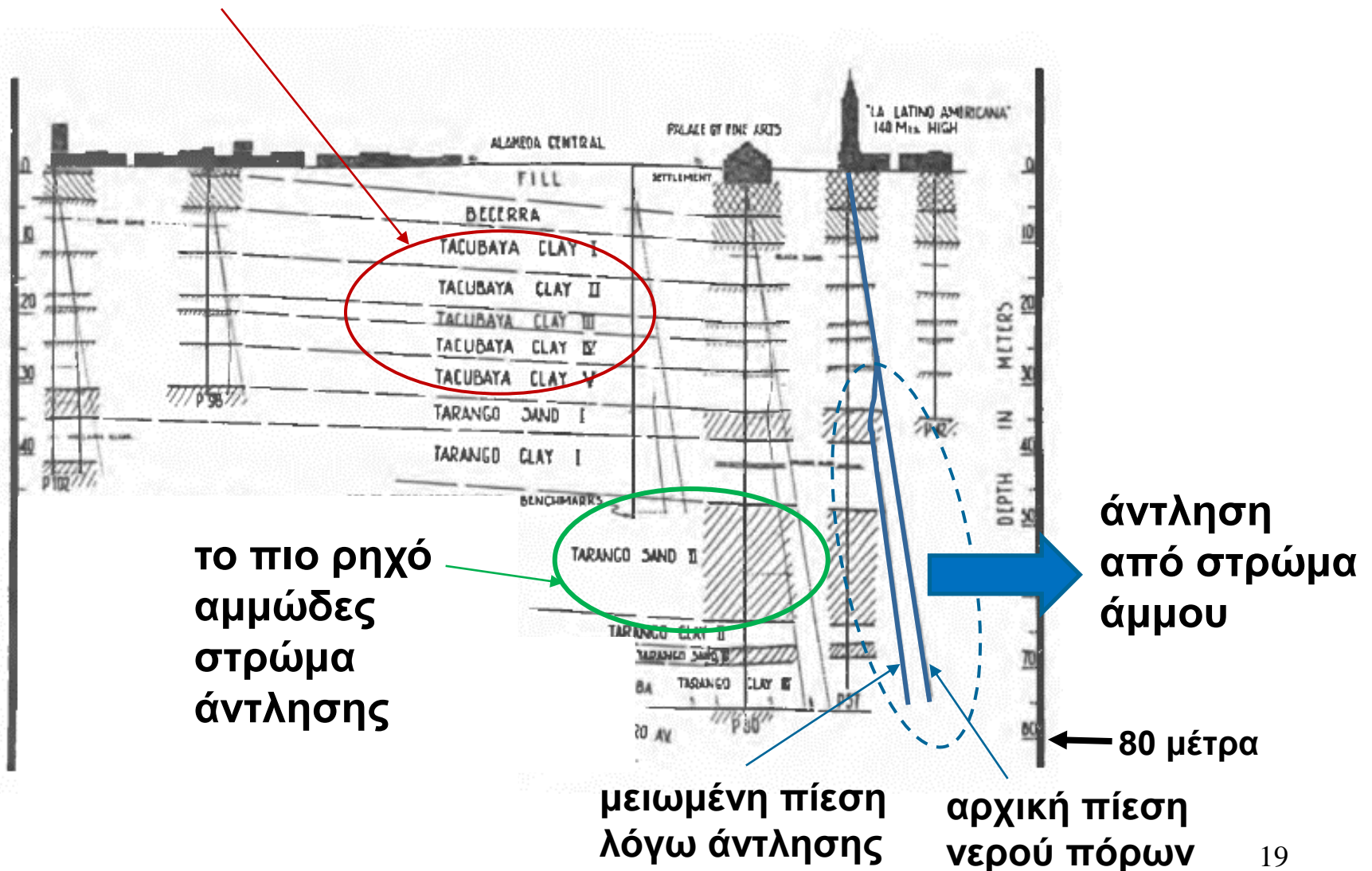
Βάθος άντλησης:
50 – 500 m

Προβλήματα με
καθιζήσεις
αναφέρονται για
πρώτη φορά το
1925

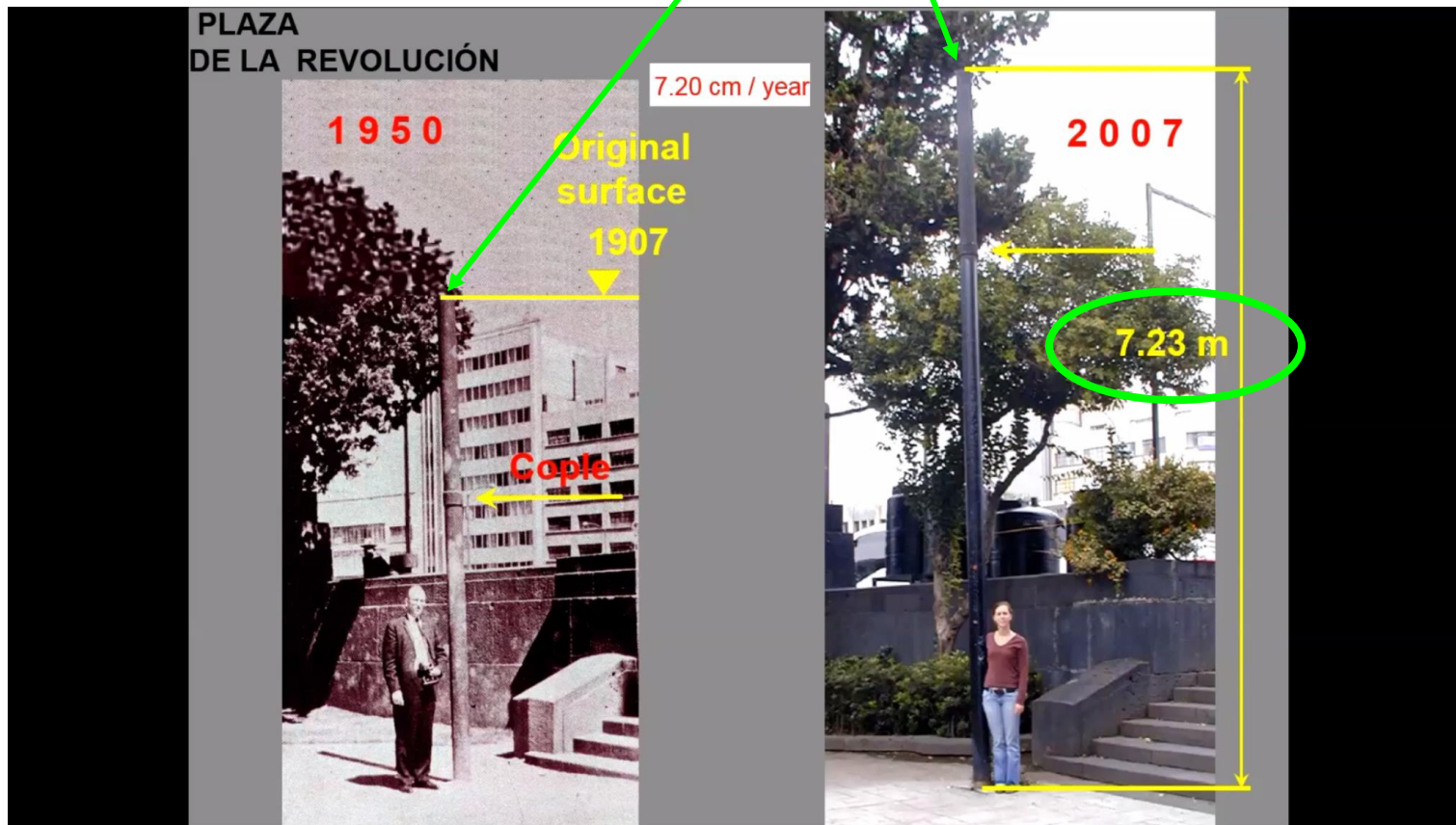
10 μέτρα →



Πόλη του Μεξικού, εδαφικό προφίλ: κυρίως άργιλος με ενδιάμεσα στρώματα άμμου



Μάρτυρας καθιζήσεων: σωλήνας γεώτρησης εξέχει όλο και περισσότερο καθώς το έδαφος υποχωρεί



Βενετία – Πόλη του Μεξικού

- Άντληση επί δεκαετίες προκαλεί υποχώρηση της επιφάνειας του εδάφους
 - Βενετία: **13 εκατοστά**, Πόλη του Μεξικού **7-10 μέτρα**
- Γιατί τόσο μεγάλη διαφορά στις δύο πόλεις;
 - Κυρίως επειδή η άργιλος στο υπέδαφος της Πόλης του Μεξικού είναι πάρα πολύ μαλακή: ο όγκος των πόρων είναι 5 – 10 φορές μεγαλύτερος από τον όγκο των εδαφικών στερεών!
 - Βενετία: $C_c = 0.1-0.29$, Πόλη του Μεξικού: $C_c = 3-8$
- Προσοχή! Το εξαιρετικά μεγάλο μέγεθος της καθίζησης στην Πόλη του Μεξικού δεν οφείλεται στα στρώματα από τα οποία αντλούμε αλλά στα γειτονικά τους

Βενετία, Νοέμβριος 2019



Μαθηματική έκφραση της στερεοποίησης

Μαθηματική έκφραση για την εξέλιξη της καθίζησης στον χρόνο → για την ολοκλήρωση στερεοποίησης

- Κύρια ιδέα: η εξέλιξη της καθίζησης συναρτάται (μέσω της ενεργού τάσης) με την εξέλιξη της αποτόνωσης της υπερπίεσης των πόρων η οποία με τη σειρά της συναρτάται **με τη ροή του υπόγειου νερού**
- Αναζητώ εξίσωση που περιγράφει τη (μη μόνιμη) ροή του υπόγειου νερού
- Θυμάμαι το μέγεθος-κλειδί της υπόγειας ροής, το υδραυλικό φορτίο $h = z + u/\gamma_w$
- Γράφω την πίεση πόρων $u = u_{ss} + u_e$, όπου u_{ss} = πίεση πόρων σε συνθήκες μόνιμης ροής (ή υδροστατικές) και u_e = υπερπίεση (επιπλέον πίεση) λόγω φόρτισης

Μερική διαφορική εξίσωση 1D στερεοποίησης

Ισοζύγιο μάζας νερού (εισερχόμενη μάζα – εξερχόμενη μάζα = αλλαγή μάζας στη μονάδα χρόνου) σε στοιχειώδη όγκο δίνει (η μάζα είναι συνάρτηση της ταχύτητας Darcy):

$$k \frac{\partial^2 h}{\partial^2 z} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad \begin{array}{l} k = \text{συντελεστής διαπερατότητας} \\ e = \text{δείκτης πόρων} \end{array}$$

Μεταβολή e συνδέεται με παραμόρφωση, αντικαθιστώ με τάση (βλέπε διαφάνειες 4 – 6):

$$k \frac{\partial^2 h}{\partial^2 z} = -\frac{1}{D} \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad \begin{array}{l} \sigma' = \text{ενεργός τάση} \\ D = \text{μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης} \end{array}$$

Από τους επιμέρους όρους του h κρατώ αυτόν με τη μη μηδενική δεύτερη παράγωγο, δηλ. την υπερπίεση πόρων u_e , και αντικαθιστώ τη χρονική παράγωγο της σ' με τη χρονική παράγωγο της u_e :

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial^2 z} = -\frac{1}{D} \frac{\partial \sigma'}{\partial t} = \frac{1}{D} \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad \begin{array}{l} u_e = \text{υπερπίεση πόρων} \\ (\mathbf{u_e \acute{\eta} \Delta u}) \end{array}$$

Μερική διαφορική εξίσωση στερεοποίησης (συν.)

$$C_V \frac{\partial^2 u_e}{\partial^2 z} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad C_V = \frac{k \cdot D}{\gamma_w}$$

C_V = συντελεστής μονοδιάστατης στερεοποίησης:
η καθίζηση ολοκληρώνεται γρήγορα (μεγάλος C_V) όταν
«πρέπει» να φύγει λίγο νερό (μεγάλο D) και μπορεί να
φύγει γρήγορα (μεγάλο k)

Τυπικές τιμές (Budhu 2011)

$$C_V = 5 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (0.1 - 12 \text{ m}^2/\text{y})$$

Βενετία: $C_V = 10^{-3} - 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$

Πόλη του Μεξικού: $C_V = 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$

Μερική διαφορική εξίσωση στερεοποίησης & λύση

- Μετασχηματισμός μεταβλητών, όπου $H = \max$ μήκος στράγγισης

$$Z = \frac{z}{H}, \quad T = \frac{C_V t}{H^2}$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 u_e}{\partial^2 Z} = \frac{\partial u_e}{\partial T}}$$

*

T ή $T_V =$ χρονικός παράγων

- Αρχική συνθήκη: $t = 0, u_e = \Delta\sigma_v$, συνοριακή συνθήκη: $t > 0, u_e = 0$ για $Z=0$ και $Z=2$ (άνω και κάτω στραγγιζόμενη επιφάνεια αργίλου)

$$u_e = 2\Delta\sigma_v \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin MZ}{M} \cdot e^{-\frac{M^2}{T}}, \quad M = \frac{\pi}{2}(2m + 1)$$

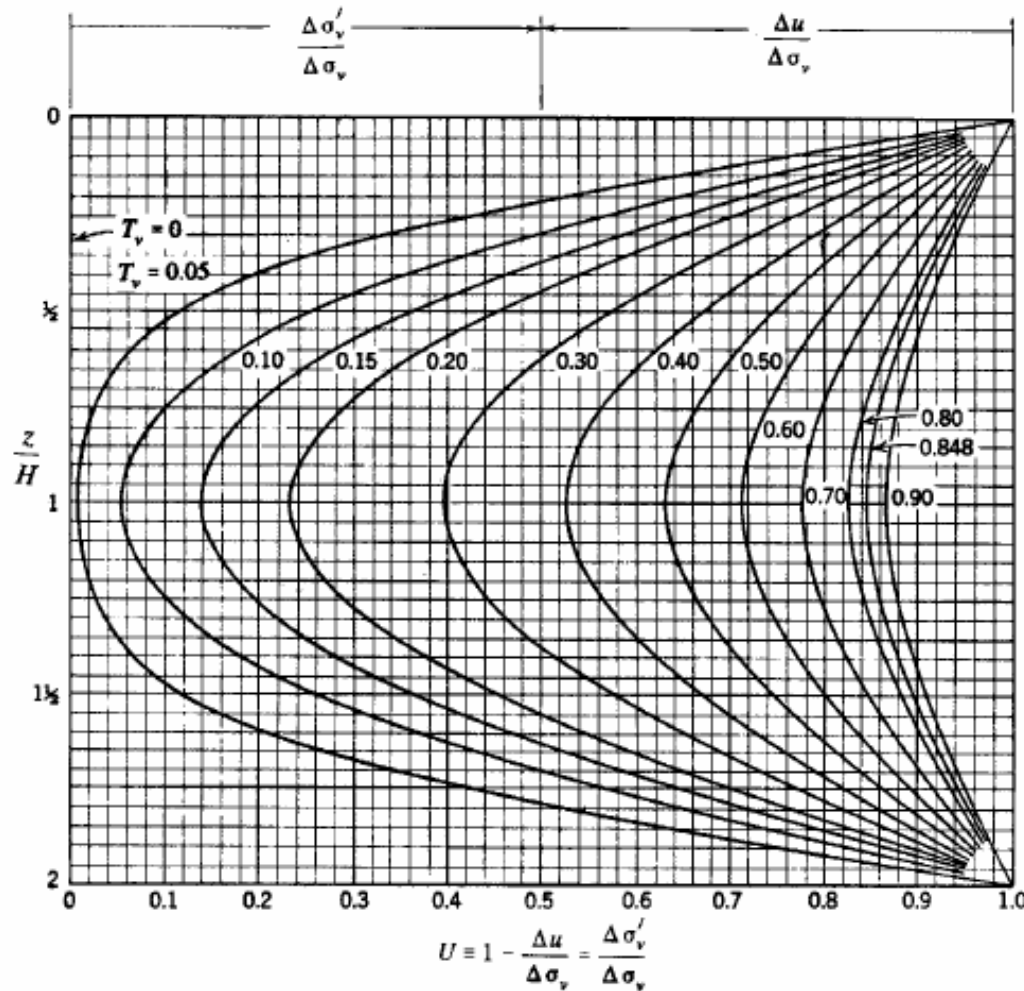
* Η ανάπτυξη της θεωρίας της στερεοποίησης και η μαθηματική περιγραφή της (με την ίδια εξίσωση που περιγράφει μεταφορά θερμότητας και διάχυση ρύπου) από τον Terzaghi στη δεκαετία 1920 σηματοδοτούν τη γένεση της Εδαφομηχανικής (και μετέπειτα της Γεωτεχνικής Μηχανικής)

Γραφική λύση εξίσωσης στερεοποίησης Νο 1: βαθμός στερεοποίησης U σε κάθε σημείο z/H αργλικού στρώματος πάχους $2H$

Διαφορετική
καμπύλη U για
διαφορετικές τιμές
του χρονικού
παράγοντα, $T_v =$
 $0.05, 0.1, \dots, 0.9$

$$U = 1 - \frac{u_e}{\Delta\sigma_v}$$

$$= \frac{\Delta\sigma_v - u_e}{\Delta\sigma_v} = \frac{\Delta\sigma'_v}{\Delta\sigma_v}$$



Σχ. 7.3: Λύσεις της εξίσωσης μονοδιάστατης στερεοποίησης

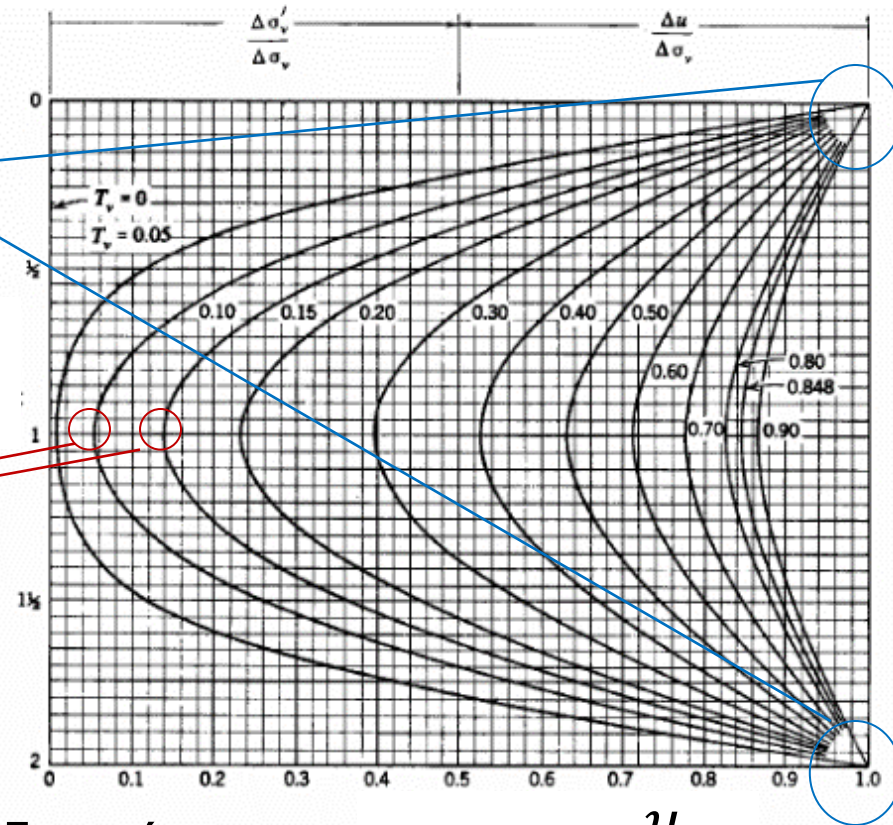
Γραφική λύση εξίσωσης στερεοποίησης Νο 1: βαθμός στερεοποίησης U σε κάθε σημείο z/H αργιλικού στρώματος πάχους $2H$ (συν.)

Τι παρατηρούμε;

- Πολύ γρήγορη μείωση πίεσης (γρήγορη συμπίεση) στις δύο στραγγιζόμενες επιφάνειες

- Στο μέσον του αργιλικού στρώματος ($Z=1$) η υδραυλική κλίση είναι μηδέν καθώς δεν υπάρχει ροή κάθετα στον οριζόντιο άξονα λόγω συμμετρίας = αδιαπέρατο όριο

$$Z = \frac{z}{H}$$

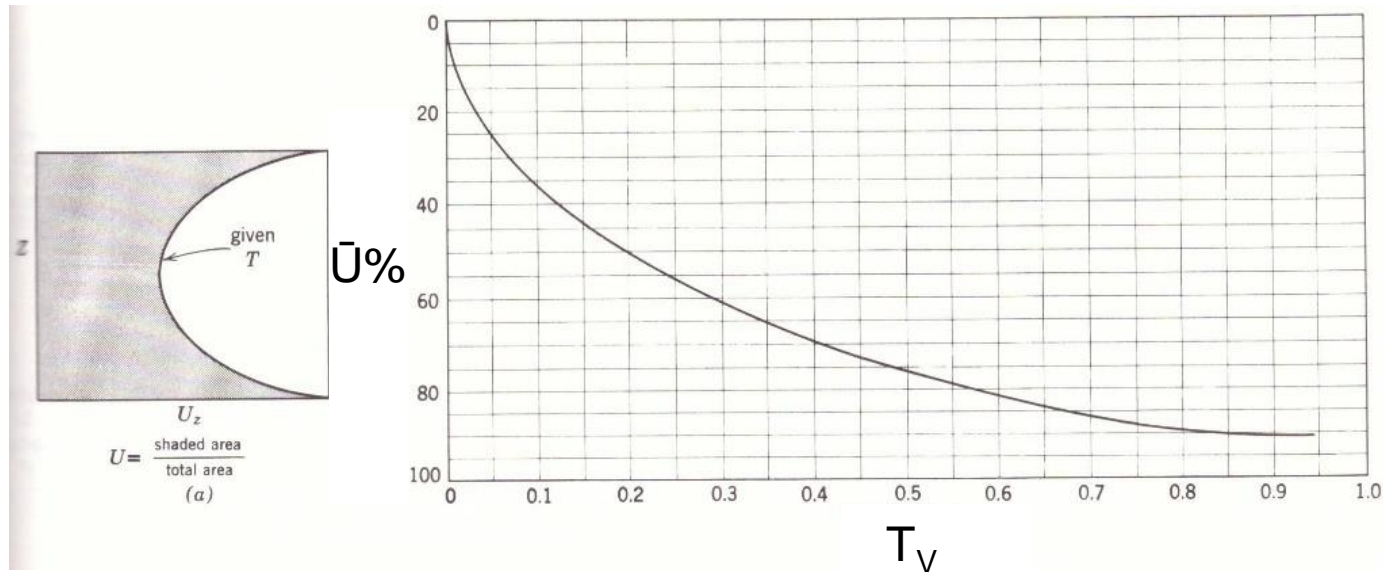


→ Χρησιμοποιούμε το άνω μισό του διαγράμματος $U-Z$ για αργιλική στρώση πάχους H μεταξύ περατού υπερκείμενου και αδιαπέρατου υποκείμενου στρώματος

$$U = 1 - \frac{u_e}{\Delta\sigma_v}$$

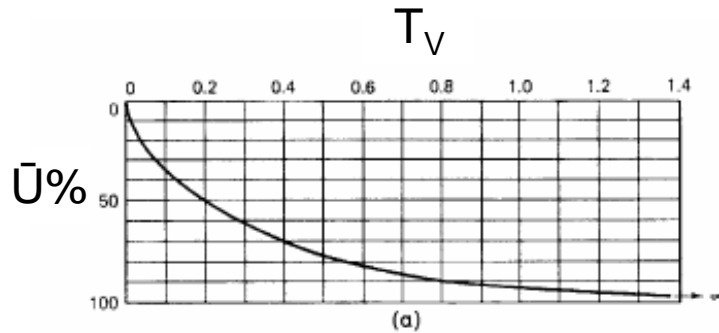
Βαθμός στερεοποίησης U σε κάθε σημείο αργλικού στρώματος \rightarrow μέσος βαθμός στερεοποίησης \bar{U} για όλο το αργλικό στρώμα

- Μαθηματικός ορισμός: $\bar{U}(T) \equiv \frac{\Delta H(T)}{\Delta H(\infty)}$



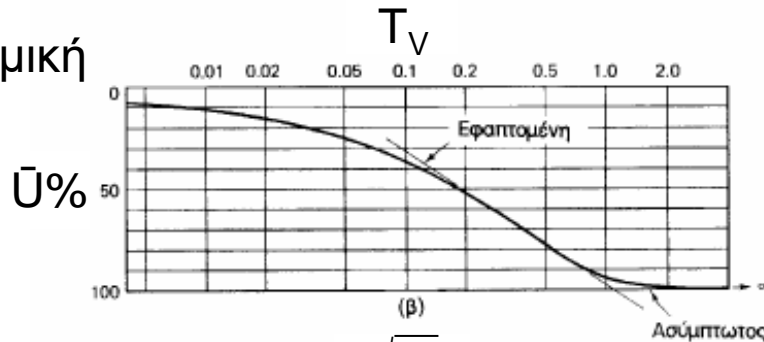
- Γραφικός ορισμός, για συγκεκριμένο T_V :
 $\bar{U}(T_V) = \frac{\text{(σκιασμένη επιφάνεια διαγράμματος } U-Z)}{\text{(ολική επιφάνεια διαγράμματος } U-Z)}$

Γραφική λύση εξίσωσης στερεοποίησης Νο 2: μέσος βαθμός στερεοποίησης \bar{U} του αργλικού στρώματος



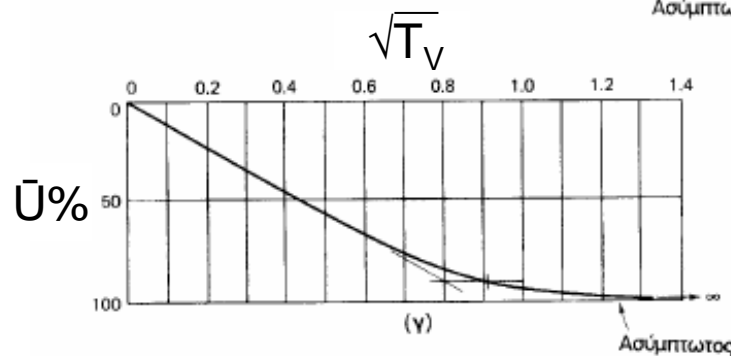
βλέπε και Καββαδάς (2009),
πίνακα σελ. 190, τιμές \bar{U} για
 $T_V=0, 0.1, 0.2, \dots, 0.9, \infty$

λογαριθμική
κλίμακα



$$\bar{U} > 0.6$$

$$T_V = -0.085 - 0.933 \log(1 - \bar{U})$$



$$\bar{U} < 0.6, \quad T_V = \frac{\pi}{4} \bar{U}^2$$

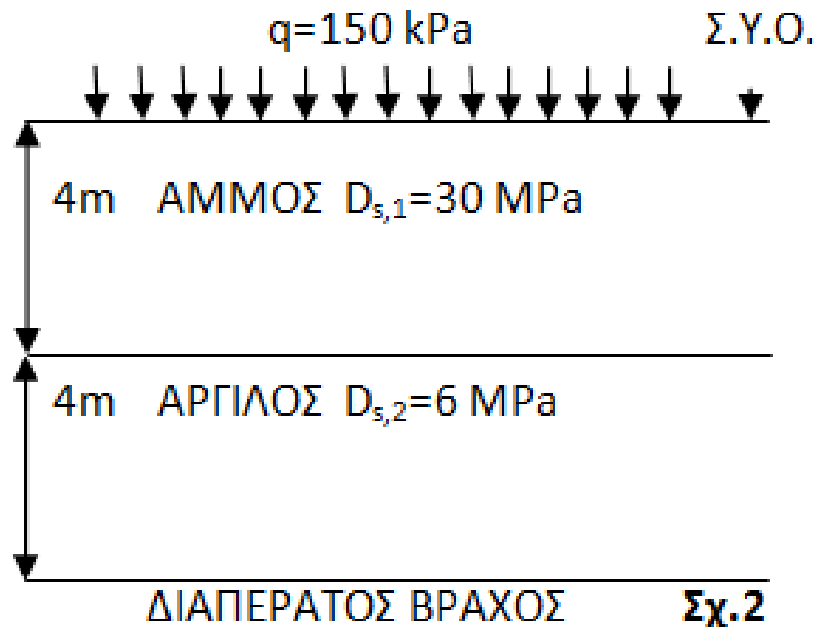
Σχ. 7.4: Βαθμός στερεοποίησης ως προς το χρόνο

Εξάσκηση: 7^η σειρά, 2^η άσκηση

7.2 Στην επιφάνεια της εδαφικής τομής του Σχήματος 2 επιβλήθηκε εκτεταμένη φόρτιση $q = 150 \text{ kPa}$. Μετά από 8 μήνες μετρήθηκε η καθίζηση της επιφανείας 3.6 cm.

Ζητούνται: (α) Η τελική-συνολική καθίζηση, καθώς και ο χρόνος της πρακτικής περατώσεως της στερεοποίησης του αργιλικού στρώματος.

(β) Αν ο βράχος κάτω από την άργιλο ήταν αδιαπέρατος, πώς θα άλλαζαν οι απαντήσεις σας στο προηγούμενο ερώτημα υποθέτοντας ίδιο συντελεστή διαπερατότητας K ;



Οι μεταβλητές & οι παράμετροι

Οι μεταβλητές

Ανεξάρτητες μεταβλητές

- Πρωτογενής μεταβλητή, χρόνος: t
- Αδιαστατοποιημένη μεταβλητή, χρονικός παράγοντας: $T = \frac{C_V t}{H^2}$
- Πρωτογενής μεταβλητή, βάθος σημείου εντός του αργιλικού στρώματος: z
- Αδιαστατοποιημένη μεταβλητή, λόγος βάθος σημείου / μήκος στράγγισης: $Z = \frac{z}{H}$

Εξαρτημένες μεταβλητές

- Πρωτογενής μεταβλητή, υπερπίεση πόρων: $u_e(z, t)$
- Αδιαστατοποιημένη μεταβλητή No 1, **βαθμός στερεοποίησης** (σε βάθος z):

$$U(Z, T) = 1 - \frac{u_e(z, t)}{\Delta\sigma_v} = \frac{\Delta\sigma'_v(z, t)}{\Delta\sigma_v}$$

- Αδιαστατοποιημένη μεταβλητή No 2, **μέσος βαθμός στερεοποίησης** (για όλο το αργιλικό στρώμα):

$$\bar{U}(T) \equiv \frac{\Delta H(T)}{\Delta H(\infty)}$$

Τι εκφράζουν οι παράμετροι

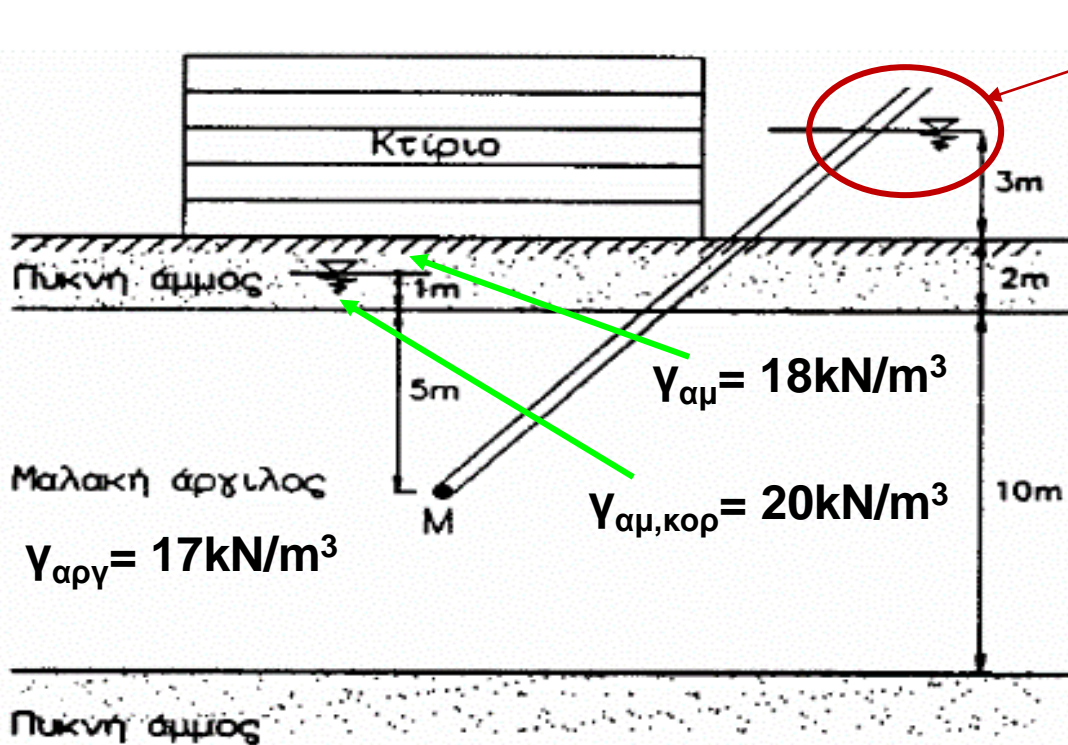
- Πόσο μεγάλη ή μικρή θα είναι η καθίζηση
 - Συντελεστής συμπίεστικότητας, C_c
 - Μέτρο μονοδιάστατης παραμόρφωσης (τέμνον), D (MN/m²)
- Πόσο γρήγορα θα ολοκληρωθεί η καθίζηση
 - Συντελεστής στερεοποίησης, C_v (cm²/s ή m²/y)

Τύποι προβλημάτων

Συνήθη προβλήματα

- Ποια η πρόοδος της καθίζησης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές; Πότε θα ολοκληρωθεί η καθίζηση;
 - Πρακτική εφαρμογή: υποθέτοντας ότι για χρονικό παράγοντα $T_V \cong 1$ η στερεοποίηση/καθίζηση έχει πρακτικώς ολοκληρωθεί, βρίσκουμε τον χρόνο t που αντιστοιχεί σε $T_V=1$
- Πόση θα είναι η υπερπίεση των πόρων (= συμπίεση) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές σε διαφορετικά σημεία του αργιλικού στρώματος;
 - Πρακτική εφαρμογή: σύγκριση θεωρητικών τιμών με μετρήσεις πίεσης πόρων στο πεδίο
 - τυχόν αποκλίσεις υποδεικνύουν διαφορετικό μοντέλο συμπεριφοράς, π.χ. μη ομοιογενές έδαφος, μη κορεσμένη άργιλο

Παράδειγμα 7.2 (Καββαδάς 2009, [Κεφάλαιο 7](#), σελ. 206)



Στάθμη του νερού σε πιεζόμετρο που εγκαθιστούμε στο μέσον του αργιλικού στρώματος 4 χρόνια μετά την κατασκευή του κτηρίου

Επίσης δίνονται:

- $q_{\text{κτηρίου}} = 120 \text{ kPa}$
- αποτελέσματα δοκιμής συμπίεσομέτρου, $e(\sigma'_v)$ για $\sigma'_v = 50, 100, 200 \text{ kPa}$

- Ποια η υποχώρηση του κτηρίου 4 χρόνια μετά την κατασκευή του;
- Θα συνεχισθούν οι υποχωρήσεις; Αν ναι, για πόσο ακόμα και ποια η επιπλέον υποχώρηση;

Παράδειγμα 7.2, βήματα της λύσης

- **ΒΗΜΑ 1** Τα δεδομένα της δοκιμής συμπιεσομέτρου είναι στο σωστό εύρος τάσεων, $\Delta\sigma' = \sigma'_{\text{τελ}} - \sigma'_o$
- **ΒΗΜΑ 2** Από την αλλαγή του δείκτη πόρων Δe υπολογίζουμε παραμόρφωση ϵ_z , με ϵ_z και $\Delta\sigma'$ υπολογίζουμε D
- **ΒΗΜΑ 3** Με $\Delta\sigma'$, D , H_o , υπολογίζουμε συνολική καθίζηση ΔH
- **ΒΗΜΑ 4** Γνωρίζοντας την πίεση στο σημείο M για $t=4y$, υπολογίζουμε **(α)** την υπερπίεση u_e (ή Δu) και **(β)** τον βαθμό στερεοποίησης U στο σημείο M
- **ΒΗΜΑ 5** Από τον βαθμό στερεοποίησης $U (=0.67)$ στο σημείο M , βρίσκουμε **(α)** τον χρονικό παράγοντα $T_v (=0.55)$ και **(β)** τον αντίστοιχο μέσο βαθμό στερεοποίησης \bar{U} για $t=4y$
- **ΒΗΜΑ 6** Από τον ορισμό του T_v βρίσκουμε τον συντελεστή στερεοποίησης C_v και, με γνωστό C_v , υπολογίζουμε τον χρόνο που αντιστοιχεί σε $T_v=1$, όταν πρακτικώς ολοκληρώνεται η στερεοποίηση

Παράδειγμα 7.2, Βήμα 1

- Τα δεδομένα της δοκιμής συμπιεσομέτρου είναι στο σωστό εύρος τάσεων, $\Delta\sigma' = \sigma' - \sigma'_0$

ΠΕΔΙΟ – Στο μέσον του στρώματος

Αρχικές συνθήκες

$$\sigma_0 = 18 \text{ kN/m}^3 \times 1 \text{ m} + 20 \text{ kN/m}^3 \times 1 \text{ m} + 17 \text{ kN/m}^3 \times 5 \text{ m} = 123 \text{ kN/m}^2 \text{ (123 kPa)}$$

$$u_0 = 10 \text{ kN/m}^3 \times 6 \text{ m} = 60 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_0 = \sigma_0 - u = 63 \text{ kN/m}^2$$

Μετά την κατασκευή του κτηρίου (120 kPa) και την ολοκλήρωση της καθίζησης

$$\sigma' = 183 \text{ kPa}$$

ΠΕΙΡΑΜΑ

Δεδομένα σ'_v (50 – 100 – 200 kPa) - e (0.7 – 0.6915 – 0.6745)

Παράδειγμα 7.2, Βήματα 2 & 3

- Από την αλλαγή του δείκτη πόρων Δe υπολογίζουμε παραμόρφωση ε_z , με ε_z και $\Delta\sigma'$ υπολογίζουμε D

ΠΕΙΡΑΜΑ

Δεδομένα σ'_v (50 – 100 – 200 kPa) - e (0.7 – 0.6915 – 0.6745)

$$\Delta\varepsilon_z = -\frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{-(0.6745 - 0.7)}{1 + 0.7} = 0.015$$

$$D = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\varepsilon_z} = \frac{150\text{kPa}}{0.015} = 10000\text{kPa} = 10\text{MPa}$$

- Με $\Delta\sigma'$, D , H_0 , υπολογίζουμε συνολική καθίζηση ΔH

ΠΕΔΙΟ – για όλο το αργιλικό στρώμα

$$\Delta H = \frac{\Delta\sigma'_z}{D} \cdot H_0 = \frac{120\text{kPa}}{10000\text{kPa}} \cdot 10\text{m} = 0.12\text{m} = 12\text{cm}$$

Παράδειγμα 7.2, Βήμα 4α

- Γνωρίζοντας την πίεση στο σημείο M για $t=4y$, υπολογίζουμε την υπερπίεση u_e (ή Δu)

ΠΕΔΙΟ – στο μέσον του αργιλικού στρώματος

Πρόοδος Στερεοποίησης: ποια η υπερπίεση, $u_e(4y)$, στο M?

Ποια η πίεση στο M στα 4y?

$$u = \text{ύψος νερού στο πιεζόμετρο} \times \gamma_w = 10 \text{ m} \times 10 \text{ kN/m}^3 = 100 \text{ kPa}$$

Θυμάμαι ότι

$$u = u_{ss} + u_e$$

Ποια η u_{ss} ? Η αρχική u_0

$$u_e = 100\text{kPa} - 60\text{kPa} = 40 \text{ kPa}$$

Και μόνο που βλέπω σημαντική u_e καταλαβαίνω ότι η στερεοποίηση είναι σε εξέλιξη.

Παράδειγμα 7.2, Βήματα 4β & 5α

- Γνωρίζοντας την πίεση στο σημείο M για $t=4y$, υπολογίζουμε την υπερπίεση u_e (ή Δu) και τον βαθμό στερεοποίησης U στο σημείο M

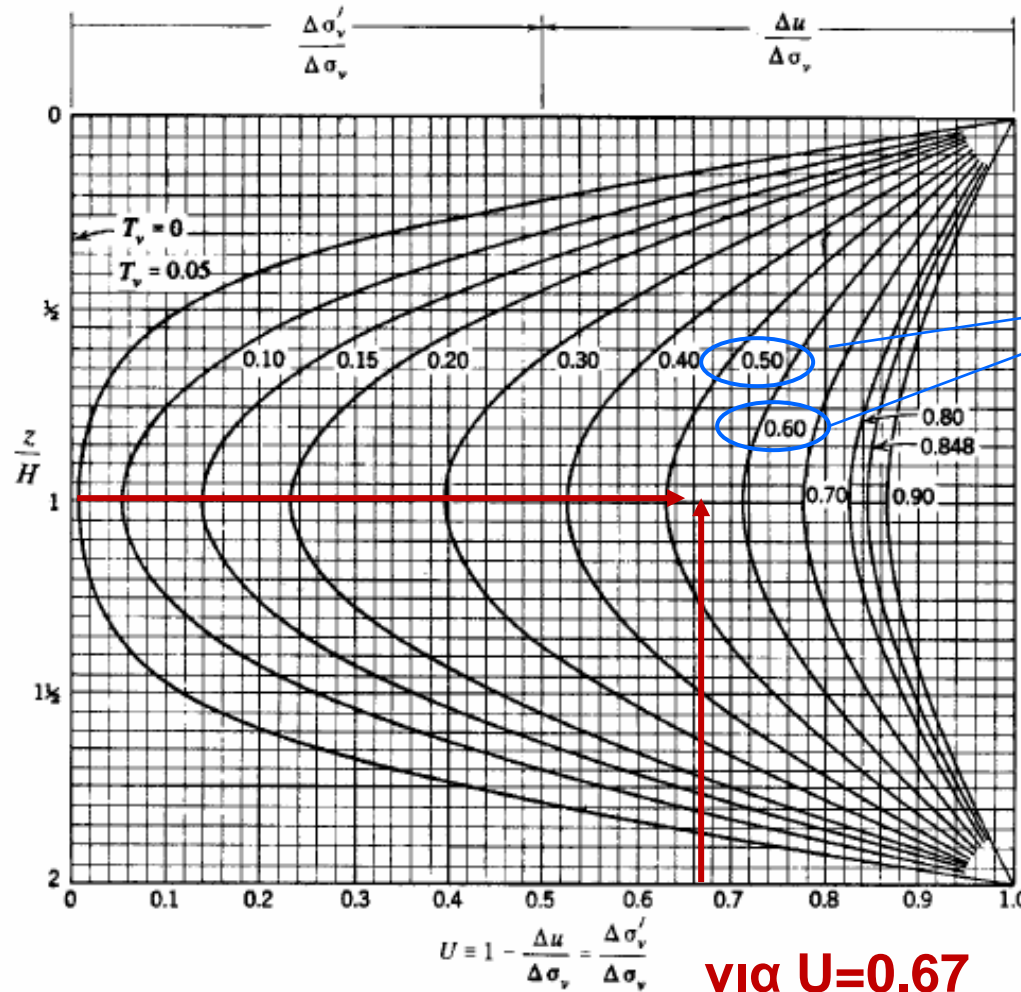
Υπολογίζω βαθμό στερεοποίησης U στο μέσον του αργιλικού στρώματος:

$$z = 5m, Z = z/H_{\max} = 5m/5m = 1$$

$$U_{(Z=1)} = 1 - \frac{u_e}{\Delta\sigma_v} = 1 - \frac{40kPa}{120kPa} = 1 - 0.33 = 0.67$$

- Από τον βαθμό στερεοποίησης U (=0.67) στο σημείο M, βρίσκουμε τον χρονικό παράγοντα T_v (σχήμα στην επόμενη διαφάνεια)

Παράδειγμα 7.2, Βήμα 5α



εκτιμώ
 $T_v = 0.55$

και για $z/H=1$
(μέσον στρώματος
αργίλου με διπλή
στράγγιση)

για $U=0.67$

Σχ. 7.3: Λύσεις της εξίσωσης μονοδιάστατης στερεοποίησης

Παράδειγμα 7.2, παύση

- Ας θυμηθώ τι είναι ο χρονικός παράγοντας T_V
- Αδιαστατοποιημένος χρόνος

$$T = \frac{C_V t}{H^2}$$

- Αφού $T_V = 0.55 < 1$, η στερεοποίηση είναι σε εξέλιξη

Παράδειγμα 7.2, Βήμα 5β

- Από τον βαθμό στερεοποίησης $U (=0.67)$ στο σημείο M , βρίσκουμε τον χρονικό παράγοντα $T_v (=0.55)$ και τον αντίστοιχο μέσο βαθμό στερεοποίησης \bar{U} για $t=4y$

ΠΕΔΙΟ – για όλο το στρώμα

Από τη διαφάνεια 31 βλέπω ότι για $T_v = 0.55$, ο μέσος βαθμός στερεοποίησης $\bar{U} > 0.6$

$$\rightarrow \bar{U} > 0.6 \rightarrow T_v = -0.085 - 0.933 \log_{10}(1 - \bar{U})$$

Για $T_v = 0.55$ βρίσκω $\bar{U} = 0.79$

Έχουμε ήδη βρει ότι η συνολική καθίζηση είναι 12 cm, όταν έχει ολοκληρωθεί η στερεοποίηση,

δηλ. $\bar{U} = 1$

Άρα, για μέσο βαθμό στερεοποίησης $\bar{U} = 0.79$, η καθίζηση είναι

$$\Delta H (4y) = 12 \text{ cm} \times 0.79 = 9.5 \text{ cm}$$

Παράδειγμα 7.2, Βήμα 6

- Από τον ορισμό του T_v βρίσκουμε τον συντελεστή στερεοποίησης C_v και, με γνωστό C_v , υπολογίζουμε τον χρόνο που αντιστοιχεί σε $T_v=1$, όταν πρακτικώς ολοκληρώνεται η στερεοποίηση

ΠΕΔΙΟ – για όλο το στρώμα

Κατά προσέγγιση, η καθίζηση θα ολοκληρωθεί για αδιαστατοποιημένο χρόνο $T_v = 1$. Για να βρω τον αντίστοιχο πραγματικό χρόνο, χρειαζόμαστε τον συντελεστή στερεοποίησης C_v

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H^2} \rightarrow 0.55 = \frac{C_v \cdot 4y}{(5m)^2} \rightarrow C_v = 3.44 \text{ m}^2/\text{y}$$

$$T_v = 1 = \frac{3.44 \text{ m}^2/\text{y} \cdot t}{5m^2} \rightarrow t = 7.26y$$

Άρα η καθίζηση θα συνεχίσει για ακόμα **3.26 χρόνια** (7.26-4y)

και η επιπλέον καθίζηση θα είναι **2.5 cm** (12-9.5cm)

Κύρια σημεία

Τι να θυμόμαστε 5 χρόνια μετά

“εντός ύλης”

- Η άμμος καθιζάνει αμέσως, η άργιλος αργά
- Το πόσο αργά εξαρτάται από (1) πόσο νερό πρέπει να φύγει (D) και (2) πόσο γρήγορα (k) μπορεί να φύγει
- Εξίσωση στερεοποίησης = εξίσωση αποτόνωσης υπερπίεσης νερού
- Για αρχικώς ομοιόμορφη υπερπίεση, δύο γραφικές λύσεις:
 - υπερπίεση σε κάθε σημείο στο αργιλικό στρώμα
 - μέσος βαθμός στερεοποίησης (ολοκλήρωσης καθίζησης)

“εκτός ύλης”

- Αν η καθίζηση είναι **μη αποδεκτά μεγάλη** μπορούμε:
 - Να επιλέξουμε σταδιακή κατασκευή = επιβολή φορτίου
 - Να κατασκευάσουμε προσωρινό επίχωμα
- Αν η καθίζηση είναι **μη αποδεκτά αργή** μπορούμε:
 - Να τοποθετήσουμε στραγγιστήρια για να μειώσουμε το μήκος στράγγισης (συχνά σε συνδυασμό με προσωρινό επίχωμα)
- Οι άργιλοι συνεχίζουν να καθιζάνουν και μετά την αποτόνωση της υπερπίεσης (δευτερογενής συμπίεση)

Πηγές υλικού διαφανειών

- Παρουσιάσεις Μ. Καββαδά, Μ. Πανταζίδου
- Σχήματα στις διαφάνειες 3, 5, 9, 29: Lambe T.W. and R.V. Whitman, 1969, Soil Mechanics, Wiley.
- Video στη διαφάνεια 9: Jaksa, M., 2009, Use of Demonstration Models in Undergraduate Geotechnical Engineering Education, Research Report No. R 177, School of Civil, Environmental and Mining Engineering, The University of Adelaide, Australia.
- Διαφάνεια 10: Budhu, M., 2011, Soil Mechanics and Foundations, 3rd Ed. (1st Ed. 2000), Wiley.
- Διαφάνειες 13, 14, 17: φωτογραφίες από Flickr (Creative Commons)
- Διαφάνειες 14, 15: Gambolati, G., P. Gatto and R.A. Freeze, 1974, Mathematical formulation of the subsidence of Venice 2. Results, Water Resources Research, 10(3):563-577.
- Διαφάνεια 16: Carbognin, L., P. Teatini and L. Tosi, 2005, Land Subsidence in the Venetian area: known and recent aspects, Giornale di Geologia Applicata, doi:10.1474/GGA.2005-01.0-01.0001
- Διαφάνειες 18, 20: Auvinet, G., 2016, Geotechnical challenges in Mexico City Clay, ISSMGE Webinar 30-3-2016, <https://www.issmge.org/education/recorded-webinars/geotechnical-challenges-in-mexico-city-clay>
- Διαφάνεια 19: Zeevaert, L., 1953, Pore pressure measurements to investigate the main source of subsurface subsidence in Mexico City, Proceedings of the III International Conference on Soil Mechanics, Zurich.
- Διαφάνεια 22: φωτογραφία από εφημερίδα Καθημερινή
- Σχήματα στις διαφάνειες 28 – 31: Καββαδάς, Μ. 2009, Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Εκδόσεις Συμείων.