



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΗΡΩΩΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ 9  
15780 ΖΩΓΡΑΦΟΥ ΑΘΗΝΑ

## Τεχνική Γεωλογία Ι

### Διδάσκοντας:

Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ  
Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργιών

## Τεχνικογεωλογική - Γεωτεχνική Έρευνα Πεδίου (Επί τόπου Δοκιμές)

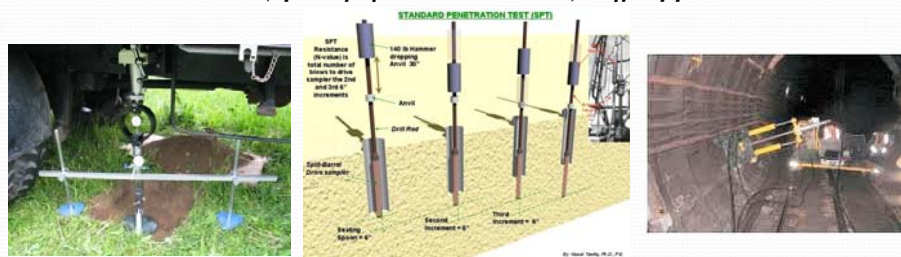
## Αντικείμενο της Διάλεξης

Αντικείμενο της διάλεξης είναι η παρουσίαση των επιτόπου δοκιμών που εκτελούνται για τον προσδιορισμό των υδραυλικών αλλά και των μηχανικών χαρακτηριστικών των γεωλογικών σχηματισμών, στο πλαίσιο της Τεχνικογεωλογικής - Γεωτεχνικής έρευνας πεδίου.

## Δοκιμές Πεδίου ή Επιτόπου Δοκιμές

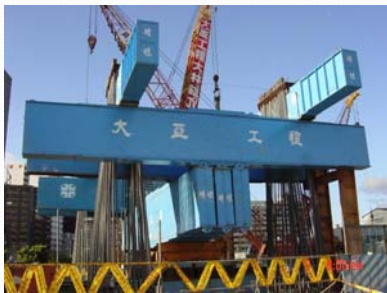
Ως δοκιμές πεδίου ή επιτόπου δοκιμές χαρακτηρίζονται οι δοκιμές που διενεργούνται σε δείγματα που βρίσκονται στο φυσικό τους περιβάλλον και σε δείγματα που έχουν υποστεί την ελάχιστη δυνατή διαταραχή.

Εκτελούνται στην επιφάνεια του εδάφους, εντός σκαμμάτων, εντός γεωτρήσεων και εντός σηράγγων.



## Κατηγοριοποίηση δοκιμών

- Ανάλογα με το μέγεθος του δείγματος διακρίνονται σε **δοκιμές πεδίου μεγάλης κλίμακας**, οι οποίες πραγματοποιούνται σε δείγματα μεγάλων διαστάσεων, και σε **δοκιμές πεδίου μικρής κλίμακας**, οι οποίες πραγματοποιούνται σε δείγματα περιορισμένων διαστάσεων, π.χ. στην περίμετρο γεώτρησης.



Δοκιμή στατικής φόρτισης μεγάλης κλίμακας

Δοκιμή στατικής φόρτισης μικρής κλίμακας



- Ανάλογα με τις παραμέτρους που προσδιορίζουν διακρίνονται σε **δοκιμές προσδιορισμού υδραυλικών χαρακτηριστικών**, π.χ. Maag, Lefranc, Lugeon, και σε **δοκιμές προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών**, π.χ. SPT, CPT, Vane test, κ.α.
- Ανάλογα με τον τρόπο επιβολής των φορτίων διακρίνονται σε **δοκιμές φόρτισης**, κατά τη διάρκεια των οποίων πραγματοποιείται φόρτιση του άμεσου περιβάλλοντος μέσα στο οποίο είναι ήδη τοποθετημένος ο πρότυπος φοραετής, και σε **δοκιμές διείσδυσης**, κατά τη διάρκεια των οποίων πραγματοποιείται φόρτιση κατά τη διείσδυση του πρότυπου φοραετή.
- Οι δοκιμές διείσδυσης διακρίνονται περαιτέρω σε **δοκιμές δυναμικής διείσδυσης**, κατά την εκτέλεση των οποίων ο πρότυπος φοραετής προωθείται στο έδαφος με κρούσεις, και σε **δοκιμές στατικής διείσδυσης**, κατά την εκτέλεση των οποίων ο πρότυπος φοραετής προωθείται στο έδαφος με σταθερή ταχύτητα και με τη χρήση υδραυλικών συστημάτων.

## Πλεονεκτήματα επιτόπου δοκιμών

- **Μειώνεται δραστικά ο αριθμός των απαιτούμενων ερευνητικών γεωτρήσεων.**
- **Αυξάνεται η ταχύτητα παροχής πληροφοριών.** Απαλείφουν το χρόνο μεταφοράς και δοκιμής των δειγμάτων στο εργαστήριο και ελαχιστοποιούν το χρόνο επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων.
- **Μειώνεται το κόστος** των ερευνητικών προγραμμάτων.
- **Μειώνεται σημαντικά η διαταραχή του δείγματος.** Η διαταραχή του δείγματος αποφεύγεται ή περιορίζεται σε μικρή απόσταση γύρω από τον άξονα της γεώτρησης.
- **Αποφεύγεται η διαταραχή του επιτόπιου πεδίου τάσεων.**
- Οι επιτόπου δοκιμές με το πλήθος των εμπειρικών τύπων που τις συνοδεύουν, **επιτρέπουν τον υπολογισμό παραμέτρων** που απαιτούνται για την κατασκευή διαφόρων τεχνικών έργων **χωρίς τον ενδιάμεσο υπολογισμό φυσικών και μηχανικών παραμέτρων.**

## Επί τόπου δοκιμές προσδιορισμού υδραυλικών χαρακτηριστικών

## Τρόποι υπολογισμού του συντελεστή υδροπερατότητας

- Ο προσδιορισμός της τιμής του συντελεστή υδροπερατότητας κάτω από τον υδροφόρο γίνεται με τη βοήθεια **δοκιμών άντλησης (pumping out tests)** σε υδρογεωτρήσεις. Κατά τις δοκιμές άντλησης σε μία κύρια γεώτρηση γίνεται η άντληση και σε πιεζόμετρα δορυφόρους η παρατήρηση του κώνου πτώσης της στάθμης του νερού. Μέθοδοι υπολογισμού που χρησιμοποιούνται κατά τις δοκιμές αυτές, όπως οι μέθοδοι Theis, Cooper – Jacob κ.λ.π., περιγράφονται αναλυτικά στα εγχειρίδια υδρογεωλογίας.
- Άλλες μέθοδοι υπολογισμού του συντελεστή υδροπερατότητας οι οποίες και αναλύονται σε επόμενες διαλέξεις είναι:
  - Εκτίμηση με **εμπειρικούς τύπους και διαγράμματα**.
  - Υπολογισμός με τη χρήση **εργαστηριακών δοκιμών**, π.χ. περατόμετρα σταθερού ή μεταβλητού φορτίου
  - Επί τόπου με **δοκιμές εισπίεσης (Pumping in tests)**.

## Δοκιμές εισπίεσης νερού (Pumping in tests)

- Αποτελούν τον *καταλληλότερο τρόπο επιτόπου εκτίμησης* της υδραυλικής αγωγιμότητας,  $k$ , σε επιλεγμένα τμήματα μίας γεωτεχνικής γεώτρησης.
- Αποτελούν τον μόνο τρόπο επιτόπου υπολογισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας, κυρίως για το τμήμα του υπεδάφους που βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, δηλαδή στην ακόρεστη ζώνη.
- Οι δοκιμές εισπίεσης χαρακτηρίζονται από την **ταχύτητα εκτέλεσής** τους, τη **δυνατότητα συχνής επανάληψης** αυτών κατά τη διάρκεια της διάτρησης, αλλά και για την καλή **αξιοπιστία των αποτελεσμάτων** τους.

Οι επιτόπου δοκιμές εισπίεσης διακρίνονται σε:

**Δοκιμές σταθερού φορτίου (Constant head test)** κατά τις οποίες διοχετεύεται νερό στη γεώτρηση και καταγράφεται η ποσότητα νερού που απαιτείται για τη διατήρηση της στάθμης σε σταθερό επίπεδο.

**Δοκιμές μεταβλητού φορτίου (Falling head test)** κατά τις οποίες η στάθμη του νερού ανυψώνεται και καταγράφεται ο ρυθμός πτώσης στάθμης.

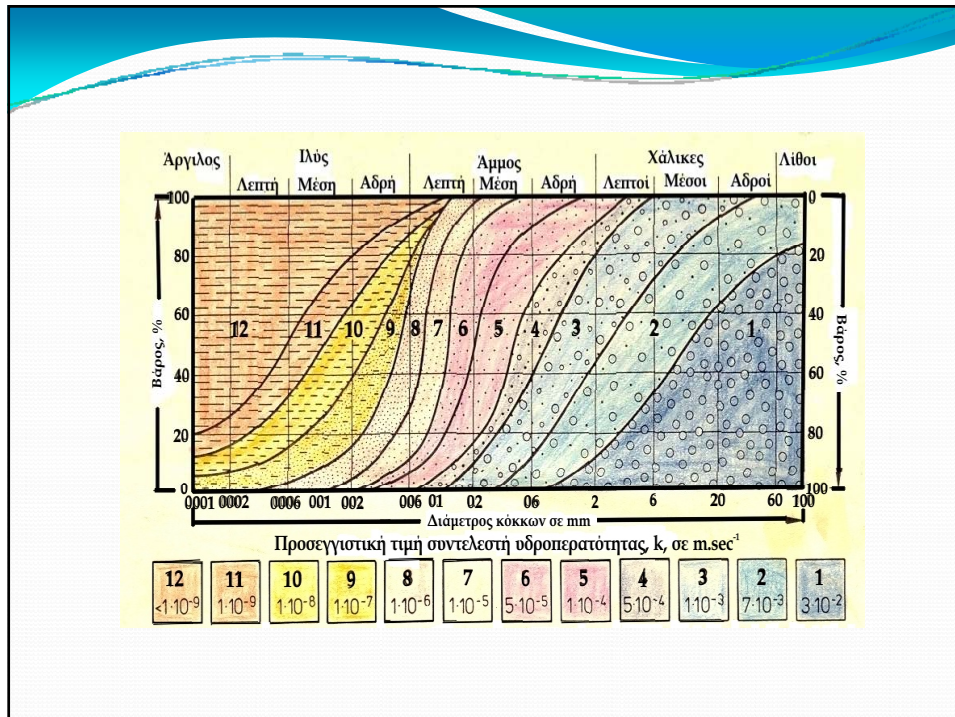
## ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ & ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

**Διαπερατότητα** είναι η ιδιότητα των υλικών να επιτρέπουν την κίνηση ενός ρευστού διαμέσου της μάζας τους.

Η διαπερατότητα στους πορώδεις σχηματισμούς σχετίζεται με:

➤ Το σχήμα των κόκκων και την κοκκομετρική σύσταση, παράμετροι που καθορίζουν τις διαστάσεις των πόρων (τριχοειδείς ή μη) αλλά και τη μεταξύ τους επικοινωνία (ενεργό πορώδες).

➤ Οι βαθμοί στερεοποίησης και διαγένεσης του πορώδους μέσου, οι οποίοι αυξανόμενοι μειώνουν τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας.



Η δευτερογενής διαπερατότητα, στα πετρώματα, επηρεάζεται από:

- Την πυκνότητα και το άνοιγμα των ρωγμών
- Την πυκνότητα και το εύρος των εγκοίλων

Δευτερευόντως, η θερμοκρασία του σχηματισμού και του ρευστού, επηρεάζει το κινηματικό ιξώδες του ρευστού, και ο όγκος των αέριων εγκλεισμάτων, μειώνει το ενεργό πορώδες.

**Από τα προαναφερόμενα προκύπτει ότι, πέρα από το υλικό μέσο (μέγεθος πόρων, βαθμός σύνδεσης των πόρων κλπ) στην περίπτωση της υδραυλικής αγωγιμότητας υπεισέρχονται και οι ιδιότητες του ρευστού (ιξώδες, πυκνότητα κλπ).**

Στην περίπτωση που το κινούμενο ρευστό είναι το νερό, τότε γίνεται αναφορά στον **συντελεστή υδροπερατότητας**.

Συνεπώς θα πρέπει να διακρίνεται η

**εσωτερική ή πραγματική διαπερατότητα,  $K$ ,**

η οποία είναι μια ιδιότητα του υλικού μέσου μεταβίβασης του ρευστού και ανεξάρτητη των ιδιοτήτων του ρευστού που "μεταβιβάζεται", από την

**υδραυλική αγωγιμότητα ή υδροπερατότητα,  $k$ ,**

η οποία αναφέρεται στη δυνατότητα – ταχύτητα διέλευσης νερού μέσα από ένα κορεσμένο μέσο.

## Δοκιμή MAAG (μεταβλητού φορτίου)

Η δοκιμή Maag, που χρησιμοποιείται στην περίπτωση λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών, δηλαδή υλικών με χαμηλή υδροπερατότητα.

Παροχετεύεται νερό στη γεώτρηση και μετρείται ο χρόνος που χρειάζεται για να κατέβει η νέα στάθμη που δημιουργήθηκε σε μια πιο χαμηλή θέση.

➤ Αν το πρόσθετο υδραυλικό φορτίο σε σχέση με την υδροστατική στάθμη του υδροφόρου είναι σε ένα ύψος περισσότερο από 2 μέτρα, οι μετρήσεις χρόνου - στάθμης γίνονται κάθε φορά που η στάθμη πέφτει περίπου 10 εκατοστά.

➤ Αν το φορτίο είναι σε ύψος λιγότερο από ένα μέτρο, οι αναγνώσεις της πτώσης της στάθμης θα γίνονται κάθε 1, 2 ή και 5cm.

➤ Οι μετρήσεις συνεχίζονται μέχρι το πρόσθετο υδραυλικό φορτίο να μειωθεί κατά 20%.

## Υπολογισμός Συντελεστή Υδραυλικής Αγωγιμότητας

$$k = \frac{A}{ct} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

**A** = το εμβαδό της διατομής του δοκιμαζόμενου τμήματος ( $\pi r^2$  σε  $\text{cm}^2$ ),  
**c** = συντελεστής που εξαρτάται από τη γεωμετρία του δοκιμαζόμενου τμήματος  
**t** = η χρονική διάρκεια του βήματος πτώσης της στάθμης (σε sec),  
 **$h_1$**  = το αρχικό ύψος της στάθμης πάνω από το επίπεδο αναφοράς (σε cm),  
 **$h_2$**  = το τελικό ύψος της στάθμης πάνω από το επίπεδο αναφοράς (σε cm).

Σαν επίπεδο αναφοράς λαμβάνεται  
**το μέσο του δοκιμαζόμενου τμήματος**,  
όταν η δοκιμή εκτελείται σε ξερό περιβάλλον ή  
**η υδροστατική στάθμη**,  
όταν η δοκιμή γίνεται κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.



Αναφορικά με το **συντελεστή c** αυτός μπορεί να λάβει διάφορες τιμές ανάλογα με τη γεωμετρία του δοκιμαζόμενου τμήματος, όπως:

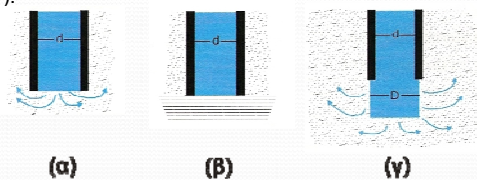
$c = 4\pi r$  για **σφαιρικού σχήματος** δοκιμαζόμενο τμήμα, ακτίνας  $r$ ,

$c = 2,75d$  όταν το δοκιμαζόμενο τμήμα είναι η **κυκλική επιφάνεια του πυθμένα** της γεώτρησης, με  $d$  την εσωτερική διάμετρο της προσωρινής σωλήνωσης στο βάθος της δοκιμής (Σχήμα α),

$c = 2d$  όταν η δοκιμή γίνεται στην **επαφή υδροστεγανού – υδροπερατού** σχηματισμού (Σχήμα β),

$c = \frac{2\pi L}{\ln(\frac{2L}{D})}$  όταν το δοκιμαζόμενο τμήμα είναι διαμέτρου  $D$  και μήκους  $L$  με σχέση  **$L \geq 5D$**  (Σχήμα γ), και τέλος,

$c = \frac{2\pi L}{\sinh^{-1}(\frac{L}{D})}$  όταν το δοκιμαζόμενο τμήμα είναι διαμέτρου  $D$  και μήκους  $L$  με σχέση  **$5D > L > D/2$**  (Σχήμα γ).



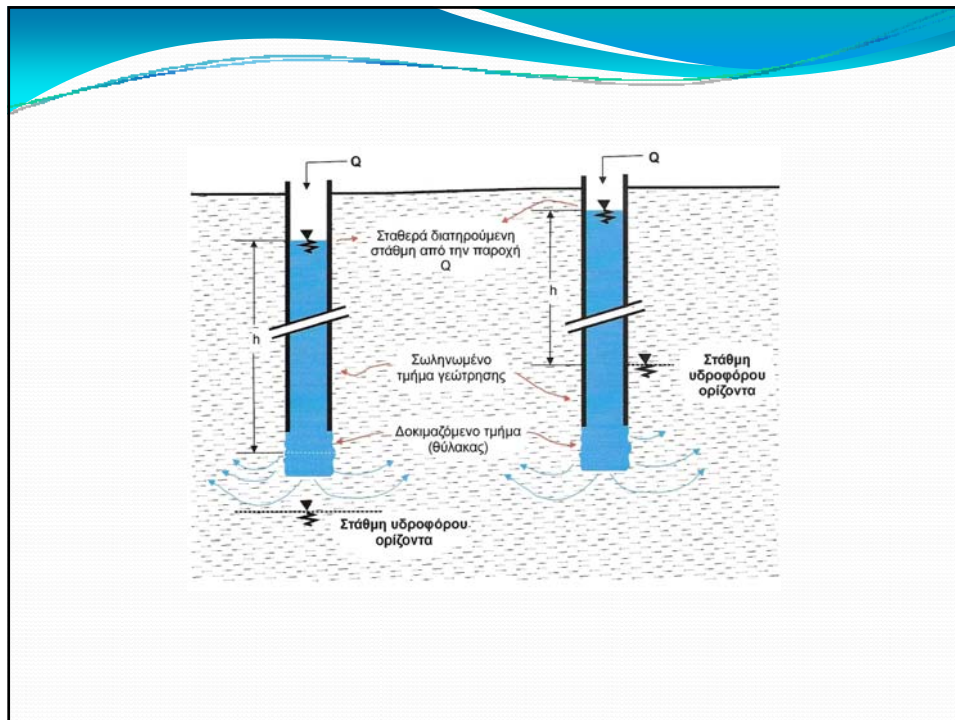
\*  $\sinh(x)$  hyperbolic sine of  $x$ :  $(e^x - e^{-x})/2$

## Δοκιμή LEFRANC (σταθερού φορτίου)

Η δοκιμή Lefranc εφαρμόζεται στην περίπτωση αδρόκοκκων εδαφικών υλικών.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, με τη βοήθεια αντλίας νερού, διοχετεύεται στη γεώτρηση ελεγχόμενη ποσότητα νερού έτσι ώστε να διατηρείται η στάθμη σε επιθυμητό ύψος. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής μετρείται η παροχή ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. 1min) και για προδιαγεγραμμένο χρονικό διάστημα (π.χ. 10-20min).

Γενικά ο υπολογισμός του συντελεστή υδροπερατότητας εξαρτάται από τη μορφή του δοκιμαζόμενου τμήματος αλλά και τη θέση του σε σχέση με τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.



### Υπολογισμός Συντελεστή Υδραυλικής Αγωγιμότητας

$$k = \frac{Q}{ch}$$

Όπου:

Q = η παροχή του νερού σε cm<sup>3</sup>/sec,

c = συντελεστής σχετιζόμενος με τη γεωμετρία του δοκιμαζόμενου τμήματος, ακριβώς όπως αναφέρθηκε στη δοκιμή Maag,

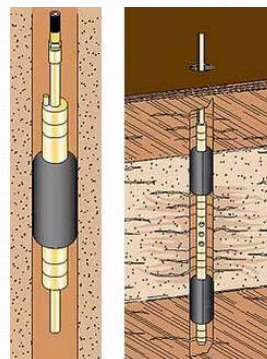
h = το ύψος της φορτίζουσας στήλης, σε cm

Όπως και στη δοκιμή Maag, σαν επίπεδο αναφοράς λαμβάνεται **το μέσο του δοκιμαζόμενου τμήματος**, όταν η δοκιμή εκτελείται σε ξερό περιβάλλον, ή **η υδροστατική στάθμη**, όταν η δοκιμή γίνεται κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου οριζοντα.

## Δοκιμή LUGEON

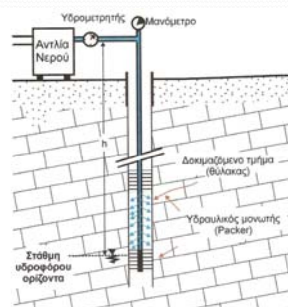
Για τους βραχώδεις σχηματισμούς χρησιμοποιούνται οι δοκιμές παρεμβυσμάτων (Packer tests).

Στη δοκιμή Lugeon το δοκιμαζόμενο τμήμα συνήθως έχει μήκος 3-5m και εκτείνεται έως τον πυθμένα της γεώτρησης. Το δοκιμαζόμενο τμήμα απομονώνεται από πάνω με κατάλληλο παρέμβυσμα (packer) το οποίο διογκούμενο με ειδική τεχνική, εφάπτεται ερμητικά με τα τοιχώματα της γεώτρησης. Με τη διαδικασία αυτή κατά τη διάρκεια της δοκιμής δεν επιτρέπεται διαφυγή νερού μέσα από τη στήλη της γεώτρησης. Μετά την απομόνωση, εισπνέζεται νερό από την επιφάνεια του εδάφους με τη βοήθεια αντλίας.



Η δοκιμή εκτελείται με την εφαρμογή πίεσης κατά βαθμίδες. Ένα μανόμετρο, ένας υδρομετρητής και μία βαλβίδα ανακούφισης, προσαρμοσμένα σε κατάλληλο αεριοφυλάκιο (πιεστικό καζανάκι), επιτρέπουν τη μέτρηση της ποσότητας νερού που απορροφήθηκε, για κάθε βαθμίδα πίεσης. Κάθε βαθμίδα πίεσης διαρκεί 5 ή καλύτερα 10min και η ποσότητα του νερού που απορροφάται από τη βραχομάζα μετρίεται με τη χρήση του υδρομετρητή.

Η δοκιμή γίνεται με την εφαρμογή κατάλληλα επιλεγμένων πιέσεων προσαρμοσμένων στις πιέσεις λειτουργίας του κάθε τεχνικού έργου. Η μέγιστη πίεση προσεγγίζεται με βαθμίδες σταδιακά αυξανόμενης πίεσης και μετά την επίτευξη της οι βαθμίδες επαναλαμβάνονται με ανάστροφη φορά, μέχρι την πλήρη αποτόνωση του δοκιμαζόμενου θύλακα (π.χ. 1-2-4-6-4-2-1 Atm).



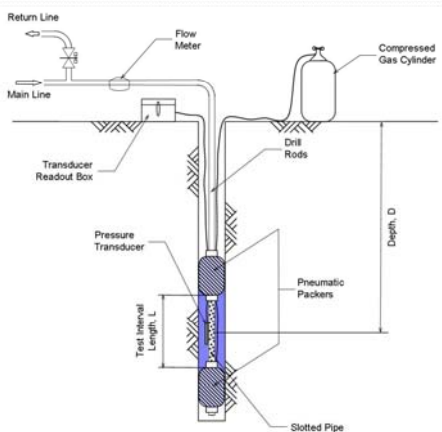
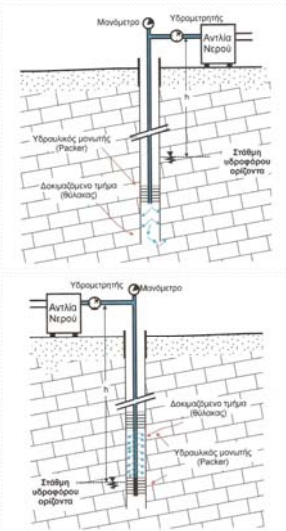
## Πραγματική Πίεση Εκτέλεσης της Δοκιμής

Η πραγματική πίεση που εφαρμόζεται στο δοκιμαζόμενο τμήμα ισούται με **το άθροισμα της μανομετρικής πίεσης και της υδροστατικής πίεσης** του νερού που πληρώνει την κατιούσα στήλη των στελεχών του γεωτρήσανου.

Σαν παράδειγμα αναφέρεται ότι δοκιμή που εκτελείται σε βάθος 10m ασκεί στο δοκιμαζόμενο τμήμα μια ατμόσφαιρα 1Atm επιπρόσθετης πίεσης λόγω της στήλης νερού ύψους 10 m που πληρώνει τα στελέχη από την επιφάνεια του εδάφους έως το μέσο του δοκιμαζόμενου τμήματος.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της δοκιμής, **οι απώλειες πίεσης λόγω τριβών** κατά την κίνηση του νερού μέσα στο δίκτυο των σωλήνων της διάταξης πρέπει να αφαιρούνται από τις τελικές πιέσεις. Όμως, επειδή οι απώλειες αυτές είναι συνήθως πολύ μικρές και δύσκολο να μετρηθούν, δε λαμβάνονται υπόψη.

## Διάταξη με Μονό και Διπλό Packer



Σύγχρονη διάταξη με αισθητήρα πίεσης

## Μονάδα Lugeon

Κατά την εφαρμογή των συγκεκριμένων δοκιμών οι μετρήσεις της υδροπερατότητας γίνονται σε μονάδες Lugeon.

**Μια μονάδα Lugeon, είναι η υδροπερατότητα που έχει μια βραχώδης μάζα κάτω από πίεση 10Atm (φορτίο 100m πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα), όταν ένα (1) m γεώτρησης διαμέτρου NX (76mm) σε αυτή τη βραχομάζα επιτρέπει απώλειες ενός (1) λίτρου νερού ανά λεπτό.**

Για πρακτικούς λόγους εφαρμογής έχει καθιερωθεί ένας παράγοντας μετατροπής των μονάδων Lugeon σε τιμές συντελεστή  $k$  που εξισώνει **ένα (1) Lugeon με  $10^{-5}$  cm/sec ( $10^{-7}$  m/sec).**

Αναλυτικότερα, επικρατεί η άποψη (Lugeon, 1932) ότι:

- Για φράγματα πάνω από 30m ύψος η βραχομάζα θεμελίωσης θεωρείται στεγανή αν οι απώλειες είναι μικρότερες των 1-2 μονάδων Lugeon (U.L.).
  - Για φράγματα μέχρι ύψους 30m το αντίστοιχο αποδεκτό όριο είναι 3 U.L.
  - Για πολύ μικρά φράγματα το όριο των 3 U.L. πιστεύεται ότι είναι υπερβολικό.
- Στην περίπτωση αυτή πρέπει οι μέγιστες πιέσεις της δοκιμής να περιορίζονται οπωσδήποτε κάτω από τις 10 Atm (Μαρίνος, 1969, Antoine-Barbier, 1973).

## Υπολογισμός Συντελεστή Υδραυλικής Αγωγιμότητας

$$k(\text{cm/sec}) = \frac{Q}{2\pi LP} \times \ln \frac{2L}{D}$$

Όπου:

Q = οι απώλειες (σε cm<sup>3</sup>/sec ή lit/min),

L = το μήκος του εισπιεζόμενου τμήματος (σε cm),

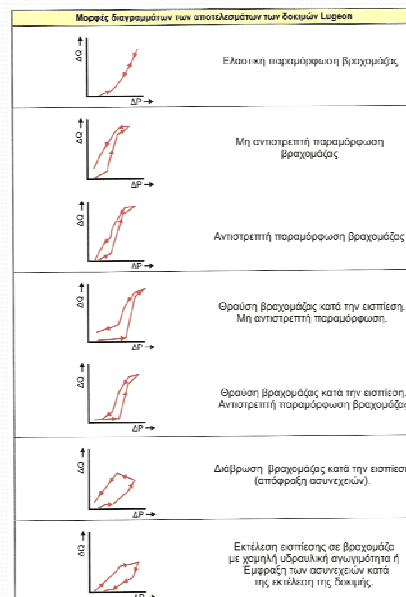
P = η πραγματική ασκούμενη πίεση της δοκιμής σε cm στήλης νερού, (10m στήλης νερού = 1atm),

D = η διάμετρος του δοκιμαζόμενου τμήματος (σε cm).

## Ερμηνεία Δεδομένων

Επιπλέον οι δοκιμές Lugeon μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον καθορισμό της **κατάστασης του κερματισμού μιας βραχομάζας** αλλά και για τη μελέτη της συμπεριφοράς αυτής σε καθεστώς υψηλής υδροστατικής πίεσης.

Δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να διαπιστωθεί αν οι υψηλές πιέσεις που πρόκειται να εφαρμοστούν στη βραχομάζα κατά τη λειτουργία ενός τεχνικού έργου (π.χ. φράγματα, λιμνοδεξαμενές, κλπ) είναι δυνατόν να προκαλέσουν **ελαστικές ή πλαστικές παραμορφώσεις, θραύσεις ή ακόμα και απόφραξη των ασυνεχειών** από το λεπτομερές υλικό πλήρωσής τους.



## Επί τόπου δοκιμές προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών

### Επί τόπου δοκιμές προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών

Οι συχνότερα εφαρμοζόμενες επί τόπου δοκιμές είναι:

- Δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης (S.P.T.) (σε αμμώδεις και συνεκτικούς εδαφικούς σχηματισμούς)
- Δοκιμή Στατικής Πενетроμέτρησης (CPT) (σε αμμώδεις και συνεκτικούς εδαφικούς σχηματισμούς)
- Πρεσσιομετρική Δοκιμή (σε αμμώδεις και συνεκτικούς εδαφικούς σχηματισμούς)
- Δοκιμή Πτερυγίου (σε μαλακές αργίλους και ιλύες, των οποίων η αστράγγιστη διατμητική αντοχή δεν υπερβαίνει το  $1 \text{ kg/cm}^2$ )
- Δοκιμή Φόρτισης Πλάκας (σε επιφανειακά στρώματα του εδάφους- σε επιφάνειες θεμελίωσης)

## Δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης (S.P.T.)



**Karl Terzaghi** (κέντρο) & **Arthur Casagrande** (δεξιά)  
Αύγουστος του 1957

**Karl von Terzaghi** (October 2, 1883 – October 25, 1963) Αυστριακός Πολιτικός Μηχανικός και Γεωλόγος, αποκαλείται ο ``πατέρας της εδαφομηχανικής``.

## Σκοπός της δοκιμής

Με την πρότυπη δοκιμή διείσδυσης επιδιώκεται ο **επιτόπου προσδιορισμός της αντίστασης** που προβάλλει το έδαφος στη διείσδυση ενός πρότυπου διαιρετού δειγματολήπτη που προωθείται κρουστικά.

Παράλληλα πραγματοποιείται και η **λήψη διαταραγμένων δειγμάτων** για την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών.

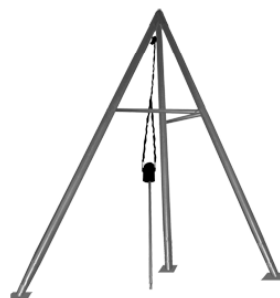
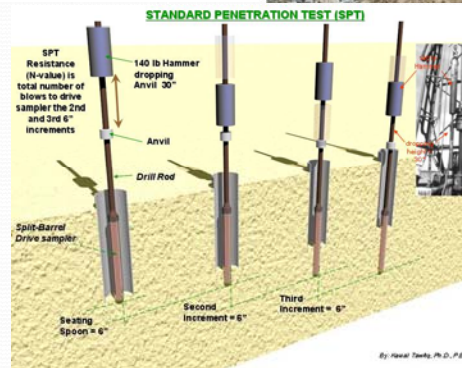
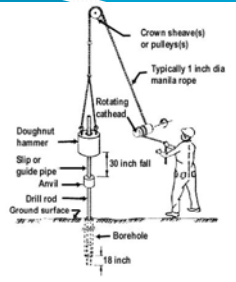


## Περιγραφή

➤ προσδιορίζεται ο αριθμός των κρούσεων (N) για προχώρηση του ειδικού δειγματολήπτη Terzaghi κατά 45cm, με την πτώση αντίβαρου 63,5kg από ύψος 76,2cm, σε τρία διαδοχικά τμήματα των 15cm.

➤ Ο αριθμός των κρούσεων για τη διεύθυνση του δειγματολήπτη στο πρώτο τμήμα των 15cm **απορρίπτεται** καθώς θεωρείται ότι είναι υλικό διαταραγμένο από τη διαδικασία διάτρησης, ή υλικά που έχουν καταπέσει από το ασωλήνωτο τμήμα της γεώτρησης.

➤ Ο χαρακτηρισμός των δειγμάτων και ο υπολογισμός των επιμέρους μηχανικών παραμέτρων γίνεται βάσει της προχώρησης στα δύο υπόλοιπα τμήματα των 15cm (σύνολο 30cm).



Κλασική Διάταξη  
Μη Αυτόματης  
Απελευθέρωσης  
Αντίβαρου



Διάταξη Αυτόματης  
Απελευθέρωσης  
Αντίβαρου



Γεωτρητικό  
Συγκρότημα με  
Αεροσφύρα για  
Εκτέλεση SPT

(A) Δειγματολήπτης για λεπτομερείς σχηματισμούς,  
 (B) Αιχμή για αδρομερείς σχηματισμούς.

**Split Barrel Sampler**  
 Διαιρούμενος Δειγματολήπτης SPT

Λεπτομέρεια  
 Δειγματολήπτη SPT



## Σφάλματα των μετρήσεων υπαίθρου

Από τη μακροχρόνια χρήση δεδομένων της δοκιμής SPT διαπιστώθηκε ότι στη διαδικασία υπεισέρχονται αρκετοί παράγοντες λάθους. Ο βασικότερος παράγοντας λάθους είναι:

- > Η απομείωση της αποτελεσματικής ενέργειας πρόσκρουσης του αντίβαρου
- > Το μεγάλο μήκος της στήλης
- > Το βάρος των υπερκείμενων σχηματισμών
- > Η διάμετρος της γεώτρησης
- > Ο τύπος του δειγματολήπτη

Η τιμή του  $N_{\text{field}}$  μπορεί να διορθώνεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$N_{60} = N_{\text{field}} \times C_e \times C_1 \times C_s \times C_d \times C_N$$

Όπου:

$C_e$  : συντελεστής διόρθωσης σύμφωνα με το σύστημα απελευθέρωσης της ενέργειας του αντίβαρου.

$C_1$  : συντελεστής διόρθωσης σύμφωνα με το μήκος της στήλης διείσδυσης

$C_s$  : συντελεστής διόρθωσης σύμφωνα με το είδος του δειγματολήπτη

$C_d$  : συντελεστής διόρθωσης σύμφωνα με τη διάμετρο της γεώτρησης

$C_N$  : συντελεστής διόρθωσης σύμφωνα με την πίεση των υπερκείμενων,  $\sigma_v$

$$C_N = \frac{P}{\sqrt{\sigma_v}}$$

όπου η πίεση αναφοράς  $P$  έχει ως προτεινόμενη τιμή τα 100kPa ή 1Kg/cm<sup>2</sup>.



| $C_e$ = Correction for Hammer Release System Energy |         |              |      |
|---|---------|--------------|------|
| Release Type  | Cathead | Hammer       |      |
| (USA) Trip  | None    | Automatic    | 1.38 |
| (USA) Slip rope, 2 turns                            | Large   | Safety       | 0.92 |
| (USA) Slip rope, 2 turns                            | Large   | Donut        | 0.75 |
| (Japan) Tombi                                       | None    | Automatic    | 1.30 |
| (Japan) Slip rope, 2 turns                          | Small   | Donut        | 0.90 |
| (UK) Trip   | None    | Pilcon       | 1.00 |
| (UK) Slip rope, 1 turn                              | Small   | Old standard | 1.00 |
| (China) Trip  | None    | Automatic    | 1.00 |
| (China)   | —       | Donut        | 0.83 |

| $C_l$ = Correction for Rod Length |   |       |       |       |         |
|-----------------------------------|---|-------|-------|-------|---------|
| Drill rod length, meters          | = | 3-4   | 4-6   | 6-10  | over 10 |
| Drill rod length, feet            | = | 10-13 | 13-20 | 20-33 | over 33 |
| Rod length correction, $C_l$      | = | 0.75  | 0.85  | 0.95  | 1.00    |

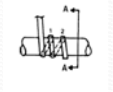
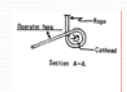
  

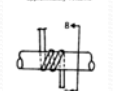

| $C_s$ = Correction for Sampler Type |   |                           |                         |                         |
|-------------------------------------|---|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Split Barrel Sampler Type           | = | Without Liner<br>(1½" ID) | With Liner<br>(1-¾" ID) | With Liner<br>(1-¾" ID) |
|                                     |   |                           | Dense sand, clay        | Loose sand              |
| Sampler Correction, $C_s$           | = | 1.0                       | 0.80                    | 0.90                    |

| $C_d$ = Correction for Bore Hole Diameter* |   |        |      |      |
|--|---|--------|------|------|
| Bore Hole Diameter, cm                     | = | 6.5-12 | 15   | 20   |
| Bore Hole Diameter, in.                    | = | 2.5-5  | 6    | 8.25 |
| Bore Hole Correction, $C_d$                | = | 1.0    | 1.05 | 1.15 |

\*  $C_d = 1.0$  for all diameters of hollow stem augers where SPT is taken through the stem.

(B) double rotation  
approximately 2½ turns

Προτεινόμενες τιμές  
των συντελεστών  
διόρθωσης σύμφωνα  
με τον Skempton  
(1986).

## Προσδιοριζόμενες Μηχανικές Παράμετροι

Η δοκιμή SPT χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό των ακόλουθων μηχανικών παραμέτρων:

- της σχετικής πυκνότητας,  $D_r$ ,
- της γωνίας εσωτερικής τριβής,  $\phi$ ,
- του οιδιμετρικού μέτρου ελαστικότητας,  $E_s$ ,
- του δείκτη συνεκτικότητας,  $I_c$ ,
- της αστράγγιστης αντοχής,  $q_u$ ,
- της φέρουσας ικανότητας,  $q$ , και της επιτρεπόμενης τάσης,  $P$ , επιφανειακών και βαθιών θεμελιώσεων,
- της καθίζησης,  $s$ , επιφανειακών και βαθιών θεμελιώσεων,

## Προσδιορισμός Σχετικής Πυκνότητας, $D_r$

Ένα χρήσιμο μέγεθος που συγκρίνει την πραγματική κατάσταση μιας άμμου με τις ακραίες τιμές της πυκνότητάς της είναι η σχετική πυκνότητα. Ορίζεται ως σχετική πυκνότητα το πηλίκο:

$$D_r = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$$

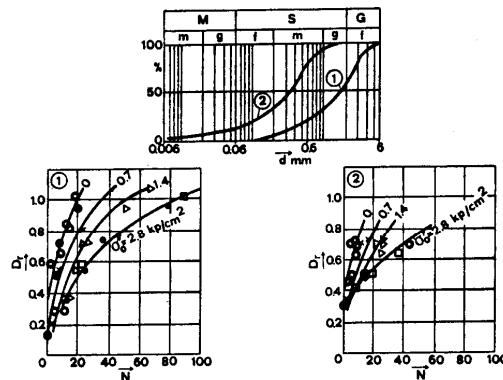
Όπου:

- $e$  : ο πραγματικός λόγος κενών της άμμου,
- $e_{\max}$  : ο λόγος κενών που αντιστοιχεί στην ελάχιστη πυκνότητα και
- $e_{\min}$  : ο λόγος κενών που αντιστοιχεί στη μέγιστη πυκνότητα.

Με βάση την τιμή της σχετικής πυκνότητας κατατάσσονται οι αμμώδεις σχηματισμοί σε κατηγορίες :

| Αριθμός Κρούσεων | Χαρακτηρισμός Άμμου     | Σχετική Πυκνότητα, $D_r$ |
|------------------|-------------------------|--------------------------|
| 0 < N ≤ 4        | Έδαφος Πολύ Χαλαρό      | 0-0.15                   |
| 4 < N ≤ 10       | Έδαφος Χαλαρό           | 0.15-0.35                |
| 10 < N ≤ 30      | Έδαφος Μέσης Πυκνότητας | 0.35-0.65                |
| 30 < N ≤ 50      | Έδαφος Πυκνό            | 0.65-0.85                |
| 50 < N           | Έδαφος Πολύ Πυκνό       | 0.85-1.0                 |

Μεταγενέστεροι ερευνητές αναζήτησαν νέες σχέσεις συσχετισμού μεταξύ των συντελεστών N και  $D_r$ . Έτσι οι Gibbs & Holz (1957), Thornburn (1963), Schultze & Melzer (1965), Bazaraa (1969), Kany & Jaenke (1972) εισήγαγαν στον υπολογισμό της σχετικής πυκνότητας το μέγεθος της γεωστατικής τάσης που αναπτύσσεται στο βάθος που διενεργείται η δοκιμή και την κοκκομετρική διαβάθμιση των εδαφικών υλικών.

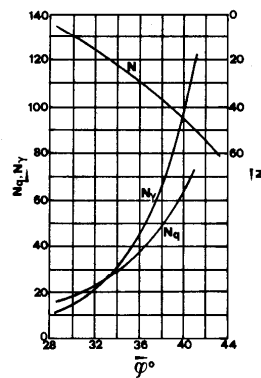


Εμπειρικές σχέσεις N προς  $D_r$ , των Gibbs & Holz (1957)

## Προσδιορισμός Γωνίας Εσωτερικής Τριβής, $\phi$

Οι πρώτες προσεγγίσεις των τιμών της γωνίας εσωτερικής τριβής **κοκκωδών εδαφών** με τη χρήση του αριθμού των κρούσεων της πρότυπης δοκιμής διείσδυσης ανακοινώθηκαν από τους Terzaghi & Peck (1948). Οι τιμές της  $\phi$  για τις διάφορες τιμές του N παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί, ενώ για τον προσδιορισμό των ενδιάμεσων τιμών που δεν καλύπτει ο πίνακας έχει προταθεί από τους ίδιους ερευνητές το διάγραμμα του σχήματος.

| Αριθμός Κρούσεων | Χαρακτηρισμός Αμμου     | Γωνία Τριβής, $\phi^\circ$ |
|------------------|-------------------------|----------------------------|
| 0 < N ≤ 4        | Έδαφος Πολύ Χαλαρό      | 27-32                      |
| 4 < N ≤ 10       | Έδαφος Χαλαρό           | 30-35                      |
| 10 < N ≤ 30      | Έδαφος Μέσης Πυκνότητας | 35-40                      |
| 30 < N ≤ 50      | Έδαφος Πυκνό            | 38-43                      |
| 50 < N           | Έδαφος Πολύ Πυκνό       | >40                        |



Σχέση N -  $\phi$   
(Terzaghi & Peck, 1948)

## Προσδιορισμός του Οιδημετρικού Μέτρου Ελαστικότητας, $E_s$

Σε **κοκκώδεις εδαφικούς σχηματισμούς** ο αριθμός των κρούσεων, N, της πρότυπης δοκιμής διείσδυσης, συσχετίζεται με την τιμή του οιδημετρικού μέτρου. Το οιδημετρικό μέτρο αντιστοιχεί σε τάση ίση με το κατακόρυφο ενεργό φορτίο στη θέση που διενεργείται η δοκιμή, γι' αυτό και εμμέσως συνεκτιμάται το γεωστατικό φορτίο που επιδρά στη θέση της δοκιμής. Αντίθετα, σε συνεκτικά εδάφη, όπως κορεσμένες αργίλους και ιλύες διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει υψηλή συσχέτιση μεταξύ του αριθμού των κρούσεων και του οιδημετρικού μέτρου.

| ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ                     | ΠΡΟΤΑΣΗ  | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ             |
|-------------------------------|--|--------------------------|
| Menzenbach, 1959              | $E_s = C_1 + C_2 N$ [kp/cm <sup>2</sup> ]                                  |                          |
|                               | $E_s = 38 + 10,5N \pm 93,2$ »  | SP                       |
|                               | $E_s = 43 + 11,8N \pm 42,3$ »  | SP-GP                    |
|                               | $E_s = 24 + 5,3N \pm 21,1$ »   | SM                       |
|                               | $E_s = 52 + 3,3N \pm 19,3$ »   | SW ξηρή                  |
|                               | $E_s = 71 + 4,9N \pm 36,9$ »   | SW βυθισμένη             |
|                               | $E_s = 39 + 4,5N \pm 36,4$ »   | SW                       |
| Mori, 1965                    | $E_s = 6N^{1,3}$ [kp/cm <sup>2</sup> ]                                     | Άμμος                    |
| Melzer, 1967                  | $v = 246,2 \log N - 263,4 \log^2 v + 375,6 \pm 56,7$ [kp/cm <sup>2</sup> ] | Άμμος, ξηρή, $w = 0,522$ |
| Webb, 1969                    | $E_s = 5(N + 15)$ [kp/cm <sup>2</sup> ]                                    | Άμμος                    |
|                               | $E_s = 3,3(N + 15)$ [kp/cm <sup>2</sup> ]                                  | Άμμος, αργιλώδης         |
| Desai, 1970                   | $E_s = 5N^{1,6}$ [kp/cm <sup>2</sup> ]                                     | Άμμος, αργιλώδης         |
| D'Appolonia, 1970             | $E_s = 216 + 10,6N$ [kp/cm <sup>2</sup> ]                                  | Άμμος                    |
|                               | $E_s = 540 + 13,5N$ [kp/cm <sup>2</sup> ]                                  | Άμμος, προφορισμένη      |
| Parry, 1971                   | $E_s = 50N$ [kp/cm <sup>2</sup> ]  | Άμμος                    |
| Trofimenkov, 1974             | $E_s = (350 + 500) \log N$ [kp/cm <sup>2</sup> ]                           | Άμμος                    |
| Tassios/Anagnostopoulos, 1974 | $E_s = 40 + 4,5N$ [kp/cm <sup>2</sup> ]                                    | Άμμος, N > 15            |
| Begemann, 1974                | $E_s = 40 + C(N \pm 6)$ [kp/cm <sup>2</sup> ]<br>+ : N > 15<br>- : N < 15  | M + S : C = 3            |
|                               |  | fS : C = 3,5             |
|                               |  | mS : C = 4,5             |
|                               |  | gS : C = 7               |
|                               |  | S + G : C = 10           |
|                               |  | G + S : C = 12           |

## Προσδιορισμός της αστράγγιστης αντοχής, $q_u$

Οι Terzaghi & Peck (1948) ήταν οι πρώτοι που υπολόγισαν τη σχέση που υπάρχει ανάμεσα στην αστράγγιστη συνοχή,  $c_u$ , και τον αριθμό των κρούσεων,  $N$ .

Η σχέση που προτάθηκε είναι η εξής:

$$c_u = 0,062 N \text{ [ kp/cm}^2 \text{ ]}$$

| Αριθμός Κρούσεων | Χαρακτηρισμός Αργίλου   | Αστράγγιστης αντοχή, $q_u$ (kPa) | Αστράγγιστης συνοχή, $c_u$ (kPa) |
|------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| $\leq 2$         | Πολύ μαλακή             | <25                              | <12.5                            |
| $2 < N \leq 4$   | Μαλακή                  | 25 – 50                          | 12.5-25                          |
| $4 < N \leq 8$   | Μέσης συνεκτικότητας    | 50 – 100                         | 25-50                            |
| $8 < N \leq 15$  | Στιφρή                  | 100 – 200                        | 50-100                           |
| $15 < N \leq 30$ | Πολύ στιφρή (ημιστερεή) | 200 – 400                        | 100-200                          |
| $30 < N$         | Σκληρή                  | >400                             | >200                             |

## Προσδιορισμός του δείκτη συνεκτικότητας, $I_c$

Δείκτης Αντίστασης ή Συνεκτικότητας ( $I_c$ ). Καθορίζει τη σχέση μεταξύ των ορίων πλαστικότητας και της φυσικής υγρασίας,  $W$ . Η αύξηση των τιμών του δείκτη αντιστοιχεί και σε αύξηση της αντοχής σε διάτμηση.

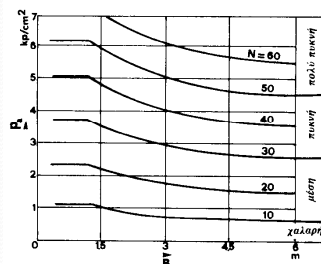
$$I_c = \frac{LL - W}{I_p}$$

Κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της δοκιμής παρατηρείται αλλοίωση των αποτελεσμάτων της λόγω της αύξησης της πίεσης του νερού των πόρων. Η αλλοίωση αυτή εμποδίζει τον υπολογισμό της σχέσης μεταξύ του Δείκτη Συνεκτικότητας,  $I_c$  και του  $N$ . Το γεγονός αυτό καθιστά δυνατή μόνο την ποιοτική εκτίμηση της συνεκτικότητας με τη χρήση του πίνακα που δόθηκε από τους Terzaghi & Peck (1948).

| $N$     | Συνεκτικότητα         |
|---------|-----------------------|
| 0 - 2   | Πολύ μαλακή έως υδαρή |
| 2 - 4   | Μαλακή                |
| 4 - 8   | Μέση                  |
| 8 - 15  | Στιφρή                |
| 15 - 30 | Ημιστερεή             |
| >30     | Σκληρή                |

## Προσδιορισμός της Επιτρεπόμενης τάσης, $P_a$ , Επιφανειακής Θεμελίωσης

Οι Terzaghi & Peck (1948) λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα καθιζήσεων, τα αποτελέσματα δοκιμών φόρτισης πλάκας και πρότυπων δοκιμών διείσδυσης πρότειναν το ακόλουθο εμπειρικό διάγραμμα για τον υπολογισμό της επιτρεπόμενης τάσης. Το διάγραμμα αυτό αναφέρεται σε περιπτώσεις όπου το βάθος θεμελίωσης  $D_f = 0$  και υπολογίζει την επιτρεπόμενη τάση χρησιμοποιώντας σαν δεδομένα το πλάτος του θεμελίου,  $B$ , και τον αριθμό των κρούσεων,  $N$ .



## Προσδιορισμός της καθίζησης, $s$ , επιφανειακών θεμελίωσης

Οι Terzaghi & Peck (1948) πρότειναν τις ακόλουθες σχέσεις για τον υπολογισμό των καθιζήσεων επιφανειακών θεμελίωσης.

$$s = \frac{18.6p}{N} \quad \text{για } B < 1,25\text{m}$$

$$s = \frac{27.9p}{N} \left( \frac{B}{B+0.3} \right)^2 \quad \text{για } B > 1,25\text{m}$$

$$s = \frac{28.4p}{N} \quad \text{για κοιτοστρώσεις}$$

Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να δώσουν τιμές της καθίζησης οι οποίες όμως, σύμφωνα με μεταγενέστερους ερευνητές, είναι υπερτιμημένες.

Για να εξαλειφθούν οι υπερτιμήσεις αυτού του είδους οι Meyerhof (1956), Hu (1968), Peck & Bazaraa (1969), Sutherland (1963), Thorndurn (1963), Alpan(1964), D' Appolonia et al (1970), Sherif (1973), Burland et al. (1977), πρότειναν μια σειρά από εμπειρικούς τύπους και σχέσεις.

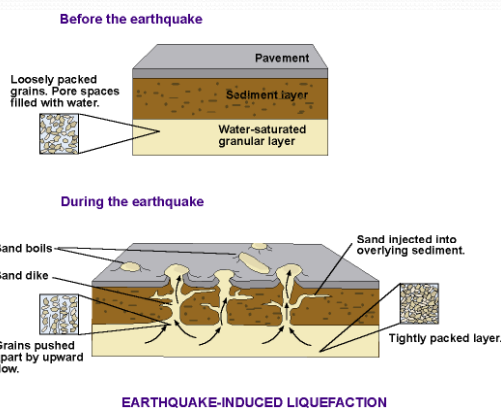


## Έλεγχος δυνατότητας ρευστοποίησης σηματισμών με τη χρήση δεδομένων από τις δοκιμές SPT

## Ρευστοποίηση

Όταν ένας χαλαρός κοκκώδης εδαφικός σχηματισμός υπόκειται σε ανακυκλική δόνηση, όπως στην περίπτωση ενός σεισμού, τότε επιδεικνύει τάση συμπίκνωσης, δηλαδή μεταβολής του όγκου. Συγκεκριμένα, οι κόκκοι από τους οποίους αποτελείται το εδαφικό υλικό μετακινούνται έχοντας ως στόχο τη μείωση των μεταξύ τους κενών.

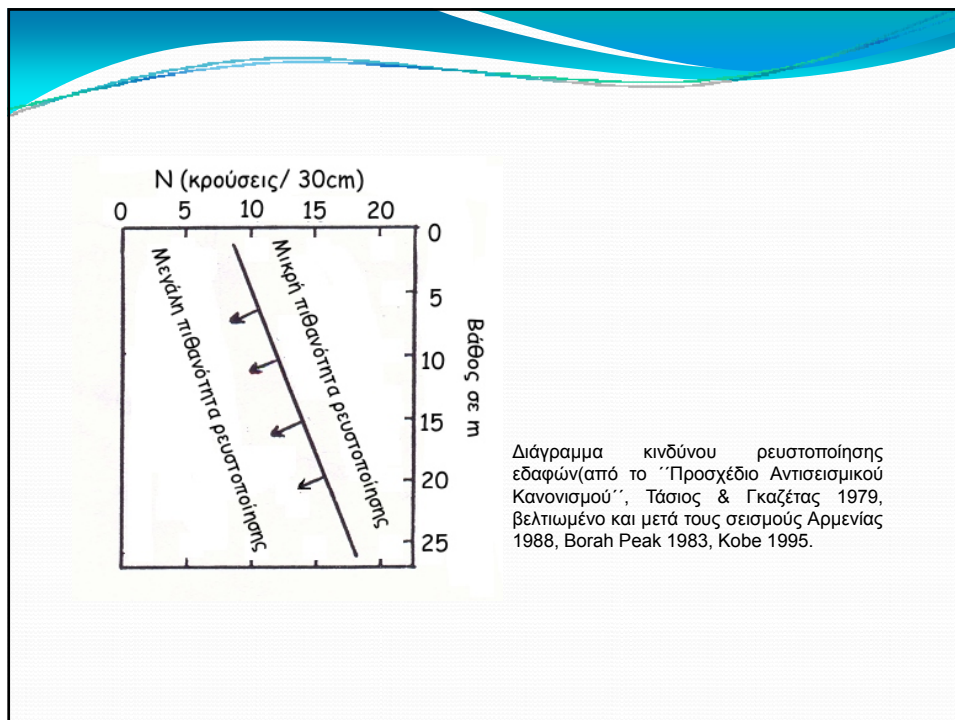
Η παρουσία νερού σε αυτά τα κενά, στην περίπτωση κορεσμένων χαλαρών εδαφών σε ασφραγιστες συνθήκες, εμποδίζει αυτήν την μετατόπιση. Αυτή η πίεση που μεταφέρεται στο νερό των πόρων, λόγω των ασφραγιστων συνθηκών δεν μπορεί να εκτονωθεί με συνέπεια την **απότομη αύξηση της πίεσης των πόρων,  $u$** . Η συνεχιζόμενη αύξηση της  $u$  αντιστοιχεί σε **μείωση των ενεργών τάσεων** και κατά συνέπεια και της **διατηρητικής αντοχής** του εδαφικού σχηματισμού έως και τον πλήρη μηδενισμό της (ολική ρευστοποίηση).





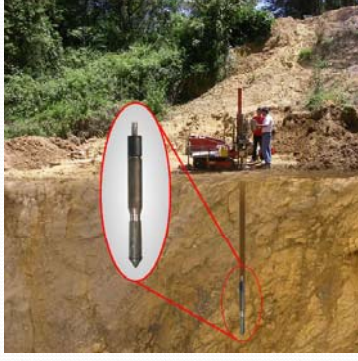
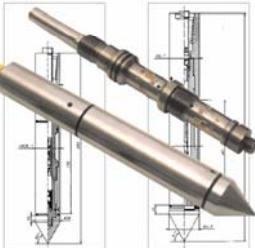
## Παράγοντες που καθορίζουν την εκδήλωση φαινομένων ρευστοποίησης

- **Γεωλογική ηλικία εδαφικών σχηματισμών** (νεώτερες αποθέσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση από παλιότερες).
- **Γεωμορφολογικά κριτήρια - περιβάλλον απόθεσης** (ομοιόμορφα ταξινομημένοι σχηματισμοί σε χαλαρή κατάσταση παρουσιάζουν υψηλή επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση).
- **Στάθμη του υδροφόρου οριζοντα** (όσο πιο χαμηλή είναι η στάθμη του υδροφόρου οριζοντα τόσο μεγαλύτερη αντίσταση θα προβάλλει το συγκεκριμένο εδαφικό στρώμα σε ενδεχόμενη πιθανότητα ρευστοποίησης).
- **Κοκκομετρική σύσταση των σχηματισμών** (Τα λεπτόκοκκα εδάφη θεωρούνταν ικανά να αναπτύξουν τις απαιτούμενες, για τη δημιουργία του φαινομένου, υψηλές πιέσεις πόρων ενώ η παρουσία αργιλικού κλάσματος σε αυτά συντελούσε στην ανάπτυξη συνοχής  $c$ . Τα χονδρόκοκκα εδάφη είναι πολύ διαπερατά ώστε να διατηρήσουν την απαιτούμενη υπερπίεση του νερού των πόρων μέχρις ότου να προκληθεί ρευστοποίηση).
- **Σχετική πυκνότητα** (Όσο πιο χαλαρή είναι η διάταξη των κόκκων ενός εδάφους τόσο η τιμή του δείκτη πόρων είναι μεγαλύτερη και αντίστοιχα η τιμή της σχετικής πυκνότητας του  $D_r$  (%) είναι μικρότερη).



### Δοκιμή Στατικής Πενетроμέτρησης (Cone Penetration Test- CPT) Σκοπός της δοκιμής

Σκοπός της δοκιμής είναι ο επιτόπου προσδιορισμός της αντίστασης που αναπτύσσεται σε ένα τυποποιημένο κώνο και σε ένα κυλινδρικό στέλεχος τριβής που προωθούνται στο έδαφος με υδραυλικά μέσα. Επίσης, σκοπός της δοκιμής είναι και ο προσδιορισμός της μεταβολής των πιέσεων του νερού των πόρων.



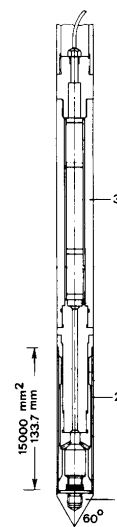
## Γενική περιγραφή της δοκιμής

➤ Κατά τη διάρκεια της δοκιμής στατικής πεντρομέτρησης ένας τυποποιημένος κώνος και ένας κύλινδρος τριβής προωθούνται στο έδαφος με την εφαρμογή υδραυλικών πιέσεων.

➤ Ο κώνος που χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή της δοκιμής σχηματίζει γωνία  $60^\circ$  και το εμβαδόν της βάσης του είναι  $100 \text{ cm}^2$ , ενώ αντίστοιχα το στέλεχος τριβής έχει μήκος  $13,37 \text{ cm}$  και εμβαδόν κυλινδρικής επιφάνειας  $150 \text{ cm}^2$

➤ Η προώθηση της συσκευής πεντρομέτρησης γίνεται με σταθερή ταχύτητα ( $2 \text{ cm/sec}$ ). Για να επιτευχθεί η σταθεροποίηση του όλου συστήματος χρησιμοποιούνται αντίστοιχα για την κάθε περίπτωση αντίβαρα.

➤ Μπορεί να μετρηθεί χωριστά η αντοχή που παρουσιάζει η αιχμή στην έμπηξη και η αντοχή τριβής του κυλίνδρου.



Πρότυπη συσκευή στατικής πεντρομέτρησης. (1. Κώνος, 2. Στέλεχος τριβής, 3. Στήλη σωλήνων).

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής με τροποποιήσεις στους χειρισμούς των οργάνων καθώς και στη διάταξη της συσκευής είναι δυνατό να μετρηθούν οι ακόλουθες παράμετροι:

### 1. Με προώθηση μόνο του κώνου

- **Αντίσταση αιχμής  $q_c$** . Ισούται με το λόγο της δύναμης που απαιτείται για την προώθηση μόνο του κώνου,  $Q_c$ , προς την επιφάνεια της βάσης του κώνου,  $A_c$ .

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c}$$

### 2. Με προώθηση μόνο του στελέχους τριβής.

- **Τοπική, μοναδιαία αντίσταση πλευρικής τριβής  $f_s$** . Ισούται με το λόγο της δύναμης που απαιτείται για την προώθηση μόνο της κυλινδρικής επιφάνειας,  $Q_s$ , προς το εμβαδόν της κυλινδρικής επιφάνειας του στελέχους τριβής,  $A_s$ .

$$f_s = \frac{Q_s}{A_s}$$

3. Με προώθηση και του κώνου τριβής και του στελέχους τριβής υπολογίζονται:

- **Συνολική δύναμη  $Q_t$** . Ισούται με τη συνολική δύναμη που απαιτείται για την προώθηση του κώνου, του στελέχους τριβής και της στήλης των σωλήνων.
- **Συνολική αντίσταση πλευρικής τριβής  $Q_{st}$** . Ισούται με τη συνολική δύναμη που απαιτείται για την προώθηση της στήλης των σωλήνων και του στελέχους τριβής.
- **Λόγος τριβής  $R_f$** . Ισούται με το λόγο της τοπικής μοναδιαίας αντίστασης τριβής,  $f_s$ , προς την αντίσταση αιχμής,  $q_c$ , που έχουν μετρηθεί στο ίδιο βάθος.

$$R_f = \frac{f_s}{q_c}$$

- **Δείκτης τριβής  $I_f$** . Ισούται με το λόγο της αντίστασης αιχμής,  $q_c$ , προς τη μοναδιαία αντίσταση τριβής,  $f_s$ , που έχουν μετρηθεί στο ίδιο βάθος.

$$I_f = \frac{q_c}{f_s}$$

## Αιτίες σφαλμάτων

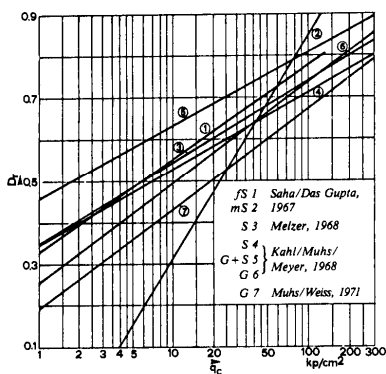
Τα σφάλματα μπορεί να οφείλονται σε δύο βασικούς παράγοντες:

- Ο πρώτος παράγοντας είναι η κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο εξοπλισμός καθώς και ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο χειρισμός του.
- Ο δεύτερος και λιγότερο ελεγχόμενος παράγοντας είναι η κατάσταση στην οποία βρίσκεται το έδαφος που δοκιμάζεται. Δηλαδή, είναι δυνατόν η παρουσία εγκοίλων ή η παρουσία γεώτρησης σε μικρή απόσταση από το σημείο δοκιμής να προκαλέσουν τη λήψη πολύ χαμηλών τιμών. Ενώ αντίθετα, η ύπαρξη κροκαλοπαγούς κατά μήκος της στήλης που δοκιμάζεται μπορεί να δώσει τιμές πολύ μεγαλύτερες από τις πραγματικές ή ακόμα και να οδηγήσει στη διακοπή της δοκιμής.

## Προσδιοριζόμενες Μηχανικές Παράμετροι

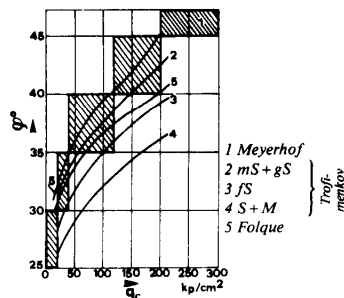
Χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό των ακόλουθων μηχανικών παραμέτρων:

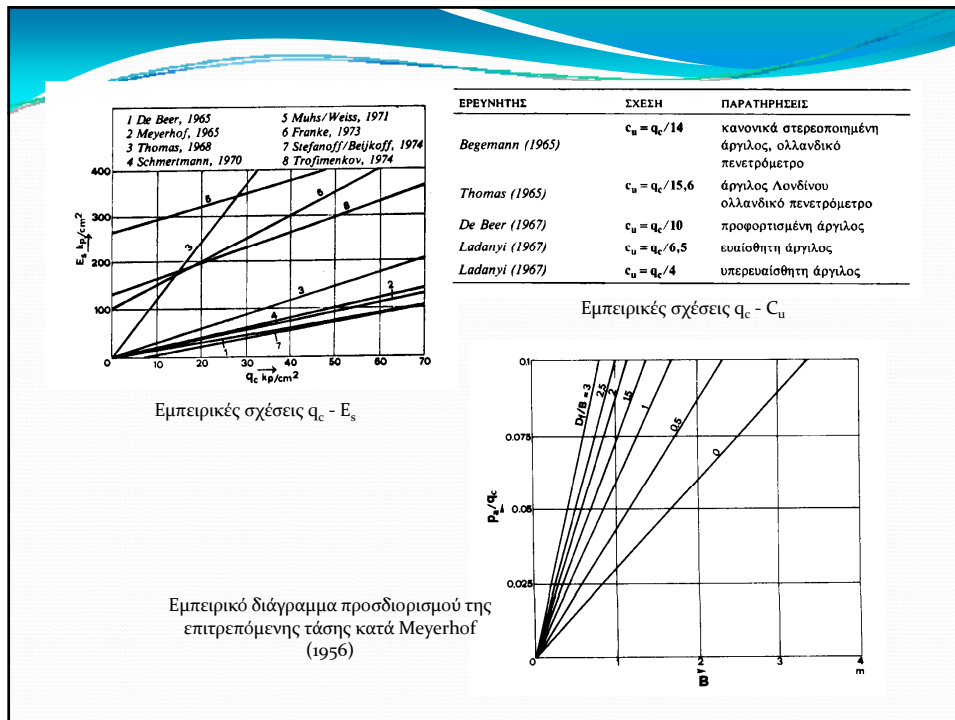
- της σχετικής πυκνότητας,  $D_r$ ,
- της γωνίας εσωτερικής τριβής,  $\phi$ ,
- του οιδημετρικού μέτρου ελαστικότητας,  $E_s$ ,
- της αστράγγιστης συνοχής,  $c_u$ ,
- της φέρουσας ικανότητας,  $q$ , και της επιτρεπόμενης τάσης,  $P$ , επιφανειακών και βαθιών θεμελιώσεων,
- της καθίζησης,  $s$ , επιφανειακών και βαθιών θεμελιώσεων.



Σχέσεις  $q_c$  προς  $\phi$  των Meyerhof (1956) και Trofimenkov (1974).

Εμπειρικές προτάσεις σχετικά με τη σχέση  $q_c$  -  $D_r$ , διαφοροποιημένες ως προς την κοκκομετρική διαβάθμιση.





## Πρεσσιομετρική Δοκιμή ( Pressuremeter Test ) Σκοπός της δοκιμής

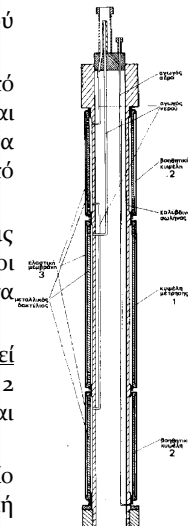
Σκοπός της Πρεσσιομετρικής δοκιμής είναι ο προσδιορισμός του μέτρου παραμόρφωσης και της οριακής πίεσης θραύσης του εδάφους, με τη χρήση πρότυπου διαστατού στελέχους, που οδηγείται στο επιθυμητό βάθος μέσα από γεώτρηση.





## Περιγραφή της δοκιμής

- Η πρεσσιμετρική δοκιμή πραγματοποιείται με τη χρήση ειδικού διασταλτού στελέχους.
- Το διασταλτό στέλεχος αποτελείται από τρεις κυψέλες, οι δύο από τις οποίες είναι βοηθητικές. Οι δύο βοηθητικές κυψέλες βρίσκονται εκατέρωθεν της κεντρικής κυψέλης και έχουν σαν σκοπό τους να δημιουργούν ένα ομοιόμορφο, κυλινδρικό πεδίο τάσεων γύρω από αυτή.
- Κατά τη διάρκεια της δοκιμής διοχετεύεται νερό μέσα στις τρεις κυψέλες. Το νερό αυτό προκαλεί τη διόγκωση των κυψελών οι οποίες με τη σειρά τους ασκούν σταδιακά μεταβαλλόμενη πίεση στα τοιχώματα της γεώτρησης.
- Η πίεση ασκείται σε δέκα ως δεκατέσσερα στάδια, και τελικά οδηγεί στη θραύση του εδάφους. Η κάθε βαθμίδα φόρτισης διαρκεί 2 λεπτά ενώ κατά τη διάρκεια της κάθε βαθμίδας πραγματοποιούνται μετρήσεις σε χρόνους 15,30,60 και 120 δευτερολέπτων.
- Ο συντονισμός της δοκιμής γίνεται με ειδικό χειριστήριο στο οποίο καταγράφονται η μεταβολή του όγκου και της πίεσης στην κεντρική κυψέλη.

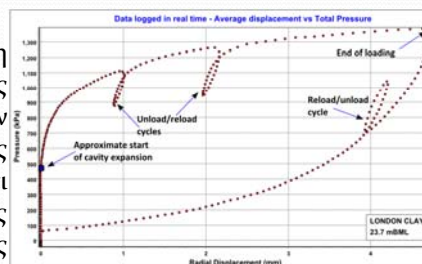


## Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Από τις καταγραφές που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής κατασκευάζεται η πρεσσιμετρική καμπύλη που παρουσιάζει την πίεση σε σχέση με τη μεταβολή του όγκου μέσα στην κυψέλη. Στην πρεσσιμετρική καμπύλη διακρίνονται τρεις κύριες φάσεις οι οποίες είναι:

- Η φάση επανασυμπίεσης των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Δηλαδή απαλείφεται η παραμόρφωση που πραγματοποιείται από τη χαλάρωση των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Η πίεση που αντιστοιχεί στο σημείο αυτό χαρακτηρίζεται ως πίεση ηρεμίας,  $p_0$ .

- Η ψευδοελαστική φάση. Κατά τη διάρκεια της ψευδοελαστικής φάσης έχουμε ελαστική παραμόρφωση των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της μεταβολής του όγκου και της μεταβολής της τάσης.



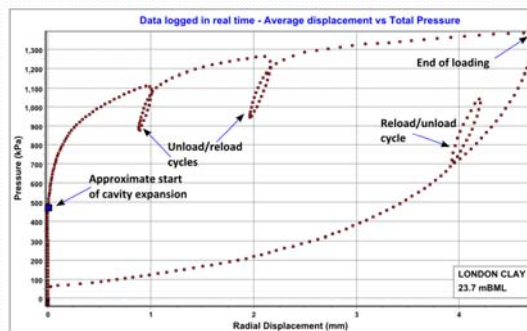


Από την κλίση του σχεδόν γραμμικού τμήματος της πρεσσιομετρικής καμπύλης που αντιστοιχεί στην ψευδοελαστική φάση είναι δυνατός ο υπολογισμός του πρότυπου πρεσσιομετρικού μέτρου παραμόρφωσης  $E_M$ , το οποίο δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$E_M = K \frac{\Delta \rho}{\Delta V}$$

K: σταθερά που εξαρτάται από τις διαστάσεις της κεντρικής κυψέλης,  $V_s$ , και τον όγκο του νερού,  $V_m$ , που ενέθηκε σε αυτή με πίεση  $p_m$ , ίση με την πίεση στο μέσο της ψευδοελαστικής φάσης.

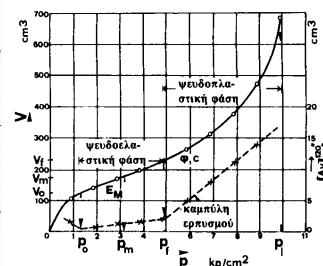
$$K = 2,66(V_s + V_m)$$



Η ψευδοπλαστική φάση. Κατά τη διάρκεια της ψευδοπλαστικής φάσης πραγματοποιείται πλαστική παραμόρφωση των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Το τμήμα της πρεσσιομετρικής καμπύλης που αντιστοιχεί στη φάση αυτή έχει τη μορφή καμπύλης με ομαλή ανοδική τάση που παρουσιάζει οριζόντια ασύμπτωτη. Η τεταγμένη της ασύμπτωτης αυτής αντιστοιχεί στο όριο θραύσης,  $P_c$ , του εδάφους.

- Καμπύλη Ερπυσμού. Από την πρεσσιομετρική καμπύλη, υπολογίζοντας την ταχύτητα ερπυσμού, είναι δυνατόν να κατασκευαστεί η καμπύλη ερπυσμού. Η ταχύτητα ερπυσμού υπολογίζεται για κάθε βαθμίδα χωριστά και ισούται με τη διαφορά του όγκου που μετράται στα 120" και στα 30".

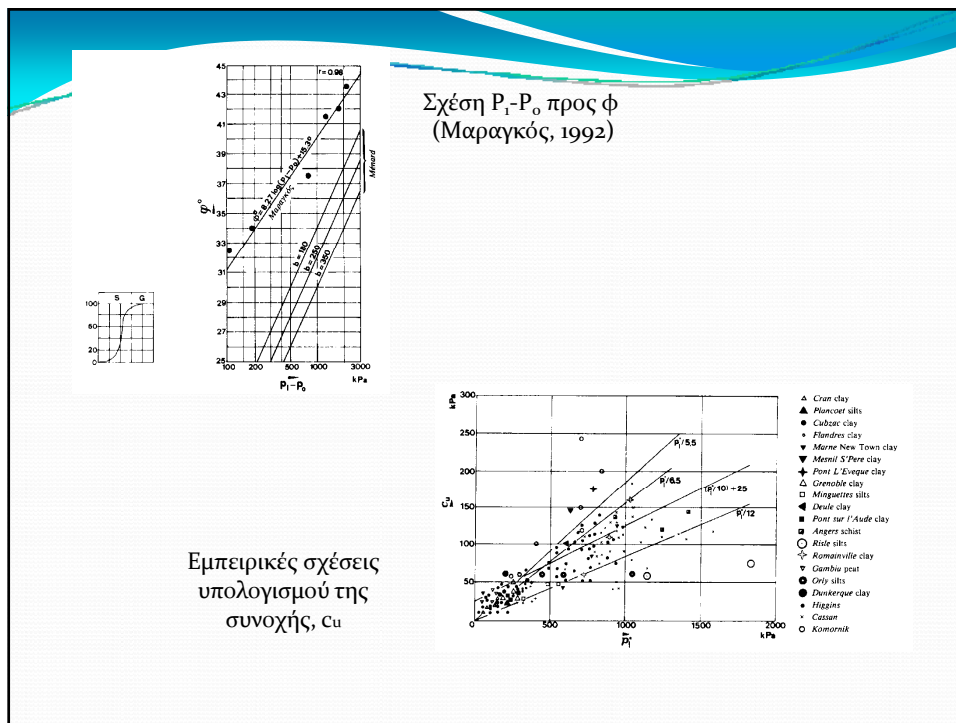
Για να κατασκευαστεί η καμπύλη ερπυσμού, οι προαναφερόμενες ταχύτητες χαρτογραφούνται σε σχέση με τη μεταβολή της πίεσης. Στην καμπύλη αυτή διακρίνονται όλες οι προαναφερόμενες φάσεις της πρεσσιομετρικής καμπύλης ενώ παράλληλα, η πίεση ηρεμίας,  $p_0$ , και το όριο θραύσης διακρίνονται με μεγαλύτερη σαφήνεια.



## Προσδιοριζόμενες Μηχανικές Παράμετροι

Χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό των ακόλουθων μηχανικών παραμέτρων:

- της σχετικής πυκνότητας,  $D_r$ ,
- της γωνίας εσωτερικής τριβής,  $\phi$ ,
- του οιδημετρικού μέτρου ελαστικότητας,  $E_s$ ,
- της αστράγγιστης συνοχής,  $c_u$ ,
- της φέρουσας ικανότητας,  $q$ , και της επιτρεπόμενης τάσης,  $P$ , επιφανειακών και βαθιών θεμελιώσεων,
- της καθίζησης,  $s$ , επιφανειακών και βαθιών θεμελιώσεων.



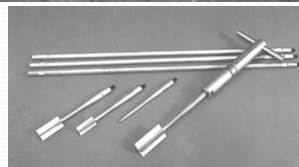
## Δοκιμή Πτερυγίου (Vane Test)

### Σκοπός της δοκιμής

Η δοκιμή πτερυγίου έχει σαν σκοπό τον προσδιορισμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ,τ. και της αστράγγιστης συνοχής ,c<sub>u</sub>, του εδάφους με τη χρήση πτέρυγας που προωθείται σε διάφορα βάθη μέσα στο έδαφος.

### Πεδίο εφαρμογής της δοκιμής

Εφαρμόζεται στις περιπτώσεις κορεσμένων, λεπτόκοκκων, μη ρωγματομένων συνεκτικών εδαφών όπως μαλακές αργίλους και ιλύες, των οποίων η αστράγγιστη διατμητική αντοχή δεν υπερβαίνει το 1 kg/cm<sup>2</sup>. Δηλαδή εφαρμόζεται σε σχηματισμούς τους οποίους δε μπορούμε να τους εξετάσουμε με δοκιμές διείσδυσης γιατί το βάρος του φοραστή είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με την αντίσταση που μπορεί να προβάλλει ο σχηματισμός.



## Περιγραφή της δοκιμής

- Η δοκιμή πτερυγίου πραγματοποιείται σε διάφορα βάθη από την επιφάνεια του εδάφους είτε μέσα από γεώτρηση είτε απευθείας από την επιφάνεια με προώθηση του πτερυγίου στο επιθυμητό βάθος. Το πτερύγιο περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα με τη βοήθεια ειδικής συσκευής στρέψης.
- Η ταχύτητα περιστροφής του πτερυγίου είναι 0,1°/sec και διατηρείται σταθερή μέχρι τη στιγμή της θραύσης του εδάφους. Κατά τη διάρκεια της περιστροφής αυτής πραγματοποιούνται μετρήσεις της στρεπτικής ροπής ανά 5°. Μετά τη θραύση του εδάφους το πτερύγιο στρέφεται 90° και στη συνέχεια λαμβάνονται άλλες πέντε μετρήσεις με ταχύτητα περιστροφής 0,1°/sec και ανά 5°. Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων κατασκευάζεται διάγραμμα ροπής - γωνίας περιστροφής από το οποίο υπολογίζεται η ροπή στρέψης τη στιγμή της θραύσης και της ολίσθησης. Από τη ροπή στρέψης υπολογίζεται η αστράγγιστη συνοχή τη στιγμή της θραύσης και της ολίσθησης.

- Ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της συνοχής είναι ο ακόλουθος:

$$c_u = \frac{M_{\max}}{a}$$

Όπου:

$M_{\max}$  : η ροπή στρέψης στο σημείο θραύσης.

$a$ : σταθερά που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πτερυγίου.

- Η αστράγγιστη συνοχή είναι ίση με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή γιατί κατά τη διάρκεια της δοκιμής πτερυγίου η κύρια τάση,  $\sigma_1$ , είναι μηδενική. Άρα με βάση τον τύπο του Coulomb η διατμητική αντοχή είναι ίση με τη συνοχή.



## Δοκιμή Φόρτισης Πλάκας (Plate Load Test)

### Σκοπός της δοκιμής

Σκοπός της δοκιμής φόρτισης πλάκας είναι ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας στα επιφανειακά στρώματα του εδάφους και σε συνθήκες μερικής πλευρικής παρεμπόδισης των παραμορφώσεων.

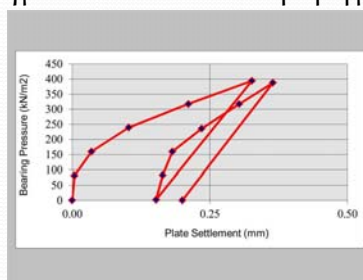


## Πεδίο εφαρμογής

- Η δοκιμή αυτή εφαρμόζεται στις περιπτώσεις όπου απαιτείται ο έλεγχος των επιφανειακών στρωμάτων για τη μελέτη κατασκευής τεχνικών έργων.
- Όπως έχει προκύψει από την παρουσίαση των προηγούμενων δοκιμών, μελέτη των επιφανειακών στρωμάτων μπορεί να γίνει μόνο με τη δοκιμή πτερυγίου και τη δοκιμή φόρτισης πλάκας.
- **Η δοκιμή φόρτισης πλάκας είναι η μόνη δοκιμή με την οποία υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας των επιφανειακών σχηματισμών.** Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η δοκιμή αυτή βρίσκει μεγάλο πεδίο εφαρμογής σε τεχνικά έργα που επηρεάζονται από τη μηχανική συμπεριφορά των πολύ επιφανειακών στρωμάτων, όπως για παράδειγμα, έργα οδοποιίας, έργα κατασκευής ασφαλτοτάπητα αεροδρομίων κ.α.

## Περιγραφή της δοκιμής

- Κατά τη διάρκεια της δοκιμής φόρτισης πλάκας πραγματοποιείται φόρτιση της επιφάνειας του εδάφους με τη χρησιμοποίηση χαλύβδινης πλάκας πάχους 1,5 cm και διαμέτρου 16 - 70 cm.
- Η πλάκα αυτή εφάπτεται στην επιφάνεια του εδάφους και οι τάσεις ασκούνται με τη χρήση γρύλων.
- Η φόρτιση του εδάφους γίνεται σε τρία στάδια. Δηλαδή πραγματοποιούνται τρεις διαδοχικές φορτίσεις και αποφορτίσεις κατά τη διάρκεια των οποίων καταγράφονται οι πιέσεις που ασκούνται και οι καθιζήσεις που πραγματοποιούνται σε συνάρτηση με το χρόνο.



Τα φορτία πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε οι καθιζήσεις που θα παρατηρηθούν στη μεγαλύτερη βαθμίδα φόρτισης να είναι μεγαλύτερες του 1,5 cm και μικρότερες των 10 cm.

Τα αποτελέσματα των φορτίσεων παρουσιάζονται σε διαγράμματα πίεσης - καθίζησης από τα οποία στη συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας για κάθε βαθμίδα φόρτισης χωριστά. Ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας είναι ο ακόλουθος:

$$E_{n1,2,3} = \frac{\pi \Delta p}{4 \Delta s} d \quad E < E_v < E_s$$

Όπου:

p: το ανοιγμένο στο εμβαδόν της πλάκας φορτίο,

S: η καθίζηση της πλάκας,

d: η διάμετρος της πλάκας.

Για την εφαρμογή του τύπου αυτού χρησιμοποιούνται μόνο τα ευθύγραμμα τμήματα των καμπυλών πίεσης - καθίζησης.

## Άλλες επιτόπου δοκιμές



Δοκιμή Φόρτισης  
Πασσάλου διαμέτρου 2.8m



Δοκιμή πλευρικής Φόρτισης  
Πασσάλου.



Δοκιμή Εξόλκευσης  
Πασσάλου.



## Βιβλιογραφία

- Μαραγκός Χ. (1993) Σχεδιασμός Θεμελιώσεων με Δοκιμές Πεδίου, Έκδοση Μαραγκός Χ. σελ. 234.
- Price D. (1981) Report of the IAEG Commission on Site Investigations Bulletin of the International Association of Engineering Geology, December 1981, Volume 24, Issue 1, pp 185-226
- Παπαδόπουλος Β. (2003), Στοιχεία Γεωτεχνικής, Σημειώσεις ΕΜΠ.
- Παπαχαρίσης Ν., Μάνου-Ανδρεάδη Ν., Γραμματικόπουλος Ι., (1999) Γεωτεχνική Μηχανική, Εκδόσεις Αφοί Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.
- Ρόζος Δ. (2007) Τεχνική Γεωλογία Ι, Σημειώσεις ΕΜΠ.
- Τσότσος Στ. (1991), Εδαφομηχανική - Θεωρία Μέθοδοι Εφαρμογές, Εκδόσεις Φ. Βερβερίδης & Π. Πολυχρονίδης α.ε., Θεσσαλονίκη.