



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

# Εργαστήρια Τεχνικής Γεωλογίας Ι

Άσκηση 2-3<sup>η</sup>

ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΕΣ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ  
(Maag, Lefranc, Lugeon)

# Αντικείμενο της Άσκησης

Η παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας των γεωλογικών σχηματισμών τη χρήση των επιτόπου δοκιμών

**Maag, Lefranc, Lugeon.**

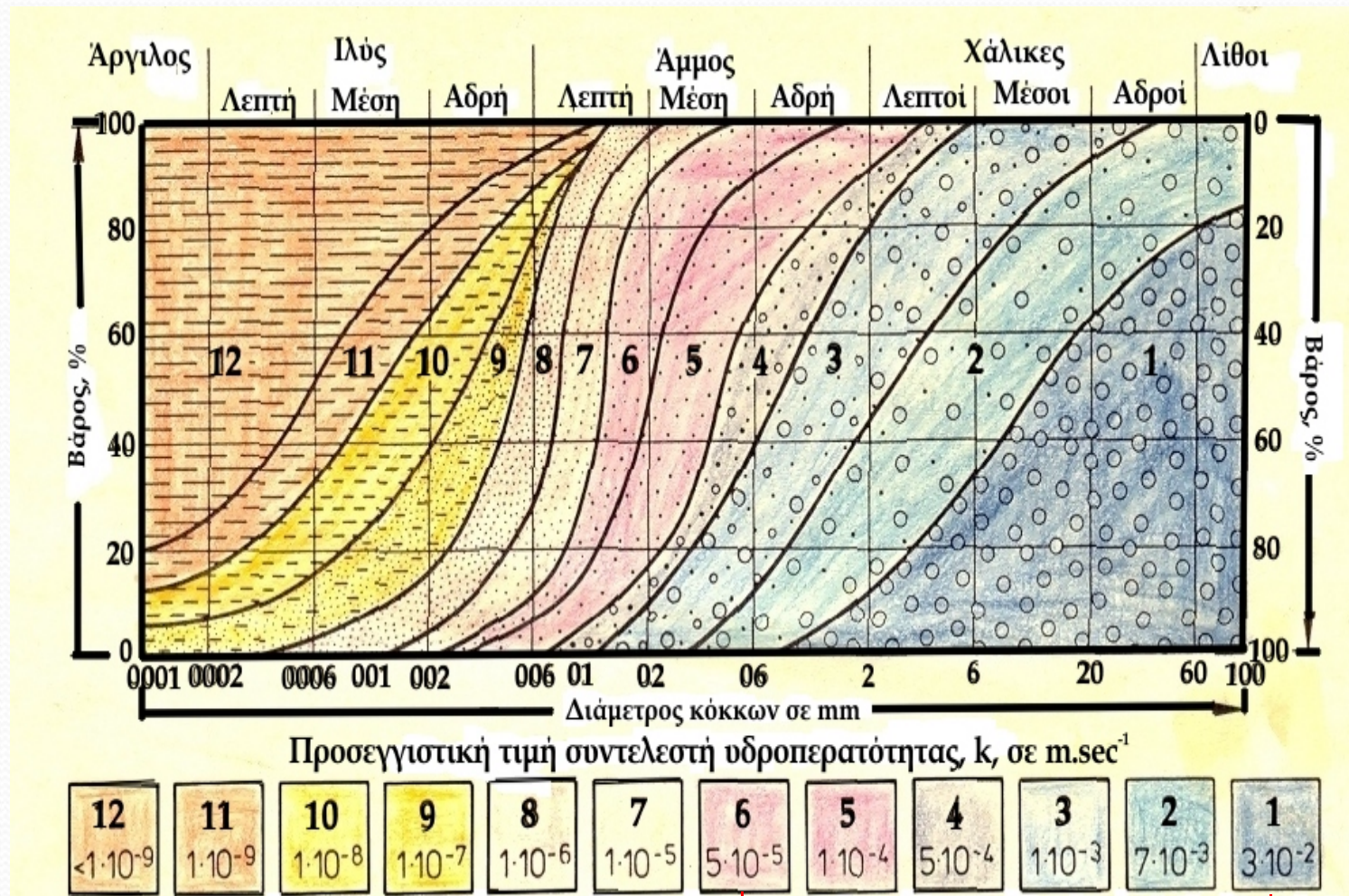
# ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ & ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

**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 τη κοκκομετρική σύσταση παράμετροι που καθορίζουν της διαστάσεις των πόρων (τριχοειδείς ή μη) αλλά και τη μεταξύ τους επικοινωνία (ενεργό πορώδες).
- Οι βαθμοί στερεοποίησης και διαγένεσης του πορώδους μέσου, οι οποίου αυξανόμενοι μειώνουν της τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας.





8.64 \*10<sup>-5</sup>m/day

4.32m/day

2592m/day



Η δευτερογενής διαπερατότητα, στα πετρώματα, επηρεάζεται από:

- Τη πυκνότητα και το άνοιγμα των ρωγμών
- Τη 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.



# 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.

Κατά τις 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 την 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.

# Δοκιμή MAAG (μεταβλητού φορτίου)

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

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

➤ Οι αναγνώσεις της πτώσεις της στάθμης γίνονται κάθε 1, 2 ή και 5cm ή και σε τακτά χρονικά διαστήματα π.χ. κάθε 1 ή 2 min.

➤ 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:

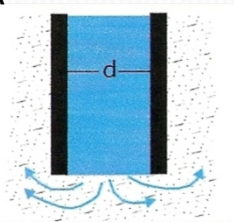
$c = 4\pi r$  για σφαιρικού σχήματος δοκιμαζόμενο τμήμα, ακτίνας  $r$ ,

$c = 2,75d$  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),

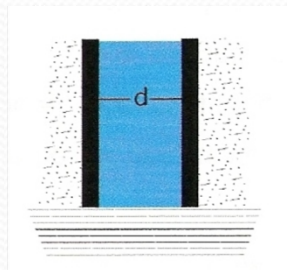
$c = 2d$  όταν η δοκιμή γίνεται στην επαφή υδροστεγανού – υδροπερατού σχηματισμού (Σχήμα β),

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

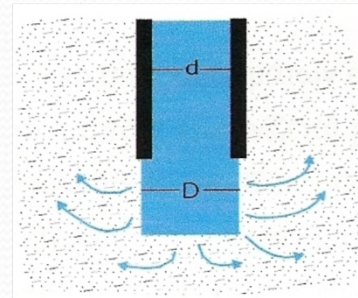
$c = \frac{2\pi L}{\sinh^{-1}(\frac{L}{D})}$  όταν το δοκιμαζόμενο τμήμα είναι διαμέτρου  $D$  και μήκους  $L$  με σχέση  $5D > L > D/2$  (Σχήμα γ')



(α)



(β)



(γ)

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

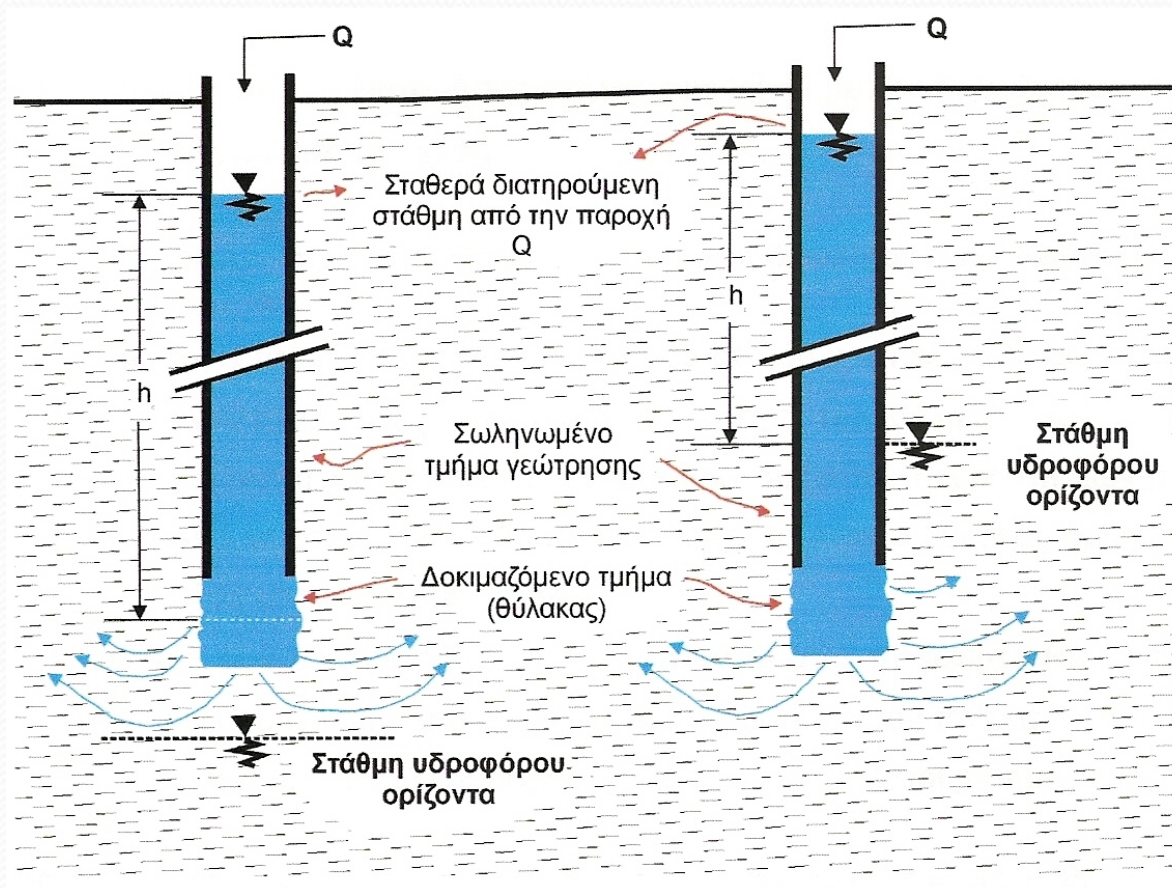


# Δοκιμή LEFRANC (σταθερού φορτίου)

Η δοκιμή Lefranc εφαρμόζεται στην περίπτωση αδρόκοκκων εδαφικών υλικών.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, με τη βοήθεια αντλίας νερό, διοχετεύεται στη γεώτρηση ελεγχόμενη ποσότητα νερού έτσι ώστε να διατηρείται η στάθμη σε επιθυμητό ύψος. Κατά την διάρκεια της δοκιμής μετριέται 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 την θέση του σε σχέση με την στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.





# Υπολογισμός Συντελεστή Υδραυλικής Αγωγιμότητας

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

Όπου:

$Q$  = η παροχή του νερού σε  $\text{cm}^3/\text{sec}$ ,

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

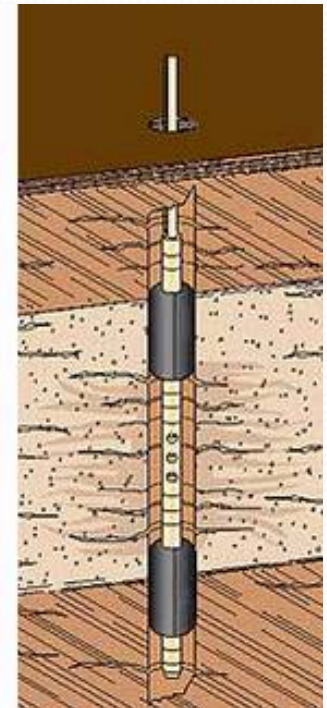
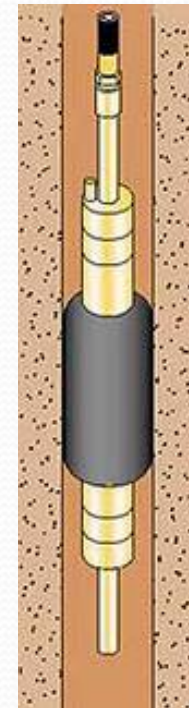
$h$  = το ύψος της φορτίζουσας στήλης, σε  $\text{cm}$

Όπως και στην 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 ορίζοντα

# Δοκιμή LUGEON (βραχώδεις σχηματισμούς)

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

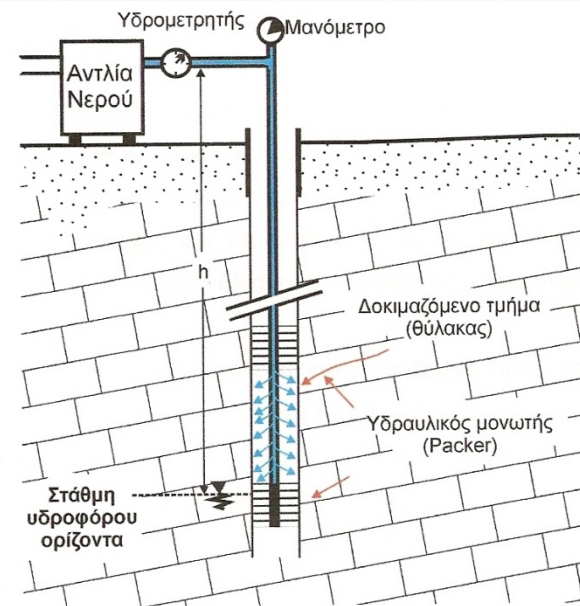
Στη δοκιμή Lugeon το δοκιμαζόμενο τμήμα συνήθως έχει μήκος 3-5m και εκτείνεται έως το πυθμένα της γεώτρησης. Το δοκιμαζόμενο τμήμα απομονώνεται από πάνω με κατάλληλο παρέμβυσμα (packer) το οποίο διογκούμενο με ειδική τεχνική, εφάπτεται ερμητικά με τα τοιχώματα της γεώτρησης. Με την διαδικασία αυτή κατά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

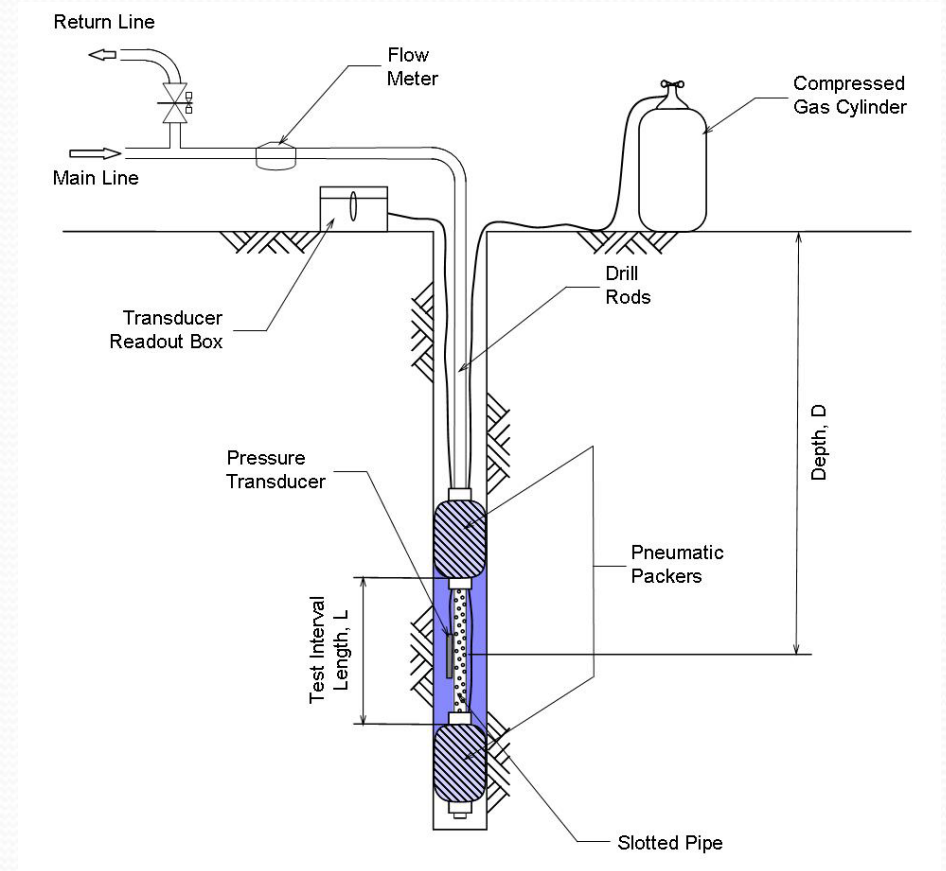
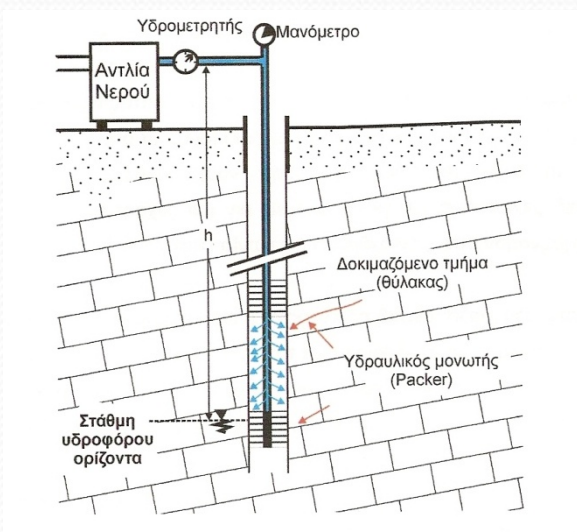
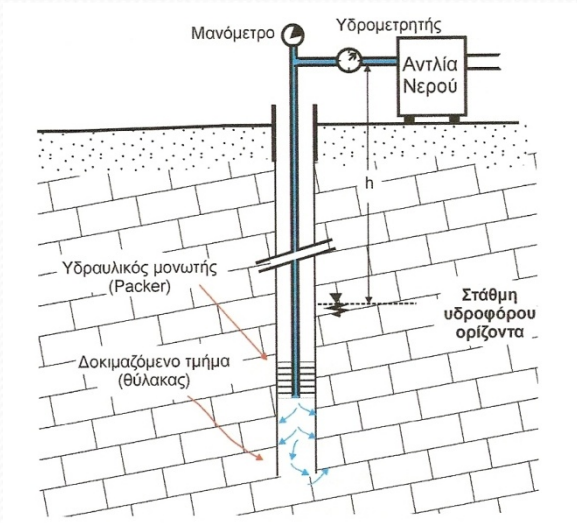
Η πραγματική πίεση που εφαρμόζεται στο δοκιμαζόμενο τμήμα ισούται με το άθροισμα της μανομετρικής πίεσης και της υδροστατικής πίεσης του νερού που πληρώνει την κατιούσα στήλη των στελεχών του γεωτρύπανου.

Σαν παράδειγμα αναφέρεται ότι δοκιμή που εκτελείται σε βάθος 10m ασκεί στον 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 της τελικές πιέσεις. Όμως, επειδή οι απώλειες αυτές είναι συνήθως πολύ μικρές και δύσκολο να μετρηθούν δεν 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.

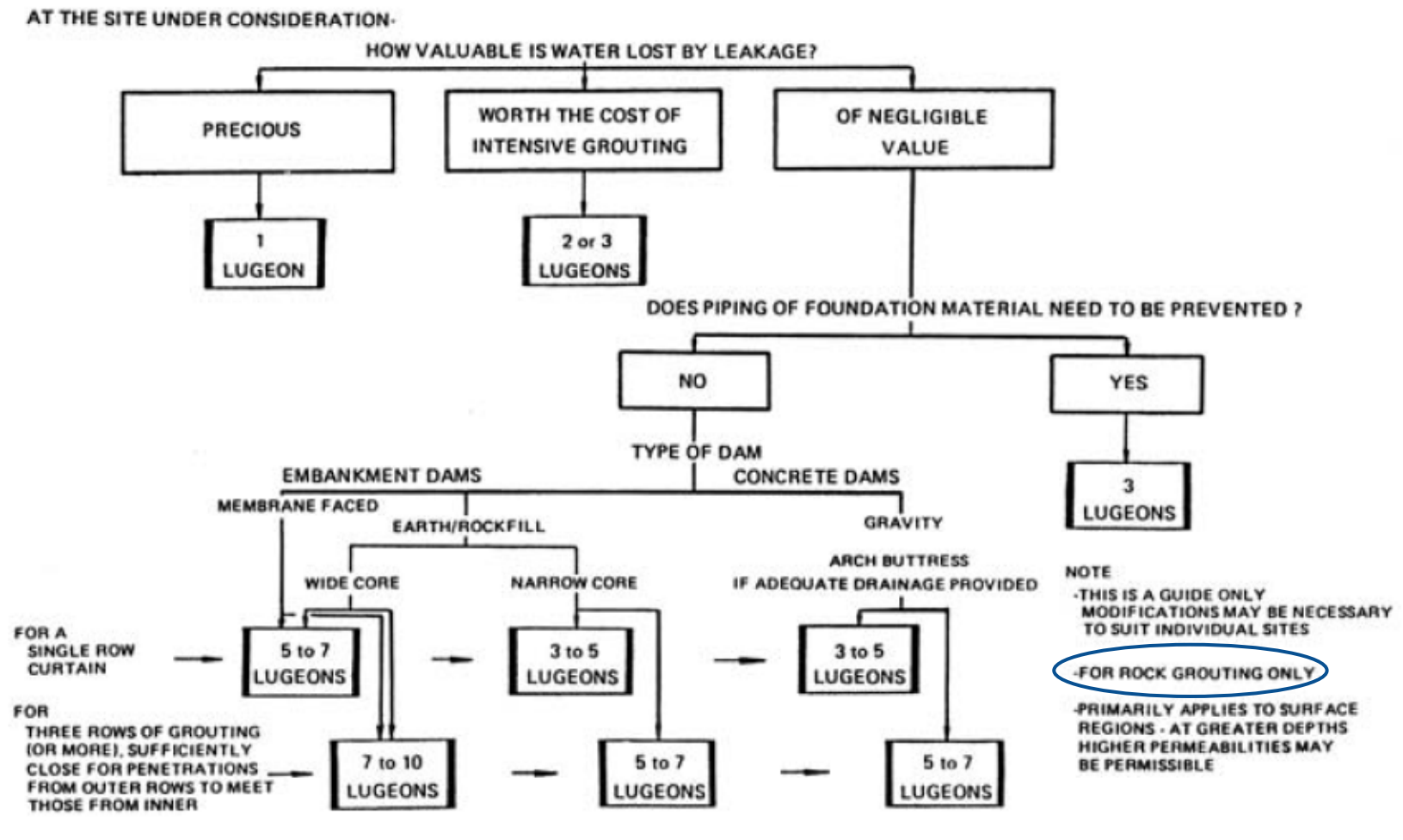
***Μια μονάδα Lugeon, είναι η υδροπερατότητα που έχει μια βραχώδης μάζα κάτω από πίεση 10Atm (φορτίο 100m πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα), όταν ένα (1) m γεώτρησης διαμέτρου NX (76mm) σε αυτή τη βραχομάζα επιτρέπει απώλειες ενός (1) λίτρου νερού ανά λεπτό.***

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 3U.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).



Προτεινόμενες ελάχιστες απορροφήσεις ενέματος για την κατασκευή κουρτινών τσιμεντενέσεων (Houlsby, 1982)



# Υπολογισμός Συντελεστή Υδραυλικής Αγωγιμότητας

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

Όπου:

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

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

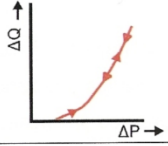
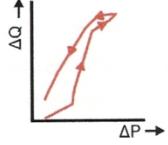
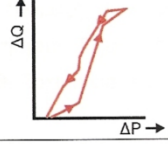
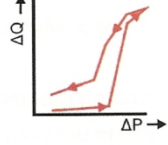
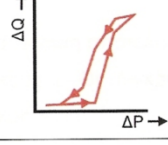
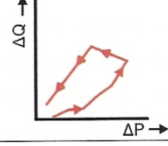
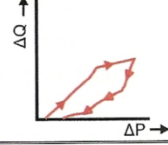
P = η πραγματική ασκούμενη πίεση της δοκιμής σε cm στήλης νερού, (10m στήλης νερού = 1atm),

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 την μελέτη της συμπεριφοράς αυτής σε καθεστώς υψηλής υδροστατικής πίεσης .

Δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να διαπιστωθεί αν οι υψηλές πιέσεις που πρόκειται να εφαρμοστούν στην 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

| Μορφές διαγραμμάτων των αποτελεσμάτων των δοκιμών Lugeon                              |                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | Ελαστική παραμόρφωση βραχομάζας                                                                                         |
|    | Μη αντιστρεπτή παραμόρφωση βραχομάζας                                                                                   |
|    | Αντιστρεπτή παραμόρφωση βραχομάζας                                                                                      |
|    | Θραύση βραχομάζας κατά την εισπίεση.<br>Μη αντιστρεπτή παραμόρφωση.                                                     |
|   | Θραύση βραχομάζας κατά την εισπίεση.<br>Αντιστρεπτή παραμόρφωση βραχομάζας                                              |
|  | Διάβρωση βραχομάζας κατά την εισπίεση<br>(απόφραξη ασυνεχειών).                                                         |
|  | Εκτέλεση εισπίεσης σε βραχομάζα με χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα ή Έμφραξη των ασυνεχειών κατά της εκτέλεση της δοκιμής. |