



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Η ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΕΝΟΣ  
ΧΩΜΑΤΙΝΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ  
Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΣΟΛΕΑΣ**

Εκπόνηση Εργασίας  
Ανδρέου Αναστάσιος

Επιβλέπων Καθηγητής  
Χρηστάρας Βασίλειος

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2013

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|               |   |
|---------------|---|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ..... | 5 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ..... | 6 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 7 |

### Α ΜΕΡΟΣ

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Ο ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ .....        | 9  |
| 1.1 Ορισμός.....                                                    | 9  |
| 1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαπερατότητα της βραχώμαζας ..... | 11 |
| 1.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την υδραυλική αγωγιμότητα .....      | 13 |

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Η ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΕΝΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ .....  | 15 |
| 2.1. Επιλογή της θέσης του φράγματος.....                 | 15 |
| 2.2. Η σημασία της αξιολόγησης της διαπερατότητας.....    | 18 |
| 2.3. Διαφυγές νερού κάτω από τη θέση θεμελίωσης.....      | 20 |
| 2.3.1. Ορισμός.....                                       | 20 |
| 2.3.2. Παραδείγματα από τον Ελλαδικό χώρο .....           | 20 |
| 2.3.3. Υπολογισμός διαφυγών από τα δίκτυα ροής.....       | 21 |
| 2.3.4. Έλεγχος υδραυλικής αστοχίας .....                  | 24 |
| 2.3.5. Ελεγχόμενες και μη ελεγχόμενες διαφυγές νερού..... | 26 |
| 2.4. Στεγανοποίηση στη θέση θεμελίωσης.....               | 27 |
| 2.4.1 Τσιμεντενέσεις στεγανοποίησης .....                 | 29 |
| 2.4.2. Τάπητας τσιμεντενέσεων.....                        | 32 |
| 2.4.3. Μέθοδοι τσιμεντενέσεων .....                       | 32 |
| 2.4.4. Καθορισμός μέγιστης πίεσης .....                   | 34 |
| 2.4.5. Χαρακτηριστικά ενέματος.....                       | 36 |

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ .....                                                               | 38 |
| 3.1. Γενικά στοιχεία.....                                                                                | 38 |
| 3.2. Υπολογισμός του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας από τα συστήματα ασυνεχειών της βραχώμαζας ..... | 39 |
| 3.3. Δοκιμές σταθερού φορτίου – Lefranc .....                                                            | 40 |
| 3.4. Δοκιμές μεταβλητού φορτίου – Maag.....                                                              | 42 |
| 3.5. Δοκιμές εισπίεσης νερού – Lugeon.....                                                               | 43 |

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 3.5.1. Ο παράγοντας πίεση κατά την εκτέλεση της δοκιμής.....    | 46 |
| 3.5.2. Πηγές σφαλμάτων και τρόποι αντιμετώπισής τους.....       | 50 |
| 3.5.3. Η ερμηνεία των δοκιμών κατά Houlby.....                  | 52 |
| 3.5.4. Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τις δοκιμές Lugeon..... | 55 |
| 3.5.5. Παράσταση των πολυάριθμων δοκιμών Lugeon .....           | 58 |

## **Β ΜΕΡΟΣ**

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| ΤΟ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟ ΕΡΓΟ ΣΟΛΕΑΣ.....                              | 61 |
| 4.1. Το ιστορικό για την κατασκευή του φράγματος .....     | 61 |
| 4.2. Θέση του έργου .....                                  | 62 |
| 4.3. Σύντομη περιγραφή του έργου .....                     | 62 |
| 4.3.1. Το φράγμα.....                                      | 62 |
| 4.3.2. Φράγμα εκτροπής.....                                | 63 |
| 4.3.3 Δεξαμενές εξισορρόπησης .....                        | 63 |
| 4.3.4. Αγωγοί μεταφοράς .....                              | 63 |
| 4.3.5. Έργα εκτροπής - εκκένωσης – υδροληψίας .....        | 64 |
| 4.3.6. Υπερχειλιστής .....                                 | 64 |
| 4.4. Γεωερευνητικό πρόγραμμα .....                         | 67 |
| 4.4.1. Δανειοθάλαμοι, υλικά κατασκευής του φράγματος ..... | 68 |

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΚΥΠΡΟΥ ..... | 75 |
| 5.1. Γενικά γεωλογικά στοιχεία.....                      | 75 |
| 5.1.1. Η ζώνη της Κερύνειας ή Πενταδάκτυλου .....        | 75 |
| 5.1.2. Η ζώνη του Τροόδους .....                         | 76 |
| 5.1.3. Το σύμπλεγμα των Μαμωνίων.....                    | 77 |
| 5.1.4. Η ιζηματογενής ακολουθία του Τροόδους.....        | 78 |
| 5.2. Γεωτεκτονική εξέλιξη της νήσου Κύπρου .....         | 78 |

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΣΟΛΕΑΣ..... | 80 |
| 6.1. Λιθοστρωματογραφία.....                                   | 80 |
| 6.2. Τεκτονική .....                                           | 81 |
| 6.3. Γεωμορφολογία .....                                       | 81 |

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7**

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΣΤΗ ΖΩΝΗ<br>ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΣΟΛΕΑΣ..... | 83 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.1. Κερματισμός της βραχομάζας .....                            | 83         |
| 7.2. Ασυνέχειες της βραχομάζας .....                             | 84         |
| 7.3. Αποσάθρωση .....                                            | 86         |
| 7.4. Διαπερατότητα (από επί τόπου δοκιμές εισπίεσης νερού) ..... | 88         |
| 7.4.1. Διαφυγές νερού κάτω από το σώμα του φράγματος .....       | 94         |
| 7.5. Πρωτεύουσες τσιμεντενέσεις .....                            | 96         |
| 7.5.1. Τάπητας τσιμεντενέσεων .....                              | 100        |
| 7.6. Γεωτρήσεις ελέγχου .....                                    | 100        |
| <b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>                                        | <b>110</b> |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>                                        | <b>112</b> |

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου. Η συνεργασία αυτή ήταν πολύ εποικοδομητική σε όλα τα επίπεδα και ευελπιστώ να συνεχιστεί και στο μέλλον.

Νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω από τη θέση αυτή όσους συνέβαλλαν στην εκπόνηση και την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Β. Χρηστάρα για την εμπιστοσύνη του και την ανάθεση της διατριβής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Θωμά Μακεδόνα για την πολύτιμη καθοδήγηση και συμβολή του στον καθορισμό του θέματος και την εκπόνηση αυτής της εργασίας, μια συμβολή που δεν περιορίστηκε μόνο στην ουσιαστική βοήθεια σε κάθε στάδιο της εργασίας, αλλά και στη μετάδοση γενικών γνώσεων στο αντικείμενο της Τεχνικής Γεωλογίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον κ. Κλεόπα Χ΄ Χαραλάμπους, Γεωλόγο αλλά και στο Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου συνολικά, για τη βοήθεια και τα πολύτιμα στοιχεία για το φράγμα Σολέας που μου παραχώρησαν, στοιχεία που ήταν απαραίτητα για την εκπόνηση της διατριβής.

Σημαντική επίσης θεωρώ την προσφορά της κ. Στέλλας Πατσάλη, Εκτελεστικής Μηχανικού στο Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων Κύπρου, την οποία ευχαριστώ θερμά για την επί τόπου επίσκεψη στο φράγμα της Σολέας και τις πολύτιμες πληροφορίες που μου έδωσε για αυτό.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου για τη συνεχή στήριξη και ιδιαίτερα την Ελένη για την πολύτιμη βοήθειά της στην τελική διαμόρφωση της εργασίας.

Τέλος, θα ήταν παράληψη να μην ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στηρίζει και είναι δίπλα μου σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Α. Ανδρέου

Φεβρουάριος 2013

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο Α μέρος παρουσιάζεται η θεωρητική προσέγγιση της διαπερατότητας στη ζώνη θεμελίωσης ενός φράγματος. Συγκεκριμένα, στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο δίνεται η ερμηνεία της διαπερατότητας και πώς αυτή συσχετίζεται με το συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας, καθώς και ποιοι παράγοντες την επηρεάζουν.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη σημασία που έχει η διαπερατότητα στην επιλογή της θέσης θεμελίωσης ενός φράγματος και πώς αυτή επηρεάζει τη γενική ευστάθεια του ίδιου του φράγματος αλλά και των συνοδών έργων του. Επίσης, γίνεται μια προσπάθεια προσομοίωσης της υπόγειας ροής του νερού κάτω από το φράγμα με τη χρήση των δικτύων ροής. Τέλος, αναφέρονται οι μέθοδοι στεγανοποίησης που χρησιμοποιούνται με σκοπό να εξασφαλίσουν τη στεγανότητα του υποβάθρου και τον περιορισμό των διαφυγών νερού.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρονται οι επί τόπου δοκιμές που εκτελούνται για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας και για τον υπολογισμό του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας. Συγκεκριμένα εξετάζονται οι δοκιμές εισπίεσης νερού κατά Lugeon που είναι και η μέθοδος που εφαρμόζεται σε βραχώδεις σχηματισμούς.

Στο Β μέρος (4<sup>ο</sup>, 5<sup>ο</sup>, 6<sup>ο</sup> και 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο), αναπτύσσονται τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία που προέκυψαν από την έρευνα της θέσης του φράγματος Σολέας. Τα στοιχεία αυτά αξιολογούνται και επεξεργάζονται, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με τη διαπερατότητα στη θέση θεμελίωσης του φράγματος και τα αποτελέσματα των μέτρων στεγανοποίησης που εφαρμόστηκαν.

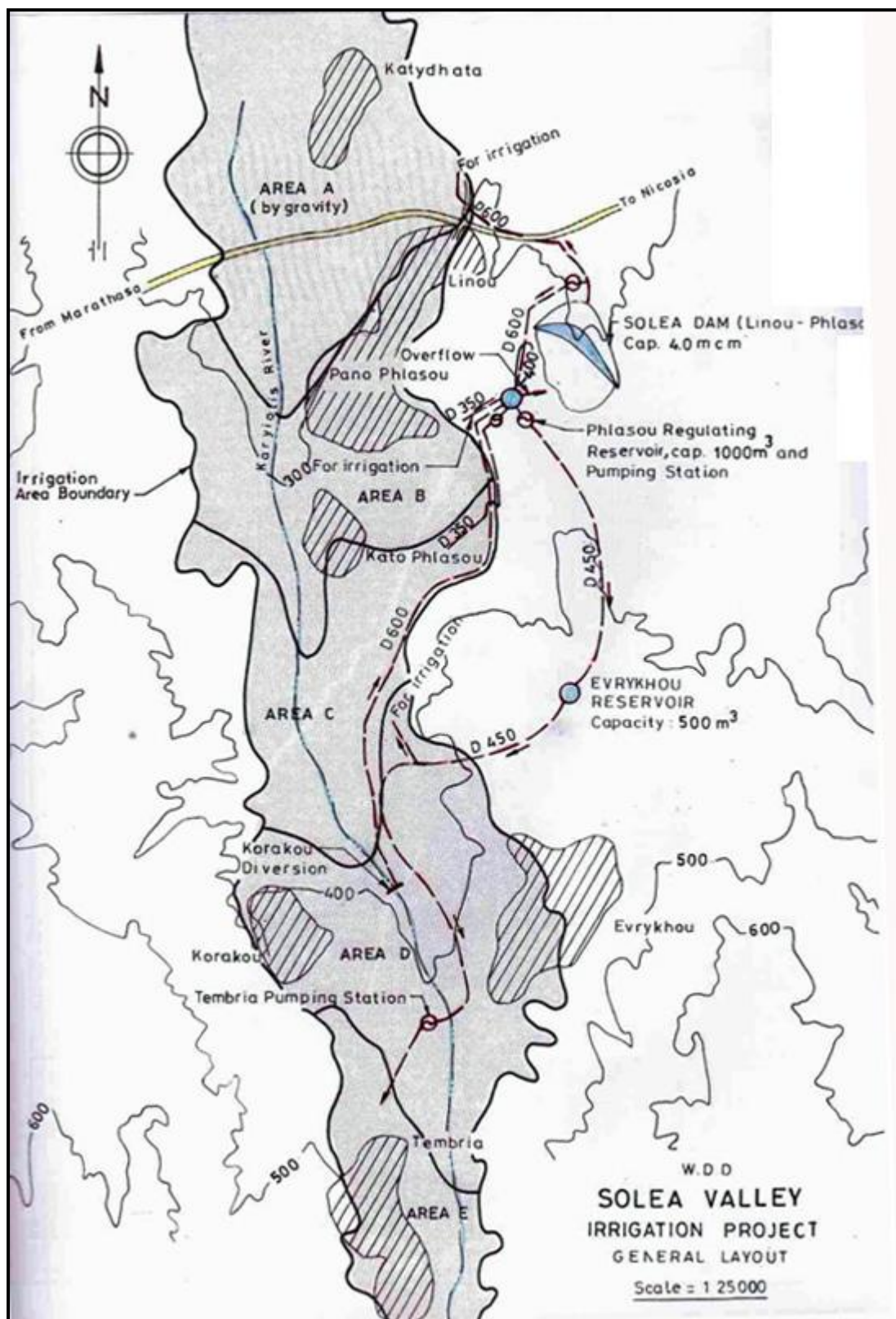
## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την αξιολόγηση της διαπερατότητας στη θέση θεμελίωσης του φράγματος Σολέας στην Κύπρο. Πρόκειται για ένα σύνθετο αρδευτικό έργο που αποτελείται από ένα σύνολο διακριτών έργων τα οποία χωροθετούνται σε διάφορα σημεία στην ευρύτερη κοιλάδα της Σολέας. Σκοπός του έργου είναι η εκμετάλλευση της απορροής του ποταμού Καρυώτη με αποθήκευση νερού όγκου μέχρι και  $4,5 \times 10^6 \text{ m}^3$  στον ταμιευτήρα του φράγματος και μεταφορά του με βαρύτητα ή άντληση σε πέντε συνολικά ζώνες άρδευσης συνολικής έκτασης 6670 στρεμμάτων. Οι ζώνες αυτές ανήκουν στις κοινότητες Λινού, Φλάσου, Κατύδατα, Ευρύχου, Κοράκου και Τεμπριά (Σχ. 1).

Η μελέτη για την συγκεκριμένη θέση του φράγματος έγινε από το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων της Κύπρου το οποίο κατά τη διάρκεια των ερευνών είχε μια στενή συνεργασία με το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης. Το έργο αναμένεται να λειτουργήσει στα τέλη του 2012. Η κατασκευή του έργου ανατέθηκε κατόπιν διαγωνισμού στην Κοινοπραξία Νέμεσις Εργοληπτική ΑΤΔ και ΕΛΤΕΡ ΑΤΕ, με προϋπολογισμό 18.000.000 €.

Το γεωλογικό υπόβαθρο της θέσης του φράγματος αποτελούν οι μαξιλαροειδείς λάβες (pillow lavas) της οφιολιθικής σειράς της Κύπρου. Κατά τη φάση της προκαταρκτικής έρευνας για την κατασκευή του, πραγματοποιήθηκαν εφτά γεωτρήσεις πάνω στον άξονα του φράγματος, οι τρεις στο αριστερό και οι άλλες τέσσερις στο δεξί αντέρεισμα. Σε όλες τις γεωτρήσεις εκτελέστηκαν δοκιμές εισπίεσης νερού. Άλλες πέντε ερευνητικές γεωτρήσεις διανοίχθηκαν στη λεκάνη κατάκλυσης χωρίς ωστόσο σ' αυτές να εκτελεσθούν δοκιμές εισπίεσης νερού. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν σχετικά υψηλές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας στο αριστερό αντέρεισμα της θέσης θεμελίωσης, ενώ στο δεξί αντέρεισμα χαμηλότερες. Επομένως, κρίθηκε αναγκαία η κατασκευή διαφραγματικής κουρτίνας τσιμεντενέσεων με σκοπό τη μείωση της διαπερατότητας, τον περιορισμό της τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας και κατά συνέπεια και των υπόγειων διαφυγών νερού.

Όλα τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία για τη μελέτη της διαπερατότητας, προέρχονται από τα έντυπα καταγραφής των ερευνητικών γεωτρήσεων που έγιναν κατά μήκος του άξονα του φράγματος, καθώς και από τις μετέπειτα γεωτρήσεις στεγανοποίησης.



Σχ. 1: Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής. Διακρίνεται η κοιλάδα της Σολέας, η γενική διάταξη των ζωνών άρδευσης (γραμμοσκιασμένο τμήμα) και η θέση του φράγματος (κλίμακα 1:25.000).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### Ο ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ

#### 1.1 Ορισμός

Η γνώση της διαπερατότητας (ή υδροπερατότητας) είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τη διάρκεια της μελέτης, σχεδίασης και της τελικής κατασκευής ενός τεχνικού έργου, είτε αυτό είναι επιφανειακό είτε υπόγειο. Είναι αναγκαία προκειμένου να αντιμετωπιστούν προβλήματα εισροών νερού μέσα σε εκσκαφές (π.χ. σήραγγες, στοές, θεμελιώσεις), καθώς και διαφυγές κάτω από κατασκευές συγκράτησης νερού (π.χ. φράγματα, λιμνοδεξαμενές, κλπ).

Με τον όρο **διαπερατότητα** (permeability) εννοούμε την ιδιότητα των γεωλογικών σωμάτων να επιτρέπουν την κίνηση ενός ρευστού μέσω διαμέσου της μάζας τους χωρίς την καταστροφή του μέσου και εξαρτάται κυρίως από το πορώδες τους. Εκφράζει την ευκολία με την οποία ένας σχηματισμός επιτρέπει τη διέλευση ενός ρευστού κάτω από την επίδραση τυχαίας πίεσης και μετριέται σε μονάδες επιφάνειας ( $m^2$ ). Επομένως, οποιοσδήποτε σχηματισμός επιτρέπει με ευκολία τη ροή, π.χ. του νερού, μέσα από τη μάζα του, τότε αυτός καλείται περατός (permeable), ενώ όταν η κίνηση του νερού μέσα από αυτόν είναι πιο δύσκολη έως πρακτικά αδύνατη, τότε ο σχηματισμός καλείται αντίστοιχα ημιπερατός (semi-permeable) ή αδιαπέρατος (impermeable). Σ' αυτό το σημείο πρέπει να γίνει ένας σαφής διαχωρισμός μεταξύ της διαπερατότητας και της **υδατοαπορροφητικότητας**. Η

υδατοαπορροφητικότητα είναι η ικανότητα των χαλαρών ή μη συνεκτικών σχηματισμών να προσλαμβάνουν νερό. Αυτή η ικανότητα όμως εξαλείφεται στους συνεκτικούς ή βραχώδεις σχηματισμούς μια και το πρωτογενές πορώδες στην περίπτωση των συνεκτικών ή ιζηματογενών πετρωμάτων μηδενίζεται λόγω στερεοποίησης ή διαγένεσης κι έτσι η πρόσληψη νερού είναι πρακτικά αδύνατη. Συνεπώς στην περίπτωση αυτών των σχηματισμών η πρόσληψη νερού δεν γίνεται μέσω των κενών πρωτογενών πόρων τους, αλλά από ανοιχτές δομές της μάζας τους (διακλάσεις, ρήγματα) που προέκυψαν μετά από την τεκτονική τους καταπόνηση και αποσάθρωση.

Η διαπερατότητα συσχετίζεται με την *υδραυλική αγωγιμότητα* (hydraulic conductivity) που εκφράζει το ρυθμό της ροής του νερού μέσα στους γεωλογικούς σχηματισμούς. Μέτρο της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι ο ομώνυμος συντελεστής  $k$ , που εκφράζει την ταχύτητα ροής του νερού μέσω μιας διατομής του σχηματισμού κάτω από μοναδιαία υδραυλική κλίση και μετριέται συνήθως σε m/sec. Η υδραυλική αγωγιμότητα καθορίζεται από το νόμο του Darcy σύμφωνα με τον οποίο ο ρυθμός ροής (παροχή) είναι ανάλογος της υδραυλικής κλίσης.

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (1)$$

όπου:

$Q$  = παροχή

$k$  = συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τη διεύθυνση ροής

$i$  = υδραυλική κλίση

$A$  = εμβαδό της διατομής

Στον πίνακα 1 διακρίνονται οι κατηγορίες διαπερατότητας των γεωλογικών σχηματισμών με βάση το συντελεστή  $k$ .

Η *εσωτερική ή πραγματική διαπερατότητα*  $K$  είναι μια ιδιότητα του υλικού μέσου μεταβίβασης του ρευστού και είναι ανεξάρτητη των ιδιοτήτων του ρευστού που μεταβιβάζεται. Η σχέση που συνδέει την πραγματική διαπερατότητα  $K$  και το συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας  $k$  είναι:

$$K = \frac{k\mu}{\rho g}, \text{ (m}^2\text{)} \quad (2)$$

όπου:

$K$  = εσωτερική ή πραγματική διαπερατότητα του υλικού μέσου

$k$  = συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας

$\mu$  = δυναμικό ιξώδες του ρευστού

$\rho$  = πυκνότητα του ρευστού

$g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας

Πίνακας 1: Κατηγορίες διαπερατότητας των γεωλογικών σχηματισμών με βάση το συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας (Βουδούρης, 2009).

| Κατηγορία         | Υδραυλική αγωγιμότητα $k$ (m/sec) |
|-------------------|-----------------------------------|
| Πολύ υδροπερατοί  | $\geq 10^{-1}$                    |
| Υδροπερατοί       | $10^{-6} < k < 10^{-1}$           |
| Λίγο υδροπερατοί  | $10^{-9} < k < 10^{-6}$           |
| Πρακτικά στεγανοί | $\leq 10^{-9}$                    |

## 1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαπερατότητα της βραχώμαζας

Όπως προαναφέρθηκε, η πρόσληψη και η κίνηση του νερού μέσα σε βραχώδεις σχηματισμούς οφείλεται κατά κύριο λόγο στο δευτερογενές πορώδες που αποκτούν μετά την καταπόνηση τους, κυρίως λόγω τεκτονισμού. Στην περίπτωση που η βραχώμαζα εμφανίζει πλήθος ανοιχτών ασυνεχειών που παρουσιάζουν μεγάλη πυκνότητα και ανάπτυξη, τότε η διέλευση του νερού γίνεται μέσω των ασυνεχειών αυτών. Πρωταρχικό ρόλο, εκτός από την ανάπτυξη, παίζει και το εύρος του ανοίγματος των ασυνεχειών. Όσο πιο ανοιχτές είναι οι ασυνέχειες τόσο περισσότερο νερό προσλαμβάνεται. Άλλος ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την διαπερατότητα στη βραχώμαζα είναι το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών (πίνακας 2). Για να είναι εφικτή η κίνηση του νερού δια μέσου των ασυνεχειών, θα πρέπει το υλικό πλήρωσής τους να παρουσιάζει υψηλή διαπερατότητα (όπως π.χ. κατακλαστίτης).

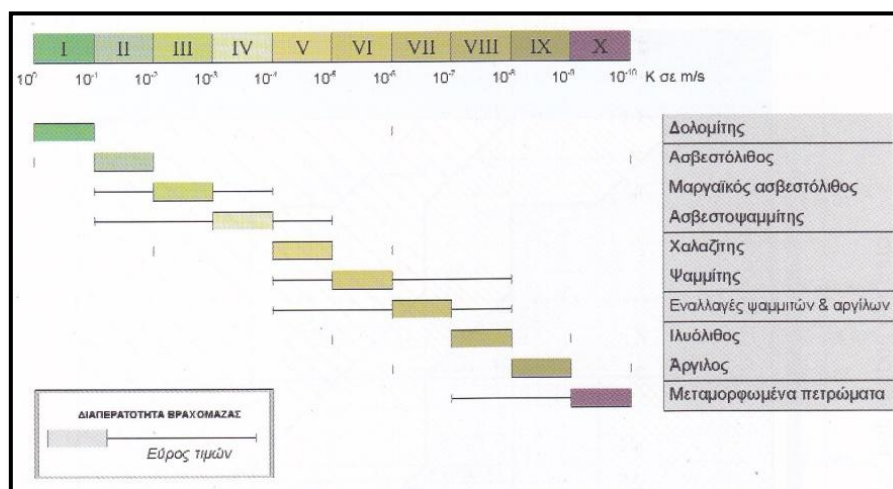
Εάν όμως το υλικό πλήρωσής τους είναι πρακτικά αδιαπέρατο (όπως π.χ. άργιλος), τότε η κίνηση του νερού μέσω αυτού είναι αμελητέα. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι πετρώματα όπως μάργες, μαργαϊκοί σχιστόλιθοι, αργιλικόι σχιστόλιθοι και φυλλίτες δεν παρουσιάζουν κανένα ενδιαφέρον για τη διαπερατότητά τους επειδή το αργιλικό υλικό που περιέχουν επουλώνει γρήγορα τις ασυνέχειες που προκύπτουν από την τεκτονική τους καταπόνηση (Σχ. 2).

Πίνακας 2: Περιγραφή κατάστασης υπόγειου νερού σε ασυνέχειες χωρίς ή με υλικό πλήρωσης (I.S.R.M., 1981).

| Κατηγορία | Χωρίς υλικό πλήρωσης                                     | Με υλικό πλήρωσης                                                         |
|-----------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| I         | Πολύ κλειστή και στεγνή χωρίς πιθανότητα εμφάνισης νερού | Υλικό πολύ στερεοποιημένο και αδιαπέρατο χωρίς δυνατότητα εμφάνισης νερού |
| II        | Στεγνή χωρίς παρουσία νερού                              | Υλικό υγρό χωρίς ελεύθερο νερό                                            |
| III       | Στεγνή με ενδείξεις νερού                                | Υλικό υγρό με παρουσία σταγόνων                                           |

|    |                                              |                                                      |
|----|----------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| IV | Υγρή χωρίς ελεύθερο νερό                     | Υλικό με ενδείξεις απόπλυσης και με συνεχή ροή νερού |
| V  | Ροή νερού όχι συνεχής αλλά με μορφή σταγόνων | Υλικό τοπικά αποπλυμένο με σημαντική ροή νερού       |
| VI | Συνεχής ροή νερού                            | Υλικό εντελώς αποπλυμένο με ροή νερού υπό πίεση      |

Στην περίπτωση που το σύνολο των ασυνεχειών δεν βρίσκεται σε υδραυλική επικοινωνία ούτως ώστε να είναι δυνατή η ροή του νερού από ένα σημείο σε ένα άλλο, ενδεχομένως οι παράγοντες που αναφέραμε πιο πάνω να μην επηρεάζουν σημαντικά τη διαπερατότητα της βραχόμαζας και έτσι το πέτρωμα να θεωρείται αδιαπέρατο. Κατά συνέπεια, το μέγεθος της τεκτονικής καταπόνησης και ο βαθμός μηχανικής και χημικής αποσάθρωσης, χαρακτηρίζουν το μέγεθος της διαπερατότητας στα βραχώδη πετρώματα. Μπορούμε γενικά να θεωρήσουμε ότι η επούλωση και το κλείσιμο των ασυνεχειών λόγω της αύξησης των ασκούμενων τάσεων με το βάθος, οδηγεί και στη γενική μείωση της διαπερατότητας αυτού του είδους.



Σχ. 2: Διαπερατότητα βραχωδών πετρωμάτων στη ζώνη αποσάθρωσης (Heitfeld, K.-H., et al., 1980) (Από Δημόπουλο, 2007).

Σε αντίθεση με τη βραχόμαζα όπου η διαπερατότητα εξαρτάται από το άνοιγμα, την ανάπτυξη και το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών (Goodman, 1980), η ροή του νερού στα εδάφη λαμβάνει χώρα διαμέσου του πρωτογενούς πορώδους που αποκτούν κατά την ιζηματογένεσή τους. Στο σχήμα 3 απεικονίζεται το Νομόγραμμα Breddin όπου δίνεται η κοκκομετρία των εδαφικών υλικών και ο συντελεστής διαπερατότητας  $k_f$  (m/sec) κατά Hazen. Συνεπώς, η διαπερατότητα στους εδαφικούς σχηματισμούς ελέγχεται από το μέγεθος, το σχήμα και τη διάταξη των κενών στη μάζα τους (Terzaghi et. al., 1996). Μια πολύ μικρή

επίδραση στην περατότητα των εδαφικών σχηματισμών παίζει και η θερμοκρασία νερού και πετρώματος. Τα λεπτόκοκκα εδάφη, με μέγεθος κόκκων της τάξης της αργίλου, έχουν γενικά πολύ χαμηλή διαπερατότητα, ενώ οι άμμοι και κροκάλες έχουν μεγάλη διαπερατότητα. Η σχέση που δίνει το πρωτογενές πορώδες στους εδαφικούς σχηματισμούς είναι:

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V - V_s}{V} \times 100(\%) \quad (3)$$

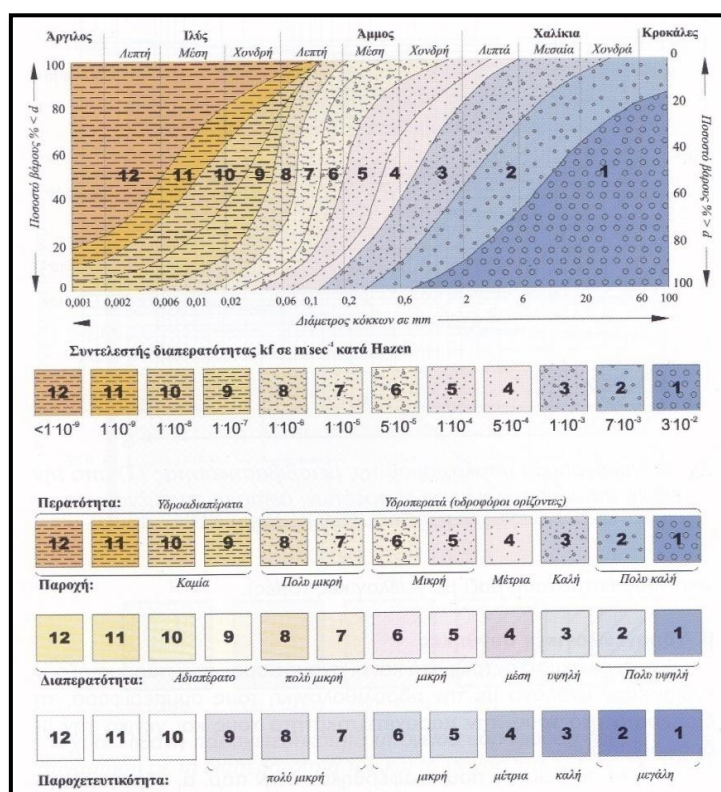
όπου:

$n$  = πρωτογενές πορώδες

$V_v$  = όγκος κενών

$V_s$  = όγκος στερεάς ύλης

$V$  = συνολικός όγκος εδάφους



Σχ. 3: Νομόγραμμα Breddin (H. Breddin, 1960 και 1963) (Από Δημόπουλο, 2007).

### 1.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την υδραυλική αγωγιμότητα

Η τιμή του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το πρωτογενές ή δευτερογενές πορώδες του γεωλογικού σχηματισμού, αλλά είναι συνάρτηση και της φύσης του ρευστού που ρέει μέσα σε αυτόν. Γενικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος της διαπερατότητας είναι:

- Η κοκκομετρική σύνθεση του εδάφους
- Η ανομοιογένεια του εδαφικού υλικού
- Η υδραυλική επικοινωνία των διακένων – ασυνεχειών
- Η πυκνότητα του υλικού όπως αυτή εκφράζεται από το πορώδες
- Το ιξώδες και το ειδικό βάρος του ρευστού
- Η θερμοκρασία του ρευστού
- Οι φυσικοχημικές μεταβολές που λαμβάνουν χώρα στην ακόρεστη ζώνη
- Η παρουσία οργανικής ύλης
- Η παρουσία κολλοειδών υλικών

Ένα μέσο έχει διαπερατότητα ίση με τη μονάδα, εάν στη μονάδα του χρόνου μεταβιβάζει, κάθετα προς τη διεύθυνση ροής, τη μονάδα όγκου του νερού μέσω μοναδιαίας διατομής, με επικράτηση του κινηματικού ιξώδους και με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα. Ένα πέτρωμα με μεγάλο συντελεστή  $k$  παρουσιάζει μικρή σχετικά αντίσταση στη ροή του νερού δια μέσου αυτού και έτσι επιτρέπει μεγάλη ταχύτητα ροής διήθησης με σχετικά μικρή υδραυλική κλίση, άρα με σχετικά μικρές απώλειες φορτίου. Το αντίθετο ακριβώς συμβαίνει στα πετρώματα με μικρό συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας. Στον πίνακα 3 αναφέρονται ενδεικτικές τιμές του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας, σε άρρηκτο (συμπαγές) πέτρωμα, βραχώμαζα και έδαφος.

Πίνακας 3: Ενδεικτικές τιμές συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας σε άθικτο πέτρωμα, βραχώμαζα και χαλαρό έδαφος (Hoek & Bray, 1981) (Από Δημόπουλο, 2008).

|                                        | k (cm/sec)                                        | Άρρηκτο πέτρωμα                                        | Βραχώμαζα                                                         | Έδαφος                                                                             |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Πρακτικά<br>αδιαπέρατο                 | $10^{-10}$<br>$10^{-9}$<br>$10^{-8}$<br>$10^{-7}$ | Αργιλικός σχιστόλιθος<br><br>Δολομίτης<br><br>Γρανίτης |                                                                   | Ομοιογενές<br>άργιλος κάτω από<br>την επιφανειακή<br>χαλαρωμένη ζώνη               |
| Μικρή παροχή,<br>φτωχή αποστράγγιση    | $10^{-6}$<br>$10^{-5}$<br>$10^{-4}$<br>$10^{-3}$  | Ψαμμίτης                                               | Ρωγμές πληρωμένες<br>με άργιλο                                    | Πολύ λεπτή άμμος,<br>ιλύς, μίγματα<br>άμμου και αργίλου<br>στρωματωμένη<br>άργιλος |
| Υψηλή παροχή,<br>ελεύθερη αποστράγγιση | $10^{-2}$<br>$10^{-1}$<br>1,0<br>$10^1$<br>$10^2$ |                                                        | Πέτρωμα με<br>διακλάσεις                                          | Καθαρή άμμος,<br>μίγματα καθαρής<br>άμμου και<br>χαλικιών                          |
|                                        |                                                   |                                                        | Πέτρωμα με<br>ανοικτές διακλάσεις,<br>πολύ ρωγματωμένο<br>πέτρωμα | Καθαρά χαλίκια                                                                     |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Η ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΕΝΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

#### 2.1. Επιλογή της θέσης του φράγματος

Η οριστική επιλογή της θέσης θεμελίωσης του φράγματος απαιτεί ένα συνδυασμό παραμέτρων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τη βελτιστοποίηση του τεχνικού έργου. Μια πρώτη εκτίμηση των πιθανών θέσεων που ευνοούν την κατασκευή φράγματος προκύπτει από την αξιολόγηση της μορφολογίας και στη συνέχεια οριστικοποιείται από τη γεωλογική, υδρογεωλογική και τεχνικογεωλογική αξιολόγηση. Για το σκοπό αυτό διενεργείται γεωλογική χαρτογράφηση που μας παρέχει σημαντικές πληροφορίες που αφορούν για παράδειγμα τη φύση και τη δομή των γεωλογικών σχηματισμών, τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά (πάχος, παράταξη και κλίση), την υδρογεωλογική τους συμπεριφορά καθώς και τα γενικά μηχανικά χαρακτηριστικά τους (αποσάθρωση, γενική αντοχή και ευστάθεια). Ειδικότερα στοιχεία αναφορικά με τη στεγανότητα της θέσης θεμελίωσης και του ταμιευτήρα, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών, τη ρωγμάτωση και την αποσάθρωσή τους στο βάθος θα προκύψουν από τα αποτελέσματα των γεωερευνητικών εργασιών. Αυτές περιλαμβάνουν συνήθως μια σειρά ερευνητικών γεωτρήσεων που γίνονται στην προτεινόμενη θέση θεμελίωσης του φράγματος και στη λεκάνη του ταμιευτήρα, καθώς και ερευνητικές στοές στα αντερείσματα. Στα πλαίσια των γεωερευνητικών εργασιών διεξάγονται εργαστηριακές και επί τόπου (in situ) δοκιμές από τις οποίες προσδιορίζονται με ακρίβεια η αντοχή, η ελαστικότητα, ο βαθμός ρωγμάτωσης, ο βαθμός αποσάθρωσης και η διαπερατότητα του υποβάθρου. Με βάση όλα τα παραπάνω, σχηματίζεται μια αρκετά επαρκής εικόνα για τη συμπεριφορά του υποβάθρου κατά τη διάρκεια λειτουργίας του φράγματος.

Τα πιο σημαντικά γεωλογικά ζητήματα σχετικά με την κατασκευή ενός φράγματος είναι:

#### Για τη θέση του φράγματος

- Ευστάθεια στην περιοχή θεμελίωσης (παραμορφώσεις, αντοχές, αποσάθρωση – διάβρωση)
- Ευστάθεια αντερείσμάτων
- Στεγανότητα της θέσης θεμελίωσης και των αντερείσμάτων
- Ευστάθεια συνοδών έργων (υπερχειλιστής, σήραγγα εκτροπής κ.λπ.).

#### Για την περιοχή του ταμιευτήρα

- Στεγανότητα της λίμνη
- Ευστάθεια κλιτύων γύρω από τον ταμιευτήρα (άμεση ή προκαλούμενη επικινδυνότητα κατά τη λειτουργία του φράγματος)

- Καθεστώς φερτών υλικών (λιθολογία, γεωμορφολογία)
- Εντοπισμός δανειοθαλάμων κατάλληλου υλικού (κυρίως για τα χωμάτινα φράγματα).

Ορισμένοι ερευνητές θεωρούν ότι για χωμάτινα φράγματα ύψους μέχρι 40 - 50m, χαρακτηριστικά όπως η παραμορφωσιμότητα και η αντοχή γίνονται γενικά αποδεκτά σ' ένα μεγάλο εύρος διακύμανσης, ανεξάρτητα από τις συγκεκριμένες γεωλογικές παραμέτρους των σχηματισμών που αποτελούν το υπόβαθρο θεμελίωσης π.χ. λιθολογία, βαθμός αποσάθρωσης, δομή κ.λπ. (Oliveira, 1979). Στις περιπτώσεις αυτές οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της κατασκευής είναι κυρίως τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών για την εξασφάλιση της στεγανότητας και των διαφυγών στη θέση θεμελίωσης και στην επαφή θεμελίωσης – κατασκευής.

Πιο αναλυτικά τα **μορφολογικά κριτήρια** που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή μια θέσης φράγματος είναι:

- Μικρό εμβαδόν της διατομής του φράγματος
- Διεύρυνση της λεκάνης ανάντη του φράγματος
- Ήπιο ανάγλυφο και μικρές κλίσεις των πρανών
- Ευνοϊκή θέση του υπερχειλιστή / εκχειλιστή
- Μικρός όγκος εκσκαφών στις θέσεις κατασκευής των συνοδών έργων
- Μικρές τιμές του λόγου  $V_{\Phi P} / V_T$  (όγκος σώματος φράγματος / όγκος νερού στον ταμιευτήρα):
  - ✓  $0,02 < \omega < 0,05$  βέλτιστες συνθήκες
  - ✓  $0,1 < \omega < 0,2$  αποδεκτές συνθήκες
  - ✓  $0,2 < \omega < 0,25$  μη αποδεκτές συνθήκες
- Μικρές τιμές του λόγου  $E_{\Phi P} / V_T$  (επιφάνεια διατομής φράγματος / όγκος ταμιευτήρα).

Είναι φανερό ότι ο συνδυασμός των πρώτων δύο, εκεί δηλαδή που στη θέση του φράγματος η κοιλάδα στενεύει ενώ στα ανάντη αμέσως διευρύνεται, αποτελεί την ιδανικότερη περίπτωση από πλευράς γεωμορφολογίας αφού επηρεάζει και τους υπόλοιπους παράγοντες.

Όσο αφορά τα **υδρολογικά κριτήρια**, αυτά είναι:

- Επαρκές μέσο ετήσιο ύψος κατακρημνισμάτων
- Μεγάλος συντελεστής επιφανειακής απορροής των πετρωμάτων με ταυτόχρονα μεγάλη ειδική απόδοση της λεκάνης ( $l / \text{sec} \cdot \text{km}^2$ ).

Με βάση τη μέση ετήσια απορροή του ποταμού  $Q_T$  ( $\text{m}^3/\text{έτος}$ ), υπολογίζεται από τη γραμμική σχέση ύψους φράγματος / χωρητικότητας ταμιευτήρα, το επιθυμητό ύψος του φράγματος  $H_{\Phi}$ . Στόχος είναι να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή χωρητικότητα με όσο το δυνατό μικρότερο ύψος φράγματος (Σχ.4). Για το τελικό ύψος φράγματος χρησιμοποιείται η σχέση:

$$H_{F(\text{τελικό})} = H_{\Phi} + d \quad (4)$$

όπου:

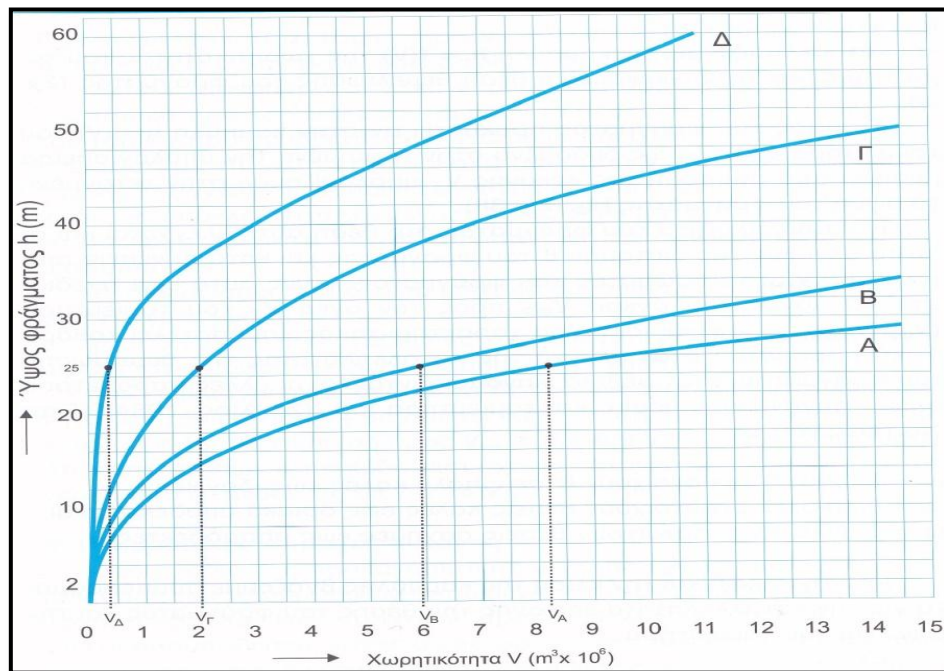
$d$  = ύψος ασφάλειας φράγματος.

$$\checkmark \quad d = 1,5w + k$$

$w = 0,7 + 0,1 L$  (m) ύψος κύματος

$L$  = το μήκος της λίμνης του ταμιευτήρα (km) και

$$k = 0,5 - 3,0 \text{ m}$$

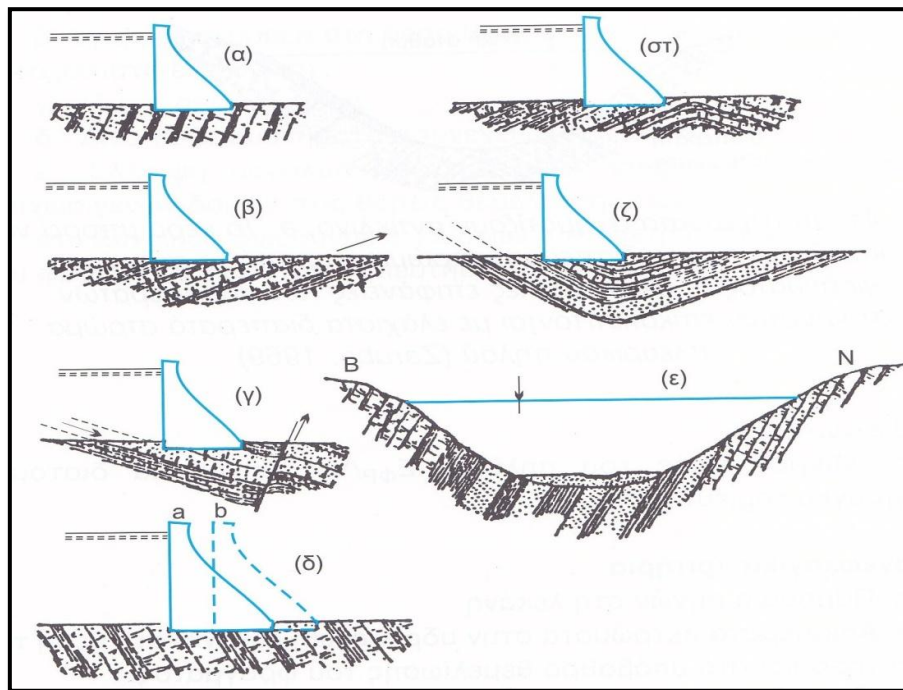


Σχ. 4: Καμπύλες ύψους – χωρητικότητας ταμιευτήρα για θέσεις φραγμάτων στην επαρχία Ελασσόνας (Α: Αγιονέρι, Β: Κεφαλόβρυσος, Γ: Καλλιθέα, Δ: Λιβάδι) (Σούλιος, 1994. Από Δημόπουλο, 2007).

Τα γεωλογικά - υδρογεωλογικά κριτήρια είναι:

- Η παρουσία πηγών στη λεκάνη κατάκλυσης
- Η διαπερατότητα των πετρωμάτων τόσο στη θέση του ταμιευτήρα όσο και στη θέση θεμελίωσης του φράγματος
- Η ομοιογένεια του υποβάθρου στη θέση θεμελίωσης
- Η φέρουσα ικανότητα και αντοχή του υποβάθρου στη θέση θεμελίωσης
- Η δομή και αποσάθρωση της βραχώμαζας στη θέση θεμελίωσης και στον ταμιευτήρα
- Η ευστάθεια των αντρεισμάτων και των τεχνητών πρανών
- Η παρουσία μεγάλων ρηξιγενών δομών (ενεργών ή μη) και πτυχωσιγενών δομών στις θέσεις θεμελίωσης των έργων
- Η γεωμετρία των πετρωμάτων στον άξονα του φράγματος και στον ταμιευτήρα.

Στο σχήμα 5 διακρίνονται συνοπτικά έξι πιθανές θέσεις θεμελίωσης ενός φράγματος με βάση τα γεωλογικά κριτήρια, όπως αυτές προτάθηκαν από τον Zaruba (1969).



Σχ. 5: Ευνοϊκές και μη ευνοϊκές θέσεις θεμελίωσης ενός φράγματος. (Zaruba, 1969)  
(Από Δημόπουλο, 2007).

- (α) Ευνοϊκή κλίση των στρωμάτων για τη θέση θεμελίωσης του φράγματος
- (β) Μη ευνοϊκή θέση θεμελίωσης του φράγματος
- (γ) Μη ευνοϊκή θέση θεμελίωσης του φράγματος
- (δ) α: μη ευνοϊκή, β: ευνοϊκή θέση
- (ε) Οι νότιες πλευρές της λεκάνης κατάκλυσης χαρακτηρίζονται επικίνδυνες, ενώ οι αντίστοιχες βόρειες πλευρές χαρακτηρίζονται ακίνδυνες
- (στ) Ευνοϊκή θέση θεμελίωσης του φράγματος
- (ζ) Μη ευνοϊκή θέση θεμελίωσης του φράγματος.

## 2.2. Η σημασία της αξιολόγησης της διαπερατότητας

Η μελέτη της διαπερατότητας αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι των ερευνητικών εργασιών που γίνονται σε όλη τη λεκάνη όπου αναμένεται να κατασκευαστεί το φράγμα. Αυτό γιατί τόσο η θέση και το ύψος του φράγματος, όσο και τα μέτρα στεγανοποίησης που γίνονται για μειωθεί η διαπερατότητα, εφόσον κριθούν αναγκαία, επηρεάζονται από αυτήν. Εάν η στεγανοποίηση δεν επιτευχθεί σε ικανοποιητικό βαθμό στα διαπερατά πετρώματα, τότε το φράγμα είναι πολύ πιθανό να αστοχήσει λόγω διαφυγών νερού τόσο κάτω από το κυρίως σώμα όσο και από τα αντερείσματα. Οι υπόγειες ροές εξαρτώνται μεν από το συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας, αλλά εξαρτώνται επίσης και από τη διαφορά υδραυλικού φορτίου (υδραυλική κλίση) μεταξύ ανάντη και κατόντη του φράγματος. Στη θέση του φράγματος οι υπόγειες ροές χαρακτηρίζονται πάντα από μεγάλη υδραυλική κλίση και συχνά από υψηλή διαπερατότητα λόγω της χαλάρωσης της βραχώμαζας από τις ανοικτές ρωγμές στο επιφανειακό της τμήμα, ακόμη και αν πρόκειται για αδιαπέρατους σχηματισμούς. Επίσης

είναι δυνατή η ανάπτυξη υπόγειων υδροστατικών πιέσεων στη θέση θεμελίωσης, όπως επίσης και διάβρωση του πετρώματος θεμελίωσης αν αυτό είναι διαβρώσιμο.

Έτσι, η γνώση της διαπερατότητας που χαρακτηρίζει γενικά το εκάστοτε πέτρωμα θεμελίωσης, αν δηλαδή αυτό είναι θεωρητικά διαπερατός ή αδιαπέρατος σχηματισμός, είναι σημαντική γιατί ένα περατό πέτρωμα έχει τελείως διαφορετική συμπεριφορά, από ένα μη περατό. Ένα αδιαπέρατο πέτρωμα παρουσιάζει συνήθως ρωγμάτωση του επιφανειακού του τμήματος λόγω τεκτονικής καταπόνησης, όταν πρόκειται για κρυσταλλικά ή συμπαγή πετρώματα. Συνήθης είναι και η παρουσία επιφανειακής ζώνης αποσάθρωσης του πετρώματος. Ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας και συνεπώς και η διαπερατότητα μειώνονται με το βάθος, ενώ η στεγανοποίηση του υποβάθρου με την κατασκευή διαφραγματικής κουρτίνας ακολουθεί γεωμετρικά περίπου την τοπογραφία. Παραδείγματα φραγμάτων που κατασκευάστηκαν σε αδιαπέρατο υπόβαθρο είναι του Πλαστήρα στον ποταμό Μέγδοβα, του Καστρακίου στον ποταμό Αχελώο και το φράγμα Πουρνάρι στον ποταμό Άραχθο. Σε πολυάριθμες έρευνες που έγιναν σε διάφορα φράγματα αποδείχτηκε ότι μια σχετικά συνεκτική βραχώμαζα σε αρκετά ρωγματομένες θέσεις της, παρουσιάζει αυξημένη διαπερατότητα ακόμα και σε βαθύτερα επίπεδα κάτω από την επιφάνεια (Heitfeld, 1965).

Τα διαπερατά πετρώματα παρουσιάζουν γενικά έντονη χαλάρωση – αποσάθρωση και γι' αυτό το στεγανοποιητικό διάφραγμα απαιτεί έρευνα σε βάθος για να εξακριβωθεί η γεωμετρία της γραμμής παραδεκτών τιμών Lugeon. Τέτοιες περιπτώσεις συναντάμε στο φράγμα Μεσοχώρας στον Αχελώο ποταμό και στο φράγμα Ασωμάτων στον ποταμό Αλιάκμονα. Τα νεότερα κλαστικά ιζήματα ή οι ηφαιστειακοί τόφφοι εμφανίζουν και αυτά έντονη γενική χαλάρωση, με την υπόγεια κουρτίνα στεγανοποίησης να προκύπτει από τη σύνταξη δικτύων ροής. Μια ξεχωριστή περίπτωση διαπερατών σχηματισμών είναι όσοι παρουσιάζουν εκλεκτική έντονη ρωγμάτωση και χαρακτηρίζονται κυρίως από την παρουσία ρηγμάτων, από επιφανειακές επωθήσεις και από εκλεκτική «καρστικοποίηση» κροκαλοπαγών και ψαμμιτών. Παραδείγματα φραγμάτων που θεμελιώνονται σε τέτοιες συνθήκες είναι τα φράγματα Κρεμαστών και Συκιάς στον Αχελώο ποταμό.

Τέλος τα πετρώματα με συνολικά υψηλή διαπερατότητα (μπορούν να χαρακτηριστούν και ως «καρστικά») προϋποθέτουν την αναζήτηση του αδιαπέρατου υποβάθρου προκειμένου να εξεταστούν για την περίπτωση κατασκευής φράγματος. Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στο εάν το βασικό επίπεδο του καρστ είναι σε μικρό βάθος ή παρεμβάλλεται στρωματογραφικά ένας αδιαπέρατος σχηματισμός (π.χ. φράγμα Λούρου). Αν το στεγανό υπόβαθρο εκτείνεται σε πολύ μεγάλος βάθος τότε συχνά εγκαταλείπεται η υποψήφια θέση θεμελίωσης του φράγματος.

### 2.3. Διαφυγές νερού κάτω από τη θέση θεμελίωσης

#### 2.3.1. Ορισμός

Με τον όρο **διαφυγές νερού** (water leaks) εννοούμε τις απώλειες νερού που δύναται να προκύψουν κάτω από τον άξονα του φράγματος, από τα πλευρικά αντερείσματα ή/και από τον ταμιευτήρα. Για να προκύψει διαφυγή ή διαρροή νερού θα πρέπει να υπάρχει διαφορά στην πιεζομετρική στάθμη ανάμεσα σε δύο θέσεις, όπως συμβαίνει ανάντη και κατάντη της θέσης του ταμιευτήρα ενός φράγματος. Όταν υπάρχει μια τέτοια διαρροή είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί η ποσότητα του νερού που διαρρέει. Η κύρια παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη είναι η διαπερατότητα των πετρωμάτων ή των εδαφών. Ο προσδιορισμός της είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι του τεχνικού έργου, κυρίως αν η περιοχή δομείται από διαπερατά πετρώματα, για το λόγο ότι μπορεί να προκαλέσουν απώλειες του αποθηκευμένου νερού από τον ταμιευτήρα και σοβαρά προβλήματα στην ευστάθεια του έργου. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι ακόμα και αν το υπόβαθρο θεμελίωσης θεωρείται στεγανό, πάντοτε υπάρχουν, έστω και μικρές, διαφυγές νερού. Το ανεκτό μέγεθος των διαφυγών εξαρτάται από την ασφάλεια του έργου και το σκοπό λειτουργίας του. Εάν δεν τίθεται ζήτημα ασφάλειας, ένα αναρρυθμιστικό ή αντιπλημμυρικό φράγμα μπορεί να ανεχθεί περισσότερες διαφυγές από ένα υδρευτικό ή ενεργειακό.

#### 2.3.2. Παραδείγματα από τον Ελλαδικό χώρο

Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα από τον Ελλαδικό χώρο και ένα από τα ελάχιστα διεθνώς, όπου ένα φράγμα δε λειτούργησε ποτέ λόγω διαφυγών νερού από τον ταμιευτήρα, είναι το φράγμα του Περδίκας στην περιοχή της Πτολεμαΐδας (P. Pantartzis, G. Emmanouelidis, L. Krapp, P. Milanovic 1993). Πρόκειται για ένα χωμάτινο φράγμα ύψους 40m και χωρητικότητας  $11 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Τρεις μήνες αφότου άρχισε να γεμίζει, παρατηρήθηκαν οι πρώτες διαφυγές. Οι διαφυγές που μετρήθηκαν σε ύψος 11m και χωρητικότητας  $2,57 \times 10^6 \text{ m}^3$  υπολογίστηκαν σε  $157.000 \text{ m}^3/\text{d}$ , ενώ στην ανώτερη πιεζομετρική στάθμη οι διαφυγές μετρήθηκαν σε  $432.000 \text{ m}^3/\text{d}$ . Μετά από εκτενή έρευνα, αποδείχθηκε ότι κατά το στάδιο της αρχικής μελέτης δε δόθηκε έμφαση στην παρουσία του καρστικοποιημένου ασβεστόλιθου, ο οποίος βρισκόταν με τη μορφή τεκτονικού κέρατος σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του πυθμένα της λεκάνης κατάκλυσης. Κι αυτό γιατί δεν αξιολογήθηκε σωστά η μορφή των ισοπιεζομετρικών καμπυλών που ως κλειστές καμπύλες έδειχναν καθαρά την κίνηση του νερού προς τον ασβεστόλιθο. Με την είσοδο του νερού στον ταμιευτήρα και την ταυτόχρονη αύξηση των πιέσεων στους ημιπερατούς σχηματισμούς του Νεογενούς και Τεταρτογενούς, έσπασε το επιφανειακό χαλαρό κάλυμμα του ασβεστόλιθου με αποτέλεσμα μεγάλος όγκος νερού να εισχωρήσει στο karst και να προκαλέσει έντονη εσωτερική διάβρωση.

Αντίθετα με την περίπτωση του φράγματος Περδίκας, το φράγμα του Λούρου στην Ήπειρο, δεν παρουσίασε διαφυγές νερού, παρόλο που θεμελιώνεται πάνω στους

ασβεστόλιθους της Ιονίου Ζώνης. Στρωματογραφικά, πάνω από τον ασβεστόλιθο του Παντοκράτορα ηλικίας Λιάσιου, υπάρχει ο ασβεστόλιθος με *Ammonitico rosso* με ενστρώσεις κερατολίθων και αργιλικών σχιστολίθων ηλικίας Δογγέριου, ενώ ακολουθούν οι λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθοι της Βίγλας με ενστρώσεις κερατολίθων ηλικίας Κρητιδικού. Από όλο αυτό το ανθρακικό πακέτο με ισχυρή αποσάθρωση και καρστικοποίηση, το μόνο αδιαπέρατο στρώμα θεωρούνται οι αργιλικοί σχιστολίθοι, οι οποίοι όμως δεν εμφανίζονται καν στην περιοχή του φράγματος. Η στεγανότητα όμως του υποβάθρου διαπιστώνεται από την παρουσία των πηγών του Αγίου Γεωργίου, ανάντη και ανατολικά του ταμιευτήρα, σε υψηλότερα επίπεδα από τα επίπεδα θεμελίωσης του φράγματος. Επομένως, οι τυχόν απώλειες νερού που μπορεί να προκύψουν από τον ταμιευτήρα οδηγούνται αυτόματα, μέσω της εκβολής των πηγών, ξανά μέσα σε αυτόν και έτσι το φράγμα παραμένει ευσταθές χωρίς διαφυγές στα κατάντη.

### 2.3.3. Υπολογισμός διαφυγών από τα δίκτυα ροής

Ένα θεωρητικός τρόπος να εκτιμήσουμε τις υπόγειες διαφυγές νερού είναι με τη χρήση των **δικτύων ροής** (flow net). Η ροή του νερού μέσα από ένα ομογενές και κορεσμένο έδαφος, σε τρισδιάστατο μοντέλο, ορίζεται από την εξίσωση του Laplace,

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

όπου:

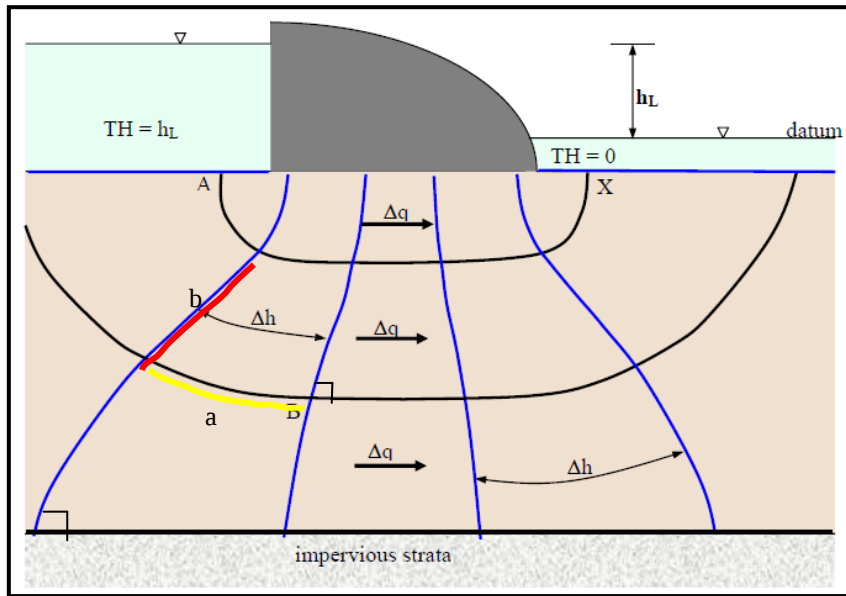
$h$  = υδραυλικό φορτίο

$x, y, z$  = συντεταγμένες

Όταν η ροή είναι δισδιάστατη, τότε η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

Στο σχήμα 6 παριστάνεται ένα τυπικό δίκτυο ροής. Χαρακτηρίζεται από δύο ομάδες γραμμών οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους. Η μια αποτελεί τις γραμμές ροής (streamlines ή flow lines- μαύρη γραμμή) και η άλλη τις ισοδυναμικές γραμμές (equipotential lines - μπλε γραμμή). Κατά μήκος μια γραμμής ροής το νερό κινείται με διεύθυνση κάθετα στις ισοδυναμικές γραμμές, ενώ κατά μήκος μιας ισοδυναμικής γραμμής το υδραυλικό φορτίο είναι το ίδιο. Στην πράξη, υπάρχουν χιλιάδες γραμμές ροής σε ένα τέτοιο δίκτυο. Η ζώνη ανάμεσα σε δύο διαδοχικές γραμμές ροής ονομάζεται δίαυλος ροής (flow channel) και η ζώνη μεταξύ δύο ισοδυναμικών γραμμών, τμήματα των διαύλων ροής, ονομάζεται πεδίο (equipotential drop).



Σχ. 6: Δίκτυο ροής. Απεικονίζονται οι γραμμές ροής (μαύρη γραμμή) και οι ισοδυναμικές γραμμές (μπλε γραμμή) (N. Sivakugan, 2005).

Κατά την προσέγγιση του δικτύου ροής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συνοριακές συνθήκες για το εκάστοτε πρόβλημα. Μερικές από αυτές αναφέρονται στη συνέχεια:

- Θα πρέπει να πληρούνται οι συνοριακές συνθήκες εισόδου και εξόδου του νερού και οι συνθήκες στα όρια μεταξύ δύο διαφορετικών εδαφών (π.χ. η επιφάνεια που απαιτείται για να διέλθει μια ορισμένη ποσότητα νερού από το ένα έδαφος στο άλλο θα είναι τόσο μικρότερη όσο μεγαλύτερη είναι η διαπερατότητά τους).
- Οι γραμμές ροής διαθλώνται όταν διέρχονται μέσα από εδάφη διαφορετικής διαπερατότητας.
- Όταν η κατακόρυφη διαπερατότητα  $k_z$  είναι μικρότερη από την οριζόντια  $k_x$ , πράγμα που συνήθως ισχύει, τότε η εξίσωση του Laplace (σχέση 6) παίρνει τη μορφή:

$$k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

Το δίκτυο ροής σε αυτή την περίπτωση χαράσσεται πολλαπλασιάζοντας τη φυσική οριζόντια διάσταση με την ποσότητα  $\sqrt{k_z / k_x}$ .

- Μέσα από όλους τους διαύλους ροής διέρχεται η ίδια ποσότητα νερού ( $\Delta q$ ).
- Κατά τη μετάβαση από μια ισοδυναμική γραμμή στην άλλη το υδραυλικό φορτίο μειώνεται κατά την ίδια ποσότητα ( $\Delta h$ ).

- Σε περίπτωση ομογενούς και ισότροπου εδάφους τα πεδία λαμβάνονται τετράγωνα ( $a=b$ ). Όταν το νερό διηθείται μέσω του ορίου δύο ζωνών διαφορετικής διαπερατότητας (Σχήμα 7), τα πεδία επιμηκύνονται ή βραχύνονται έτσι ώστε να ικανοποιείται η σχέση:

$$\frac{a}{b} = \frac{k_2}{k_1}, k_2 > k_1 \quad (8)$$

Αφού χαράζουμε το δίκτυο ροής, τότε μπορούμε να προσδιορίσουμε την ποσότητα του νερού που διαρρέει κάτω από το φράγμα και την ασφάλεια έναντι υδραυλικής θραύσης. Η ποσοτική εκτίμηση των διαφυγών μπορεί να γίνει εφαρμόζοντας το νόμο του Darcy. Σύμφωνα με αυτόν, οι απώλειες νερού ( $Q$ ) είναι ανάλογες της υδραυλικής αγωγιμότητας ( $k$ ) του πετρώματος και της υδραυλικής κλίσης ( $i$ ).

$$Q = k \cdot i \cdot A = k \frac{\Delta h}{l} A \text{ (m}^3\text{/sec)} \quad (9)$$

Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι χαρακτηριστικό του κάθε γεωλογικού σχηματισμού που εξαρτάται από τη δομή και την κατάσταση του υποβάθρου θεμελίωσης και υπολογίζεται από τυποποιημένες δοκιμές. Η υδραυλική κλίση εξαρτάται από την πιεζομετρική κατάσταση του ευρύτερου χώρου θεμελίωσης και υπολογίζεται από το λόγο της διαφοράς της πιεζομετρικής στάθμης μεταξύ δύο σημείων ( $\Delta h$ ) προς την απόσταση των σημείων αυτών ( $l$ ). Τέλος, το εμβαδό της διατομής ( $A$ ) της υπόγειας ροής ελέγχεται από τη γεωμετρία του γεωλογικού υλικού και βρίσκεται από την ανάλυση της τοπογραφίας μέσω γεωλογικών χαρτών.

Από το σχήμα 6 ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη:

$h_L$  = συνολικό υδραυλικό φορτίο

$N_f$  = αριθμός διαύλων ροής. Στην περίπτωσή μας παίρνει τιμή 3.

$N_d$  = αριθμός πεδίων. Στην περίπτωσή μας παίρνει τιμή 5.

$\Delta h$  = βαθμίδα δυναμικού:  $\Delta h = h_L / N_d = 0,2 h_L$

$i$  = υδραυλική κλίση:  $i = \Delta h / a$

$q$  = η παροχή ενός διαύλου ανά τρέχον μέτρο μήκους

$Q$  = η παροχή όλων των διαύλων ροής,  $Q = N_f \times q$

Σύμφωνα λοιπόν με το νόμο του Darcy, η παροχή ενός διαύλου ανά τρέχον μέτρο μήκους ορίζεται από την εξίσωση:

$$q = kiA = k \left( \frac{\Delta h}{a} \right) \cdot (b \cdot 1)$$

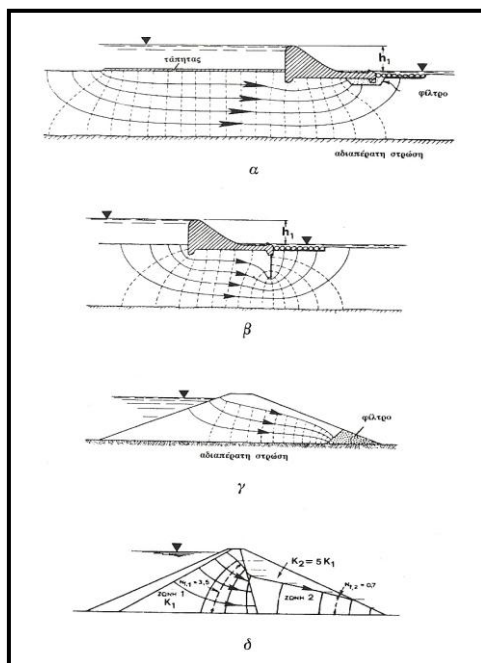
$$\text{Όταν } a=b \text{ και } \Delta h = h_L / N_d \longrightarrow q = k \frac{\Delta h}{N_d}$$

Η συνολική παροχή ανά μονάδα μήκους προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$Q = N_f \cdot q = k \cdot h_L \cdot \frac{N_f}{N_d} \quad (10)$$

Η διαφορά στην πιεζομετρική στάθμη (total head) μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε σημείο του δικτύου ροής. Για παράδειγμα, στο σημείο Β (Σχ. 6) η στάθμη είναι:  $h_L - 2\Delta h = 3\Delta h$ .

Στην παρούσα εργασία, για τον υπολογισμό των διαφυγών νερού και του εικονικού δικτύου ροής κάτω από τον άξονα του φράγματος, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα GeoStudio (<http://www.geo-slope.com/>).



Σχ. 7: α) Δίκτυο ροής κάτω από φράγμα από μπετόν με οριζόντιο στεγανό τάπητα. Έδραση του φράγματος πάνω σε ομοιογενές έδαφος. β) Δίκτυο ροής κάτω από φράγμα από μπετόν με κατακόρυφο διάφραγμα ομοιογενές έδαφος. γ) Δίκτυο ροής στο σώμα του φράγματος ομοιογενές έδαφος. δ) Δίκτυο ροής στο σώμα χωμάτινου φράγματος σύνθετης διατομής: δύο ζώνες (Terzaghi, Peck, 1948) (Από Μαραγκό, 1997).

### 2.3.4. Έλεγχος υδραυλικής αστοχίας

Η υδραυλική αστοχία (ή υδραυλική υποσκαφή) οφείλεται σε δύο κυρίως παράγοντες:

1. Στην υδραυλική θραύση ή αποκόλληση που οφείλεται στην ανύψωση του εδάφους κοντά στον κατάντη πόδα του φράγματος, εξαιτίας του ότι η πρόσθετη υδροστατική δύναμη σε ορισμένες θέσεις έχει ξεπεράσει το ενεργό βάρος του εδάφους.

Η ασφάλεια έναντι της υδραυλικής αποκόλλησης επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό της κρίσιμης υδραυλικής κλίσης  $i_{crit}$ , που δίνεται από τη σχέση:

$$i_{crit} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (11)$$

όπου:

$\gamma'$  = ενεργό ειδικό βάρος εδάφους

$\gamma_w$  = ειδικό βάρος νερού

$G_s$  = ειδικό βάρος στερεών συστατικών

$e$  = δείκτης πόρων

Συνεπώς, η κρίσιμη υδραυλική κλίση είναι ένα μέγεθος που εξαρτάται μόνο από τις εδαφικές παραμέτρους. Είναι αντιστρόφως ανάλογο του πορώδους και επομένως ανάλογο του βαθμού συμπίκνωσης. Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι της υδραυλικής αποκόλλησης που οφείλεται σε ανύψωση του εδάφους δίνεται από τη σχέση 12 και συνήθως παίρνει τιμές 5-6. Σε περίπτωση μειωμένου συντελεστή ασφαλείας, τοποθετούνται στην περιοχή που βρίσκεται αμέσως μετά τον κατάντη πόδα του φράγματος, εκεί δηλαδή που αναμένεται να παρουσιαστούν φαινόμενα υδραυλικής θραύσης, ανεστραμμένα φίλτρα. Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας F.S. οφείλει να είναι:  $F.S. \geq 1,5$ .

$$F.S. = \frac{i_{crit}}{i} \quad (12)$$

όπου:

$i$  = υπάρχουσα υδραυλική κλίση.

Κατά τη λειτουργία του ταμιευτήρα είναι πολύ πιθανό να συμβούν κάποιες μεταβολές στο υπέδαφος εξαιτίας της μείωσης της αποτελεσματικότητας των διαφραγμάτων ή των φίλτρων με την πάροδο του χρόνου. Αυτές οι μεταβολές είναι δυνατό να οδηγήσουν σε σημαντικές μεταβολές του δικτύου ροής και της κατανομής των υδροστατικών πιέσεων. Γι' αυτό το λόγο τοποθετούνται πιεζόμετρα στην περιοχή του άξονα και του σώματος του φράγματος. Σε μεγάλα έργα προβλέπεται και η κατασκευή σηράγγων αποστράγγισης κάτω από τον άξονα του φράγματος με σκοπό τον έλεγχο και την εκτόνωση των υδροστατικών πιέσεων.

2. Στη υπόγεια ή εσωτερική διάβρωση. Εμφανίζεται υπό μορφή αναβλύσεων εδαφικού υλικού κοντά στον κατάντη πόδα του φράγματος και προχωρεί προς τα ανάντη κατά μήκος της επιφάνειας έδρασης του φράγματος ή κατά μήκος ασθενούς στρωσιγενούς επιφάνειας του υπεδάφους. Διαμορφώνεται έτσι ένας διάυλος ροής ο οποίος διευρυνόμενος με το χρόνο τείνει να πλησιάσει τον ταμιευτήρα. Με την είσοδο του νερού από τον ταμιευτήρα στο διάυλο, τα φαινόμενα εξελίσσονται ταχύτατα και οδηγούν στην κατάρρευση του φράγματος (π.χ. φράγμα St. Francis, Καλιφόρνια 1926).

Η ασφάλεια έναντι της εσωτερικής διάβρωσης είναι δύσκολο να εκτιμηθεί. Γενικά, έχει διαπιστωθεί από παρατηρήσεις ότι η κατασκευή του φράγματος είναι εξασφαλισμένη από υπόγεια διάβρωση όταν:

$$L \geq C_c \cdot h_{\max} \quad (13)$$

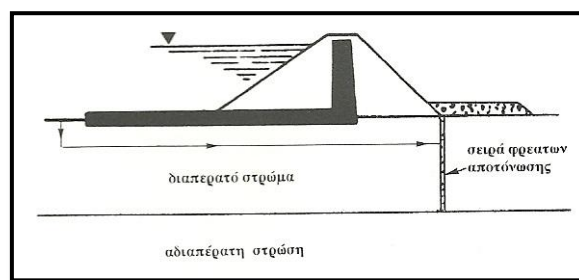
όπου:

$L$  = μήκος της γραμμής ροής

$C_c$  = εμπειρικός συντελεστής ( $C_c = 18$  για λεπτές άμμους και ιλύς,  $C_c = 4$  για αμμοχάλικα).

$h_{\max}$  = μέγιστο υδραυλικό φορτίο

Το μήκος της ροής  $L$  αυξάνει είτε με οριζόντια τοποθέτηση στεγανού διαφράγματος μπροστά από τον ανάντη πόδα του φράγματος, είτε με κατακόρυφο διάφραγμα κάτω από τον άξονα του φράγματος, με σκοπό την ανακοπή των υπόγειων διαφυγών. Όταν το υπέδαφος παρουσιάζει ασυνέχειες μειωμένης αντοχής, τότε στην κατάντη ζώνη θεμελίωσης κατασκευάζονται ανακουφιστικά φρέατα αποτόνωσης (Σχ. 8).



Σχ. 8: Ανακουφιστικά φρέατα (φρέατα αποτόνωσης) κατά Μαραγκό, 1997.

### 2.3.5. Ελεγχόμενες και μη ελεγχόμενες διαφυγές νερού

Σε κάποιες περιπτώσεις το νερό επιτρέπεται να διαφεύγει εκτός του ταμιευτήρα, κατάντη του φράγματος, χωρίς καμία επίπτωση στο φράγμα και στον άνθρωπο. Οι απώλειες αυτές του νερού ονομάζονται **ελεγχόμενες διαφυγές** και συμβαίνουν:

- Όταν υπάρχει πλεόνασμα νερού μέσα στον ταμιευτήρα
- Στα αναρρυθμιστικά φράγματα ημερήσιας λειτουργίας
- Στη διατήρηση της ομαλής απορροής του ποταμού
- Σε αντιπλημμυρικούς ταμιευτήρες.

Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπου το νερό διαρρέεται εκτός του ταμιευτήρα χωρίς την ανθρώπινη θέληση και μπορεί να προκαλέσουν σοβαρό κίνδυνο στο ίδιο το φράγμα. Αυτές ονομάζονται **μη ελεγχόμενες διαφυγές**. Ένα από τα προβλήματα που πιθανό να παρουσιάσουν είναι φαινόμενα εσωτερικής διάβρωσης, δηλαδή να προκληθούν ανεπιθύμητες διασωληνώσεις μεταφοράς σωματιδίων του υποβάθρου, ή του ίδιου φράγματος αν πρόκειται για χωμάτινο φράγμα, με τελικό αποδέκτη την εμφάνιση καθιζήσεων σε τμήματα του

ταμιευτήρα ή του φράγματος. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ο κορεσμός της βραχώμαζας και συνεπώς η αύξηση της υδροστατικής πίεσης των πόρων, η οποία με τη σειρά της θα οδηγήσει σε αστάθεια τα εκατέρωθεν πρανή. Οι υπόγειες ροές προκαλούν και την ανάπτυξη υπόγειων υδροστατικών πιέσεων (δυνάμεις άνωσης) οι οποίες θέτουν σε κίνδυνο τη γενική ευστάθεια του έργου.

Οι διαφυγές νερού από ένα ταμιευτήρα μπορεί να είναι είτε σημειακές (π.χ. από ρήγματα, καταβόθρες) είτε από όλη την έκτασή του, που εκδηλώνονται μέσω των εδαφικών καλυμμάτων (αλούβια, κορήματα, μοραίνες) ή μέσω του βραχώδους υποβάθρου. Οι εδαφικοί σχηματισμοί προϋποθέτουν μια σχέση του ταμιευτήρα με βαθείς υδροφορείς που εξέρχονται στην κατάντη πλευρά του φράγματος. Για παράδειγμα είναι πιθανό να υπάρχουν υπό πίεση υδροφορείς που εκφορτίζονται στα κατάντη, ή να υπάρχει κάποιος σχηματισμός ανάντη ο οποίος λόγω της πολύ υψηλής διαπερατότητά του, να επιτρέπει στο νερό να διαρρέει από τον ταμιευτήρα προς τα κατάντη. Διαρροή νερού έξω από τη λεκάνη κατάκλυσης μπορεί να γίνει και από την παρουσία παλαιών θαμμένων κοιτών οι οποίες είναι πληρωμένες με αδρόκοκκες ποταμοχειμάρριες προσχώσεις ή υλικά παγετώδους προέλευσης. Σ' αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της διαδρομής και των πιθανών σημείων εισόδου και εξόδου των διαφυγών καθώς και η εκτίμηση του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας των υλικών πλήρωσης. Πιθανή είναι και η εμφάνιση λεπτών στρωμάτων αδιαπέρατου εδαφικού υλικού (π.χ. άργιλος) σε υποκείμενα καρστικά πετρώματα, τα οποία λόγω του μικρού τους πάχους να μην αποτρέπουν τη διαρροή νερού εκτός του ταμιευτήρα.

Διαφυγές νερού σε βραχώδες υπόβαθρο είναι δυνατό να προκύψουν σε στενούς αυχένες χαμηλού υψομέτρου με έντονα ρωγματομένο ή πορώδες πέτρωμα. Αυτές οι διαφυγές ευνοούνται όταν η θέση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα είναι ψηλά. Σημαντικός παράγοντας επίσης είναι η εμφάνιση των ρηγμάτων – επωθήσεων τα οποία θεωρητικά αποτελούν αποτρεπτικό παράγοντα για την επιλογή της θέσης του φράγματος, αλλά τα γεωμετρικά τους στοιχεία (διεύθυνση και γωνία κλίσης) και το υλικό πλήρωσης να μην επιτρέπουν διαφυγές νερού. Επίσης, διαρροές νερού μπορεί να προκύψουν στο βραχώδες υπόβαθρο με βάση το βαθμό κερματισμού και αποσάθρωσης της βραχώμαζας. Τέλος, μεγάλες διαφυγές παρουσιάζονται στα συνολικά διαπερατά πετρώματα. Τέτοια πετρώματα είναι τα ανθρακικά (μάρμαρα, δολομίτες, καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι), οι εβαπορίτες (γύψος, ανυδρίτης, αλίτης κ.ά.) και τα ηφαιστειακά.

#### 2.4. Στεγανοποίηση στη θέση θεμελίωσης

Η διερεύνηση της στεγανότητας στη θέση θεμελίωσης του φράγματος αλλά και στον ταμιευτήρα είναι ένα αμιγώς γεωλογικό αντικείμενο το οποίο απαιτεί άριστη γεωλογική γνώση. Η αντιμετώπιση των ανεπιθύμητων διαφυγών νερού επιτυγχάνεται με τα *έργα στεγανοποίησης* (waterproofing). Τα έργα αυτά είναι όλες οι εργασίες που γίνονται στην

επιφάνεια θεμελίωσης και στο υπόβαθρό της, που έχουν σαν στόχο να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες νερού που ενδέχεται να προκύψουν κάτω από το φράγμα και να περιορίσουν την ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού. Η απαίτηση για στεγανοποίηση προκύπτει είτε από την ανάλυση της ροής με τα υπόγεια δίκτυα ροής όταν υπάρχει ομοιογένεια στην περατότητα, είτε με εμπειρικά κριτήρια (π.χ. εκτέλεση δοκιμών Lugeon σε βραχώμαζα) εάν υπάρχει ανομοιογένεια και ασυνέχεια στην κατανομή της περατότητας. Η στεγανοποίηση στην προέκταση του φράγματος, εντός των πρανών, εξαρτάται από τη γεωμετρία της πιεζομετρίας του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Με βάση τα εμπειρικά κριτήρια από τις δοκιμές εισπίεσης νερού (δοκιμές Lugeon) το υπόβαθρο θεμελίωσης θεωρείται στεγανό αν πληρούνται τα εξής κριτήρια:

1. Κριτήριο Lugeon (1933)

- ✓ Ικανοποιητικές απώλειες 1-2 lit/min.m σε πίεση 10 kg/cm<sup>2</sup> για φράγματα μεγαλύτερα από 30m
- ✓ Ικανοποιητικές απώλειες 3 lit/min.m σε πίεση 10 kg/cm<sup>2</sup> για φράγματα μικρότερα από 30m
- ✓ 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 kg/cm<sup>2</sup> (Μαρίνος 1969, Antoine-Barbier 1973).

2. Κριτήριο Heitfeld (1964)

- ✓ Ικανοποιητικές απώλειες 3 lit/min.m για φράγματα ύψους 100m
- ✓ Ικανοποιητικές απώλειες 4 lit/min.m για φράγματα ύψους 50m
- ✓ Ικανοποιητικές απώλειες 4,8 lit/min.m για φράγματα ύψους 20m

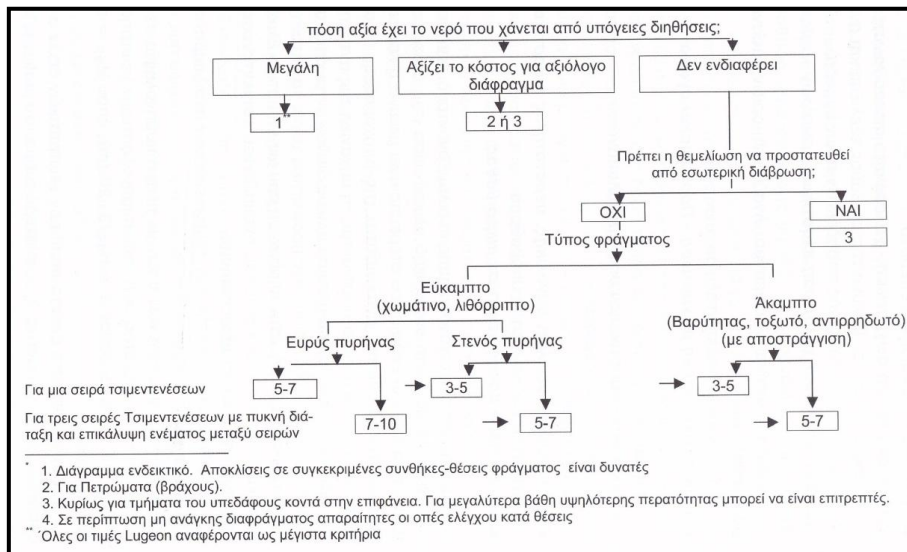
3. Κριτήριο Terzaghi (1929)

- ✓ Ικανοποιητικές απώλειες 5 lit/min.m σε πίεση 10 kg/cm<sup>2</sup>

4. Κριτήριο Houlsby (1976)

- ✓ Ανάλογα με την αξία των απωλειών, του κινδύνου εσωτερικής διάβρωσης, του τύπου φράγματος και του εύρους της υπόγειας κουρτίνας. Στον πίνακα 4 δίνονται οι σχετικές τιμές από τους Π. Μαρίνο και Ν. Καζίλη (1994).

Πίνακας 4: Κριτήρια Lugeon για να χαρακτηριστεί μια υπόγεια κουρτίνα - βραχώμαζα ως ικανοποιητική έναντι απωλειών νερού\* (Από Δημόπουλο, 2007).



#### 2.4.1 Τσιμεντενέσεις στεγανοποίησης

Οι εργασίες στεγανοποίησης στη βραχώμαζα επιτυγχάνονται με τη διοχέτευση μίγματος νερού και τσιμέντου, με πίεση, μέσα στις ανοιχτές ασυνέχειες. Η εισπίεση του μίγματος αυτού γίνεται με τις **τσιμεντενέσεις στεγανοποίησης**. Στη συνέχεια, το υλικό αυτό στερεοποιείται και μειώνει τη διαπερατότητα της βραχώμαζας ενώ παράλληλα τη σταθεροποιεί αυξάνοντας τη μηχανική της αντοχή. Οι τσιμεντενέσεις πραγματοποιούνται από την επιφάνεια θεμελίωσης με συγκεκριμένη διάταξη, κατά μήκος του άξονα του φράγματος, σχηματίζοντας έτσι μια υπόγεια αδιαπέρατη ζώνη στη βραχώμαζα η οποία ονομάζεται **διαφραγματική κουρτίνα τσιμεντενέσεων**. Όταν η βραχώμαζα είναι έντονα ρωγματομένη αλλά η απορρόφηση ενέματος είναι μικρή, τότε οι γεωτρήσεις τσιμεντενέσεων (οπές διαμέτρου 5 – 8cm) διατάσσονται κατά μήκος περισσότερων γραμμών. Σε μεγάλα φράγματα όπου η στεγανοποίηση της βραχώμαζας θα πρέπει να φτάνει σε σχετικά μεγάλο βάθος, τόσο κάτω από την επιφάνεια θεμελίωσης όσο και βαθιά μέσα στα αντερείσματα, οι τσιμεντενέσεις εκτελούνται και μέσα από σήραγγες τσιμεντενέσεων.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η κατασκευή της δεν είναι πάντα υποχρεωτική για τη στεγανοποίηση ενός φράγματος. Για παράδειγμα, στο φράγμα Γαδουρά της Ρόδου η τυπική κουρτίνα τσιμεντενέσεων δε θεωρήθηκε απαραίτητη. Αυτό γιατί η εμφάνιση του φλύσχη με την έντονη παρουσία αργιλικών σχιστολίθων, προσέδιδε στην περιοχή θεμελίωσης μια φυσική στεγανότητα (τιμές συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας  $\approx 10^{-8}$  m/sec κάτω από τα 20m βάθος). Αντίθετα, ενσωματώθηκε ένα εκτεταμένο δίκτυο αποστραγγίσεων, τόσο κάτω από τον πυρήνα του φράγματος με την κατασκευή κατακόρυφων στραγγιστηρίων, όσο και στα αντερείσματα της θέσης του φράγματος με τη διάνοιξη οπών και κουρτινών αποστραγγίσεως. Οι μικρές φακοειδείς εμφανίσεις γύψου, ψαμμίτη και ασβεστόλιθου

κρίθηκαν ως μη επιζήμιες για το φράγμα γιατί ήταν εγκιβωτισμένες μέσα στο αδιαπέρατο περιβάλλον του φλύσχη χωρίς υδραυλική επικοινωνία (Π. Μαρίνος, 1994).

Η εκτέλεση της κουρτίνας τσιμεντενέσεων περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Διάνοιξη των πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων σε επιλεγμένες θέσεις μέχρι το επιθυμητό βάθος.
- Καταγραφή όλων των στοιχείων της βραχόμαζας στα έντυπα των γεωτρητικών οπών.
- Εκτέλεση δοκιμών προσδιορισμού της διαπερατότητας της βραχόμαζας σ' όλο το μήκος του σωλήνα της γεωτρησης και απόδοσή της σε lit/min.m.
- Απεικόνιση της διαπερατότητας με μορφή ιστογράμματος στα έντυπα των γεωτρήσεων.
- Μεταφορά όλων γεωτρήσεων στη μορφολογική τομή του άξονα του φράγματος και οριοθέτηση των διαπερατών ζωνών σε όλο το μήκος και βάθος της τομής.
- Εκτέλεση τσιμεντενέσεων (πρωτεύουσες) σε στάδια μήκους 3 – 5m , συνήθως από κάτω προς τα πάνω, στις ήδη ανοιγμένες οπές των γεωτρήσεων και καταγραφή της απορρόφησης του ενέματος σε kg/m.
- Μεταφορά των δεδομένων απορρόφησης ενέματος με χρωματική μορφή (ή μορφή ιστογραμμάτων) στην παραπάνω μορφολογική τομή.
- Οριοθέτηση των ζωνών με αυξημένη απόληψη ενέματος και παραμένουσα υψηλή διαπερατότητα.
- Εκτέλεση δεύτερης σειράς τσιμεντενέσεων (δευτερεύουσες) και εκ νέου έλεγχος της απορρόφησης ενέματος.
- Εκτέλεση τρίτης και περισσοτέρων σειρών τσιμεντενέσεων αν κριθεί απαραίτητο.
- Εκτέλεση πλάγιων οπών ή αλλιώς γεωτρήσεων ελέγχου, που έχουν σα στόχο να εντοπίσουν περιοχές της βραχόμαζας όπου δεν έφτασε αρκετή ποσότητα ενέματος και η διαπερατότητα εξακολουθεί να είναι μεγάλη.

Η κουρτίνα τσιμεντενέσεων ξεκινά πρώτα με τις πρωτεύουσες οπές (P) που κατασκευάζονται συνήθως ανά 6 - 12m. Ενδιάμεσα σε αυτές κατασκευάζονται οι δευτερεύουσες οπές (S) και αν απαιτηθεί οι τσιμεντενέσεις φτάνουν μέχρι και τριτεύουσες (T), τεταρτεύουσες (Q), σπάνια και πεμπτεύουσες (E), πάντα στην ενδιάμεση απόσταση της προηγούμενης σειράς. Το στεγανό διάφραγμα γίνεται μέχρι το αδιαπέρατο τμήμα του βράχου. Συνήθως, το βάθος των γεωτρήσεων της κουρτίνας δεν ξεπερνά το  $d = H_{\Phi P}/3 + 20$  (m), όπου  $H_{\Phi P}$  το ύψος του φράγματος. Το σύνολο των διεργασιών που περιλαμβάνει τη διάνοιξη, τον καθαρισμό, την έκπλυση, τη δοκιμή εισπίεσης νερού και τη τσιμεντένεση ονομάζεται «στάδιο» και συνήθως έχει μήκος 5m. Μετά τη τσιμεντένεση ενός σταδίου, πραγματοποιείται δοκιμή εισπίεσης νερού (WP - test) με σκοπό να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα του ενέματος. Πριν αρχίσει η δοκιμή αυτή, η οπή ξεπλένεται με καθαρό νερό μέχρις ότου τα επιστρεφόμενα νερά να είναι καθαρά. Έπειτα η οπή γεμίζει με καθαρό νερό και αφήνεται για μέγιστη χρονική περίοδο 30 min. **Κριτήριο για την ολοκλήρωση της**

διαδικασίας τσιμεντένεσης ενός σταδίου είναι η απορρόφηση να μην ξεπερνά τα 2 lit/min.m για 10 min. Δεν επιτρέπεται η τσιμεντένεση σταδίου μιας οπής σε απόσταση μικρότερη από 10 m σε οποιοδήποτε στάδιο παρακείμενης οπής που έχει ενεματωθεί προηγούμενα αν δεν έχουν περάσει τουλάχιστον 24 ώρες από το τέλος της τσιμεντένεσης αυτού του σταδίου (Δημόπουλος, 2007). Στον πίνακα 5 αναφέρονται οι απορροφήσεις ενέματος σε σχέση με το βαθμό στεγανότητας.

Πίνακας 5: Απορρόφηση ενέματος για τους διάφορους βαθμούς στεγανότητας.

| Βαθμός στεγανότητας | Απορρόφηση ενέματος (kg/m) |
|---------------------|----------------------------|
| Πολύ χαμηλός        | 0 – 12,5                   |
| Χαμηλός             | 12,5 – 25                  |
| Μέτρια χαμηλός      | 25 – 50                    |
| Μέτριος             | 50 – 100                   |
| Μέτρια υψηλός       | 100 – 200                  |
| Υψηλός              | 200 – 400                  |
| Πολύ υψηλός         | >400                       |

Τις περισσότερες φορές οι οπές τσιμεντενέσεων είναι κατακόρυφες. Προτιμάται όμως να γίνονται με μια μικρή απόκλιση ως προς την κατακόρυφο κατά  $15^{\circ}$  –  $20^{\circ}$ . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται το μήκος των γραμμών ροής μεταξύ της κουρτίνας και των αποστραγγιστικών οπών και έτσι ελαττώνεται η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής, η πιθανότητα υδραυλικής υποσκαφής και οι ποσότητες διαρροής υπόγειου νερού. Ο ρόλος του στεγανού διαφράγματος είναι η στεγανοποίηση του υποβάθρου θεμελίωσης του φράγματος και η αύξηση της αντοχής των διατμημένων ζωνών. Παράλληλα με αυτά, επιτυγχάνουμε και την τεχνητή μείωση της υδραυλικής κλίσης (i), άρα αύξηση του συντελεστή ασφαλείας F.S. αφού αυξάνουμε το μήκος της υπόγειας ροής του νερού κάτω από το φράγμα (βλ. σχέση 12). Με την προϋπόθεση ότι η διαφορά στην πιεζομετρία ( $\Delta\Phi$ ) δεν μεταβάλλεται, αφού η μείωσή της θα σημαίνει ταυτόχρονα και μείωση του αποθηκευμένου όγκου νερό στον ταμιευτήρα, ο μόνος εφικτός παράγοντας για τη μείωση της υδραυλικής κλίσης είναι η αύξηση του μήκους (L) της ροής του υπόγειου νερού. Τα διαφράγματα συνοδεύονται σε αρκετές περιπτώσεις και από έργα αποστράγγισης του νερού κάτω από το φράγμα προκειμένου να αποφευχθεί η ανάπτυξη υπόγειων υδροστατικών πιέσεων.

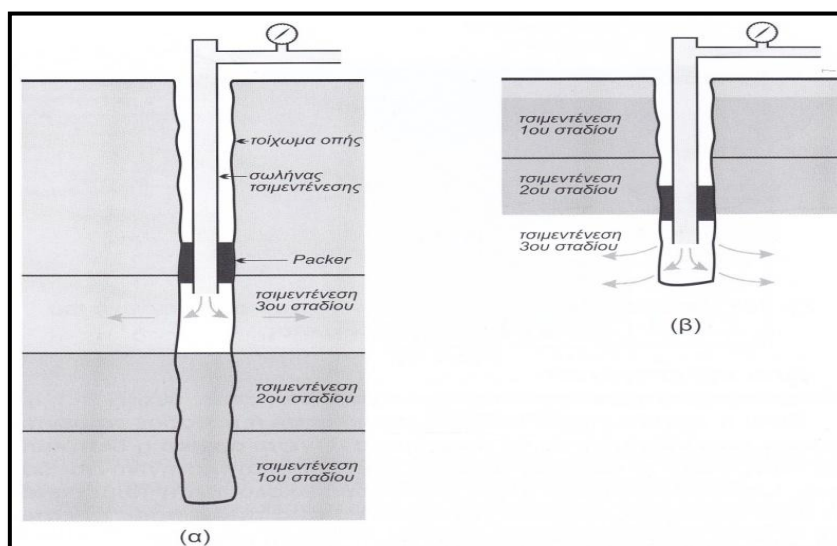
### 2.4.2. Τάπητας τσιμεντενέσεων

Οι οπές των τσιμεντενέσεων δεν ανοίγονται μόνο κάτω από τον άξονα του φράγματος για τη στεγανοποίηση κατά μήκος του, αλλά και κάτω από την επιφάνεια έδρασης του αργιλικού πυρήνα στα χωμάτινα φράγματα και ονομάζονται **τσιμεντενέσεις τάπητα**. Χαρακτηριστικό του τάπητα στεγανοποίησης είναι το μικρό βάθος του (μέχρι 7 – 10m) και καταλαμβάνει πλάτος ίσο με το πλάτος έδρασης του πυρήνα. Για να γίνει αυτό, ανοίγεται ένα δίκτυο γεωτρήσεων σε κάναβο με διαστάσεις 3x3m ή 1,5x3m. Εκτός από τη στεγανοποίηση της ζώνης του αργιλικού πυρήνα, στοχεύουν στη σταθεροποίηση των ασθενών περιοχών της και αποτρέπουν το νερό του ταμιευτήρα να έρθει σε επαφή με τη βάση του αργιλικού πυρήνα για να μην παρουσιαστούν φαινόμενα διάβρωσης και διασωλήνωσης.

### 2.4.3. Μέθοδοι τσιμεντενέσεων

Ανάλογα με την κατάσταση της βραχώμαζας που εντοπίζεται, εφαρμόζονται και διαφορετικές μέθοδοι τσιμεντενέσεων. Ο Δημόπουλος (2008) αναφέρει τις εξής μεθόδους:

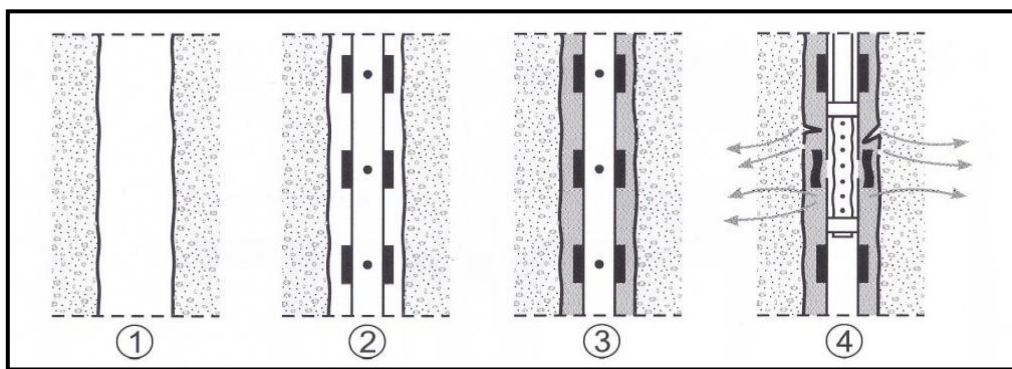
- Τσιμεντενέσεις με μονωτή (packer): Είναι η συνηθέστερη μέθοδος που εφαρμόζεται σε βραχώμαζα. Αρχικά γίνεται η διάτρηση της οπής μέχρι το επιθυμητό βάθος. Κατά τη διάτρηση γίνονται δοκιμές Lugeon, σε στάδια 3 – 5m. Η τσιμεντένεση γίνεται από κάτω προς τα πάνω ή από πάνω προς τα κάτω με τη χρήση packer (Σχ. 9). Η διαδικασία από πάνω προς τα κάτω εφαρμόζεται σε κακής ποιότητας βραχώμαζα όπου γίνεται αρχικά η διάτρηση, η τσιμεντένεση και ξανά διάτρηση του ήδη τσιμεντοποιημένου τμήματος για την πρόοδο της διαδικασίας.



Σχ. 9: Εκτέλεση τσιμεντενέσεων. α) από κάτω προς τα πάνω. β) από πάνω προς τα κάτω.

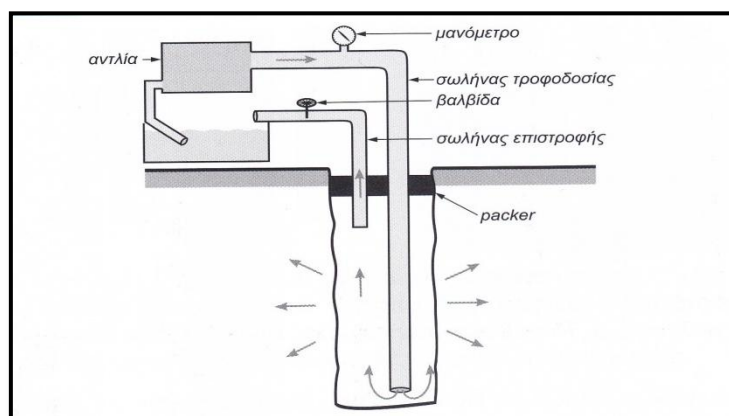
- Τσιμεντενέσεις με σωλήνες που φέρουν μανσέτες: Εφαρμόζεται σε χαλαρές χονδρόκοκκες αποθέσεις όπου απαιτείται η συνεχής σωλήνωση της γεώτρησης για τη

συγκράτηση των τοιχωμάτων της (Σχ. 10). Στη σωληνωμένη γεώτρηση εισάγεται σωλήνας PVC, ο οποίος φέρει δακτυλίους από 6 έως 8 οπές που καλύπτονται υδατοστεγώς με ελαστική μανσέτα σε αποστάσεις 0,5 – 1,0m. Στη συνέχεια, ο κενός χώρος ανάμεσα στη σωλήνωση της γεώτρησης και του σωλήνα PVC γεμίζει με ειδικό ένεμα μικρής αντοχής με ταυτόχρονη εξαγωγή της περιφραγματικής σωλήνωσης. Όταν πήξει αυτό το ένεμα σχηματίζεται ένας προσωρινός προστατευτικός μανδύας που στηρίζει τα τοιχώματα της γεώτρησης. Ακολούθως, η τσιμεντένεση γίνεται μέσα από το σωλήνα PVC με τη χρήση απλού ή διπλού packer. Στο ένεμα εφαρμόζεται πίεση που ξεπερνά την αντοχή του μανδύα, σπρώχνει την ελαστική μανσέτα, σπάει το μανδύα και από τις οπές του φτάνει στο περιβάλλον πέτρωμα.



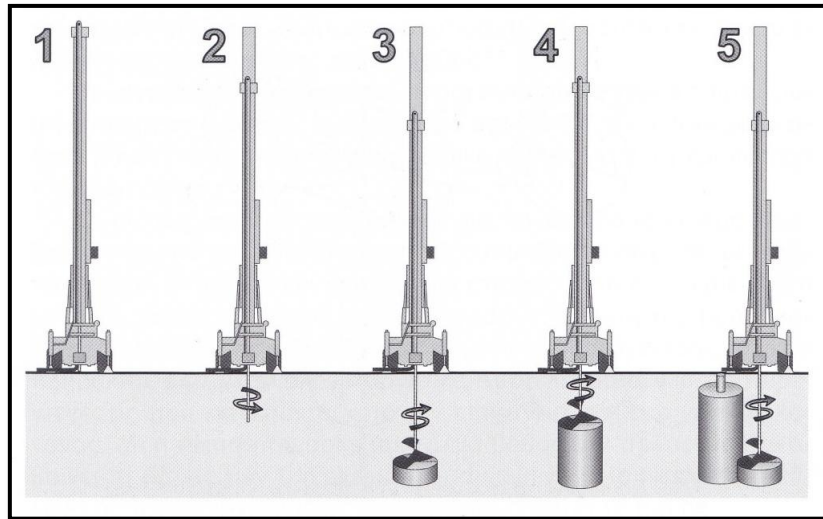
Σχ. 10: Τσιμεντένεση με σωλήνες με μανσέτες. 1) διάτρηση με ταυτόχρονη σωλήνωση της οπής. 2) τοποθέτηση του σωλήνα με τις μανσέτες. 3) τοποθέτηση του ενέματος του μανδύα με ταυτόχρονη εξαγωγή της σωλήνωσης. 4) τσιμεντένεση με διπλό packer.

➤ Τσιμεντενέσεις με ανακυκλούμενο ένεμα: Εφαρμόζεται σε έντονα κερματισμένη βραχώμαζα και σε χονδρόκοκκες αποθέσεις με συνοχή η οποία εξασφαλίζει σταθερά τοιχώματα στη γεώτρηση. Η τσιμεντένεση λαμβάνει χώρα σε όλο το μήκος της οπής. Το επιστρεφόμενο ένεμα οδηγείται σε μια τάφρο στην οποία επικάθονται τα φερτά υλικά και ακολούθως επαναχρησιμοποιείται (Σχ. 11).



Σχ. 11 Τσιμεντένεση σ' ένα στάδιο με ανακυκλούμενο ένεμα.

➤ **Jet grouting:** Εφαρμόζεται σε χαλαρές αποθέσεις, κυρίως λεπτόκοκκης άμμου και ιλύος. Η οπή ανοίγεται μέχρι το επιθυμητό βάθος και στη συνέχεια εισπνέζεται ένεμα με μεγάλη πίεση από κάτω προς τα πάνω από ένα ειδικό ακροφύσιο. Αυτό επιφέρει σπάσιμο της δομής του εδάφους και το ένεμα ανακατεύεται με την άμμο σχηματίζοντας μετά την πήξη του στήλες με διάμετρο 0,6 – 1,0m. Με διαδοχικές οπές πάνω σε προσανατολισμένο άξονα και σε κατάλληλες αποστάσεις επιτυγχάνουμε την κατασκευή ενός διαφραγματικού τοίχου (Σχ. 12).



Σχ. 12: Jet Grouting. Σχηματική παράσταση από Jessberger.

#### 2.4.4. Καθορισμός μέγιστης πίεσης

Καθοριστικό στοιχείο για την ομαλή κατασκευή της κουρτίνας τσιμεντενέσεων είναι ο προσδιορισμός της μέγιστης επιτρεπόμενης πίεσης που πρέπει εφαρμόζεται για την είσοδο του ενέματος μέσα στις ασυνέχειες της βραχώμαζας. Οι τσιμεντενέσεις χρησιμοποιούνται βασικά για την ελάττωση της διαπερατότητας και πολλές φορές για να αυξήσουν την αντοχή του υποβάθρου θεμελίωσης. Κατά συνέπεια η εφαρμογή πολύ υψηλών πιέσεων, μεγαλύτερων από την αντοχή της βραχώμαζας, μπορεί να εξασθενήσουν παραπάνω τη βραχώμαζα και να προκαλέσουν τη δημιουργία νέων ή το άνοιγμα των προϋπαρχόντων ρωγμών. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «*claquage*». Γενικά, η μέγιστη πίεση που ασκείται σε ένα βάθος δεν πρέπει να ξεπερνά το βάρος των υπερκείμενων, αυξημένη κατά ένα συντελεστή ανάλογα με την κατάσταση της βραχώμαζας σε αυτό το βάθος.

Οι παράγοντες που επιδρούν στον καθορισμό της μέγιστης επιτρεπτής πίεσης είναι:

- Το βάρος των υπερκείμενων στρωμάτων
- Το είδος του βράχου, η αντοχή και γενικά τα φυσικά χαρακτηριστικά του
- Η πυκνότητα (ιξώδες) του ενέματος
- Αν έχουν γίνει ή όχι προηγουμένως τσιμεντενέσεις στην περιοχή
- Η θέση του υδροφόρου ορίζοντα

Διάφοροι ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την εκτίμηση της επιτρεπόμενης μέγιστης πίεσης κατά τη διάρκεια των τσιμεντενέσεων. Μεγάλη σημασία έχει ο προσδιορισμός της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και γι' αυτό λαμβάνεται πάντα υπόψη για τον υπολογισμό της μέγιστης πίεσης.

🚧 Οι Creager, Justin και Hinds (1945) έδωσαν τις εξής διαπιστώσεις για τη μέγιστη πίεση:

- Για ανθεκτικό στρωματωμένο πέτρωμα:

$$P = h + 1,33h \left( \frac{h}{900} + \frac{h}{20} \right) \quad (14)$$

- Για ανθεκτικό στρωματωμένο πέτρωμα που έχει ενεματωθεί πάνω από τη ζώνη στην οποία εκτελείται η τσιμεντένεση:

$$P = h + 1,33h \left( \frac{h}{400} + \frac{3h}{40} \right) \quad (15)$$

- Για συμπαγή βράχο:

$$P = h + 1,33h \left( \frac{h}{100} + \frac{3h}{20} \right) \quad (16)$$

όπου:

$P$  = πίεση εκφρασμένη σε ύψος στήλης νερού

$h$  = βάθος όπου γίνεται η τσιμεντένεση (m).

🚧 Ο Zaruba (1962) δίνει τις σχέσεις (17, 18, 19) και προτείνει διάφορες τιμές για βραχώδη και συνεκτικά πετρώματα (πίνακας 6).

$$P = k \cdot \gamma_t \cdot H \quad (17)$$

$$P = 0,31H + 0,02H^2, \text{ για βραχώμαζα με σχεδόν κατακόρυφες διακλάσεις.} \quad (18)$$

$$P = 0,25H + 0,05H^2, \text{ για στρώματα με οριζόντιες διακλάσεις ή διακλάσεις μικρής γωνιάς κλίσης.} \quad (19)$$

όπου:

$P$  = η πίεση του ενέματος εκφρασμένη σε ύψος στήλης νερού.

$k$  = συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας της βραχώμαζας που έχει υπολογιστεί από δοκιμές Lugeon.

$\gamma_t$  = το φαινόμενο βάρος του πετρώματος που υπέρκειται της θέσης εισπίεσης.

$H$  = το βάθος εισπίεσης του ενέματος (m).

🚧 Ο Heitfeld (1965) προτείνει τη σχέση:

$$P_{\max} = \alpha \cdot \gamma_t + a(c_1 + c_2) \text{ (t/m}^2\text{)} \quad (20)$$

όπου:

$a$  = το μέσο βάθος της εισπνεζόμενης περιοχής (m)

$\gamma_t$  = το ειδικό βάρος της βραχώμαζας (t/m<sup>3</sup>)

$c_1, c_2$  = συντελεστές που εξαρτώνται από την ανάπτυξη και τη διάταξη των διακλάσεων στην περιοχή. Για μεγάλο συντελεστή ρωγμάτωσης και  $c_2=0$ , ο  $c_1$  παίρνει τιμές από 2 – 4, ενώ για μικρό συντελεστή ρωγμάτωσης παίρνει τιμές 4 – 6. Σύμφωνα με τον Heitfeld η μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση προκύπτει για  $c_2 = 2$  και  $c_1 = 6$ .

🔧 Ο Grundy υποστηρίζει ότι η εφαρμοζόμενη πίεση πρέπει να αντιστοιχεί στο διπλάσιο του βάρους του υπερκείμενου υλικού στην περιοχή εκτελέσεως των τσιμεντενέσεων.

Πίνακας 6: Προτεινόμενες τιμές και σχέσεις για τον υπολογισμό της μέγιστης ενεματικής πίεσης (Zaruba, 1962) (Από Δημόπουλο, 2008).

| Βάθος (m) | Βραχώμαζα                |                               | Συνεκτικά πετρώματα      |                               |
|-----------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
|           | Επιτρεπόμενη πίεση (atm) | Σχέση                         | Επιτρεπόμενη Πίεση (atm) | Σχέση                         |
| 10        | 5,1                      | Περίπου $2,0\gamma_t \cdot H$ | 3                        | Περίπου $1,2\gamma_t \cdot H$ |
| 20        | 14,2                     | Περίπου $3,0\gamma_t \cdot H$ | 7                        | Περίπου $1,4\gamma_t \cdot H$ |
| 30        | 27,3                     | Περίπου $3,8\gamma_t \cdot H$ | 12                       | Περίπου $1,6\gamma_t \cdot H$ |
| 40        | 44,4                     | Περίπου $4,6\gamma_t \cdot H$ | 18                       | Περίπου $1,8\gamma_t \cdot H$ |
| 50        | 65,5                     | Περίπου $5,4\gamma_t \cdot H$ | 25                       | Περίπου $2,1\gamma_t \cdot H$ |

#### 2.4.5. Χαρακτηριστικά ενέματος

Τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση του εισπνεζόμενου ενέματος είναι το νερό, το τσιμέντο και ο μπετονίτης, ενώ σε ειδικές περιπτώσεις γίνεται και πρόσμιξή τους με άλλα πρόσθετα. Το νερό πρέπει να είναι φρέσκο, καθαρό, με ουδέτερο pH και απαλλαγμένο από άλατα, οργανικά υλικά και άλλα λεπτόκοκκα υλικά. Το τσιμέντο είναι συνήθως τύπου Portland και πρέπει να υπάρχει σε αρκετή ποσότητα στο εργοτάξιο. Ο συγκεκριμένος τύπος τσιμέντου είναι προϊόν εκμετάλλευσης των βωξιτών και έχει υψηλή

περιεκτικότητα σε  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  και χαμηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο, ιχνοστοιχεία, αλκάλια και  $\text{MgO}$ . Είναι ένα σημαντικό υλικό τόσο για τσιμεντενέσεις σταθεροποίησης όσο και για στεγανοποίησης. Άλλοι τύποι τσιμέντου που χρησιμοποιούνται είναι οι slag cement, resin gypsum cement και lymnite cement. Ο μπεντονίτης είναι ένα ορυκτό της αργίλου. Τα δύο είδη μπεντονίτη είναι ο νατριούχος που διογκώνεται μέχρι 6 φορές όταν ανακατεντεί με νερό, και ο ασβεστούχος που δεν διογκώνεται. Χαρακτηριστικό του μπεντονίτη είναι οι θιζοτροπικές του ιδιότητες που του προσδίδουν μεγάλη ρευστότητα όταν κινείται, ενώ όταν μένει ακίνητος σταθεροποιείται. Ο μπεντονίτης προστίθεται σε ποσοστό 1 – 4% του βάρους του τσιμέντου και δεν πρέπει ποτέ να ξεπερνά το 8% γιατί τότε θα έχει δυσμενή επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά του στερεοποιημένου τσιμεντενέματος. Ο ρόλος του είναι να σταθεροποιεί το ένεμα, δηλαδή να επιβραδύνει την καθίζηση του αιωρούμενου τσιμέντου στο νερό. Προσμίξεις μπεντονίτη μέχρι 2% αυξάνουν τη διεισδυτικότητα του ενέματος. Τα συνηθέστερα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται είναι η υδρύαλος, η άμμος, οι ποζολλάνες, η άργιλος και τα χημικά ενέματα όπως το πυριτικό νάτριο ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) το οποίο χρησιμοποιείται τόσο στους χαλαρούς σχηματισμούς όσο και στα βραχώδη πετρώματα με πολύ λεπτές όμως ρωγμές.

Οι τσιμεντενέσεις ξεκινάνε με το αραιότερο μίγμα το οποίο δεν είναι πιο αραιό από 1:2 (τσιμέντο : νερό). Ανάλογα με το ρυθμό απορρόφησης και τη συνολική ποσότητα ενέματος που απορροφάται, το μίγμα πυκνώνεται προοδευτικά. Η απόσταση που μπορεί να διανύσει το ένεμα από την οπή εξαρτάται από το ιξώδες του, την πίεση και την ανάπτυξη των ασυνεχειών. Σε περίπτωση που αποδειχθεί ανέφικτη η επίτευξη της απαιτούμενης πίεσης για ένα συγκεκριμένο στάδιο λόγω του εύρους και της εμμονής των ασυνεχειών της βραχώμαζας, τότε μετά την άντληση  $3\text{m}^3$  πυκνού ενέματος θα χρησιμοποιηθεί τσιμεντοκονίαμα με άμμο και προοδευτική πύκνωσή του. Όταν όμως η απορρόφηση σε ένα τμήμα είναι υπερβολική (πιθανό λόγω καρστικοποίησης), η τσιμεντένεση γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο το packer τοποθετείται στο μέσο της οπής και γίνεται η τσιμεντένεση στο μισό μήκος της με υψηλού ιξώδους ένεμα και ρυθμιζόμενου χρόνου έναρξης της πήξης, με σκοπό να φράξουν οι μεγάλες ρωγμές. Το υψηλό ιξώδες επιτυγχάνεται με την προσθήκη ιπτάμενης τέφρας και υδρύαλου στο ένεμα. Έπειτα, στο δεύτερο στάδιο, η τσιμεντένεση γίνεται στην υπόλοιπη οπή με ένεμα χωρίς προσμίξεις με σκοπό να φράξει και τις λεπτές ρωγμές. Η τέφρα είναι ένα συστατικό που μπορεί να αντικαταστήσει κατά 50% το τσιμέντο χωρίς να μειώνονται οι αντοχές και η στεγανότητα του τελικού προϊόντος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

#### 3.1. Γενικά στοιχεία

Η διαπερατότητα της βραχώμαζας εκφράζεται με τον συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας  $k$ . Ο υπολογισμός του πραγματοποιείται με επί τόπου δοκιμές (in situ testing) και με εργαστηριακές μεθόδους, ή έμμεσα από τα συστήματα των ασυνεχειών της βραχώμαζας. Το μειονέκτημα των επί τόπου δοκιμών είναι η σημειακή κάλυψη, ενώ η ακρίβεια των δεδομένων που λαμβάνονται από αυτές εξαρτάται από την ομοιογένεια ή μη, του εξεταζόμενου τμήματος. Οι επί τόπου δοκιμές προσδιορισμού της διαπερατότητας των γεωλογικών σχηματισμών που έχουν ευρεία χρήση στις μελέτες κατασκευής τεχνικών έργων, είναι:

- Οι δοκιμές σταθερού φορτίου - Lefranc (constant head test)
- Οι δοκιμές μεταβλητού φορτίου – Maag (falling head test)
- Οι δοκιμές εισπίεσης νερού – Lugeon (water pressure test)

Η καλύτερη προσέγγιση της τιμής του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας γίνεται με δοκιμαστικές αντλήσεις (pumping tests) σε υδρογεωτρήσεις. Η άντληση γίνεται σε μια κύρια γεώτρηση όπου παρατηρείται η πτώση του κώνου στάθμης του υπόγειου νερού και ο χρόνος επαναφοράς στο αρχικό της επίπεδο μετά τη διακοπή της άντλησης. Έπειτα, με τη χρήση διαφόρων εξισώσεων (πρότυπο Dupuit, Theis) υπολογίζεται ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας σε ικανοποιητικό βαθμό. Η μέθοδος αυτή είναι πιο αποτελεσματική και αντιπροσωπευτική για το λόγο ότι οι τιμές διαπερατότητας που υπολογίζονται αναφέρονται σε μεγαλύτερο όγκο του υποβάθρου και δεν είναι σημειακές παρατηρήσεις όπως για παράδειγμα οι δοκιμές Lugeon. Παρόλα αυτά, οι δοκιμές άντλησης δεν ενδείκνυται να χρησιμοποιούνται για γεωτεχνικούς σκοπούς λόγω του ότι είναι δαπανηρές και χρονοβόρες μέθοδοι και λόγω της αδυναμίας να εκτιμηθεί η υδραυλική αγωγιμότητα πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Οι πιο κοινές επί τόπου δοκιμές που γίνονται για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας είναι οι στατικές δοκιμές, δηλαδή οι δοκιμές Lefranc, Maag και Lugeon. Οι πρώτες δύο εφαρμόζονται αποκλειστικά σε εδαφικούς σχηματισμούς, ενώ η δοκιμή Lugeon εκτελείται μόνο σε βραχώδεις σχηματισμούς. Οι Lefranc και Maag ονομάζονται και δοκιμές ανοιχτού άκρου γιατί εκτελούνται διαμέσου του ανοιχτού άκρου της σωλήνωσης της γεώτρησης. Οι δοκιμές Lugeon αναφέρονται βιβλιογραφικά και σαν WP- ή WD- tests καθώς και σαν packer tests. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι έχουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως η ταχύτητα εκτέλεσης, η συχνή επανάληψη κατά τη διάρκεια της διάρτησης και σχετικά αξιόπιστα αποτελέσματα.

### 3.2. Υπολογισμός του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας από τα συστήματα ασυνεχειών της βραχώμαζας

Σύμφωνα με τον Louis (1969), όταν η βραχώμαζα χαρακτηρίζεται από μια οικογένεια παράλληλων, επίπεδων και λείων ασυνεχειών (Σχ. 13) και η ροή του υπόγειου νερού είναι γραμμική, ακολουθεί δηλαδή το νόμο του Darcy, τότε ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k = \frac{gf^3}{12\nu b} \text{ (cm/sec)} \quad (21)$$

όπου:

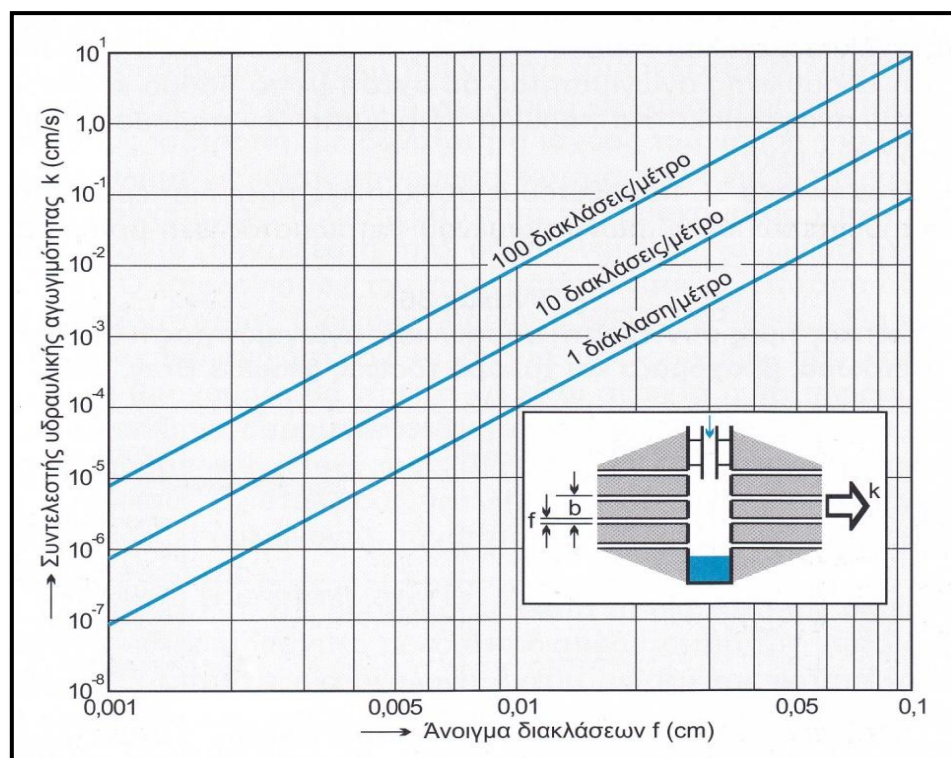
$k$  = συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας.

$g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας.

$f$  = άνοιγμα ρωγμής (cm).

$\nu$  = συντελεστής κινηματικού ιξώδους ( $0,0101 \text{ cm}^2/\text{sec}$  για καθαρό νερό  $20^\circ\text{C}$ ).

$b$  = μέση απόσταση των ρωγμών του συστήματος.



Σχ. 13: Επίδραση ανοίγματος και συχνότητας των διακλάσεων στο συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας ( $k$ ) κατά τη διεύθυνση μιας οικογένειας λείων, παράλληλων διακλάσεων σε βραχώμαζα (Hoek & Bray, 1981) (Από Δημόπουλο, 2008).

Στην περίπτωση που οι ασυνέχειες εμφανίζονται με τραχείες επιφάνειες ή η υπόγεια ροή δεν είναι γραμμική, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει σημαντικά σφάλματα. Επίσης, σφάλματα

παρουσιάζονται και όταν υπάρχει υλικό πλήρωσης μέσα στις ασυνέχειες, με αποτέλεσμα η διαπερατότητα της βραχόμαζας να εξαρτάται από το υλικό αυτό και να δίνεται από τη σχέση:

$$k = \frac{f}{b} k_f + k_r \text{ (cm/sec)} \quad (22)$$

όπου:

$k$  = συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας

$f$  = άνοιγμα ρωγμής (cm)

$b$  = μέση απόσταση των ρωγμών του συστήματος

$k_f$  = συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας του υλικού πλήρωσης της ασυνέχειας

$k_r$  = συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας του άρρηκτου πετρώματος.

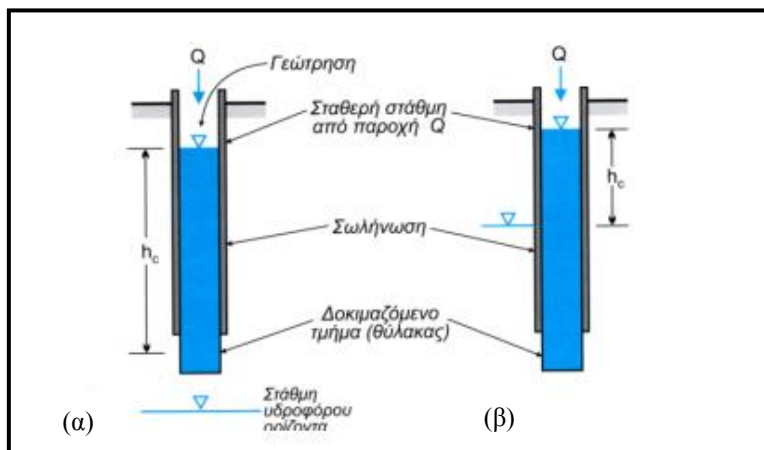
Τις περισσότερες φορές ισχύει  $k_r=0$  σε βραχόμαζα που έχει υποστεί την οριστική της διαγένεση. Ένα πλεονέκτημα που έχει ο υπολογισμός του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας από τα συστήματα ασυνεχειών, είναι ότι με βάση τις τιμές που υπολογίζονται για κάθε οικογένεια ασυνεχειών, προσδιορίζεται και ο προσανατολισμός του ευνοϊκότερου συστήματος υπόγειας αποστράγγισης της βραχόμαζας. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο όταν απαιτούνται έργα αποστράγγισης ή έργα στεγανοποίησης της βραχόμαζας γιατί ουσιαστικά μας δίνει τη διεύθυνση προς την οποία θα κινηθεί το υπόγειο νερό.

### 3.3. Δοκιμές σταθερού φορτίου – Lefranc

Η δοκιμή σταθερού φορτίου χρησιμοποιείται στην περίπτωση των αδρόκοκκων εδαφικών υλικών, χαλαρών δηλαδή υλικών ή με πολύ μικρή συνοχή και με αυξημένη διαπερατότητα. Βασική αρχή της μεθόδου αυτής, είναι ότι η στάθμη του νερού μέσα στη γεώτρηση παραμένει αυστηρά σταθερή σε επιθυμητό ύψος με τη διοχέτευση νερού, μετρώντας παράλληλα τη παροχή νερού σε καθορισμένο χρονικό διάστημα.

Η δοκιμή πραγματοποιείται κατά την πρόοδο της δειγματοληπτικής γεώτρησης. Η γεώτρηση είναι σωληνωμένη ολόκληρη για τη συγκράτηση των τοιχωμάτων της από καταπτώσεις μέχρι ενός ορισμένου βάθους, εκτός από το κάτω μέρος της γεωτρητικής οπής (θύλακας) διαμέσου του οποίου γίνεται η έκχυση του νερού μέσα στο έδαφος (Σχ. 14). Στη συνέχεια, αφού καθαριστεί από τα υλικά διάτρησης, γεμίζει με καθαρό νερό και έπειτα ξεκινά η δοκιμή. Κατά τη δοκιμή προστίθεται συνεχώς ποσότητα νερού  $Q$  με τη βοήθεια αντλίας, σε μετρούμενο χρόνο  $t$ . Η παροχή ρυθμίζεται έτσι ώστε η στάθμη μέσα στη γεώτρηση να μην μεταβάλλεται. Μ' αυτό τον τρόπο, η εξασκούμενη υδροστατική πίεση από τη στήλη νερού μπορεί να διατηρηθεί σταθερή κατά ορισμένο χρόνο, στη διάρκεια του οποίου μετρούνται οι απώλειες νερού από το θύλακα. Γενικά, προς αποφυγή απωλειών φορτίου, το ύψος στήλης νερού δεν πρέπει να παίρνει μεγάλες τιμές, ενώ για μεγαλύτερη ακρίβεια πρέπει να εκτελούνται τουλάχιστον τρεις δοκιμές σε κάθε δοκιμαζόμενο τμήμα με διαφορετική παροχή και ύψος νερού. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η πιθανή

άνοδος λεπτόκοκκης άμμου ή αργιλικού υλικού μέσα στο θύλακα και στις σωληνώσεις, με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται η εικόνα που παίρνουμε για την διαπερατότητα.



Σχ. 14: Δοκιμή σταθερού φορτίου (Lefranc). α) Δοκιμή πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. β) Δοκιμή κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (Από Δημόπουλο, 2008).

Με βάση τα στοιχεία που λαμβάνονται από τις μετρήσεις, ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k = \frac{Q}{ch_c} \quad (23)$$

όπου:

$k$  = συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας

$Q$  = παροχή του νερού ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )

$h_c$  = ύψος φορτίζουσας στήλης νερού (cm)

$c$  = συντελεστής σχετιζόμενος με τη γεωμετρία του δοκιμαζόμενου τμήματος (θύλακας).

Συνήθως παίρνει τιμές:

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

$c = 2d$  όταν η δοκιμή γίνεται μεταξύ διαπερατού και αδιαπέρατου στρώματος.

$c = \frac{2\pi L}{\ln(2L/D)}$ , όπου  $D$  η διάμετρος της γεώτρησης και  $L$  το μήκος του ασωλήνωτου τμήματος της γεώτρησης, για  $L > 4D$ .

$$c = \frac{1}{2\pi D \sqrt{L/D + 0,25}}, \text{ για } L < 4D \quad \text{ή} \quad c = \frac{2\pi D \sqrt{1 - \frac{L^2}{D^2}}}{\tau\omicron\xi\eta\mu\sqrt{1 - \frac{L^2}{D^2}}}, \text{ για } L < D$$

### 3.4. Δοκιμές μεταβλητού φορτίου – Maag

Η δοκιμή μεταβλητού φορτίου είναι μια παραλλαγή της δοκιμής Lefranc και ενδείκνυται για λεπτόκοκκα εδάφη (ιλύος και αργίλου), δηλαδή για εδάφη που παρουσιάζουν χαμηλή διαπερατότητα. Βασική αρχή της μεθόδου είναι η μέτρηση της πτώση στάθμης μέσα στη σωληνωμένη γεώτρηση σε συνάρτηση με το χρόνο.

Η δοκιμή λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της διάτρησης της γεώτρησης, η οποία σωληνώνεται σε όλο της το βάθος, εκτός από ένα τμήμα στο κάτω της μέρος το οποίο αποτελεί το δοκιμαζόμενο τμήμα. Σ' αυτή τη δοκιμή, παροχετεύεται καθαρό νερό στη γεώτρηση ώστε η στάθμη να ανέβει σε ένα επιθυμητό επίπεδο ( $h_1$ ) και έπειτα μετρίεται ο χρόνος που χρειάζεται για να κατέβει η νέα στάθμη που δημιουργήθηκε σε μια πιο χαμηλή θέση ( $h_2$ ) (Σχ. 15). Σύμφωνα με τον Κουμαντάκη, αν το πρόσθετο υδραυλικό φορτίο σε σχέση με την υδροστατική στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα εντοπίζεται σε ένα ύψος άνω των 2m, οι μετρήσεις χρόνου – στάθμης πραγματοποιούνται κάθε φορά που η στάθμη κατέρχεται κατά 10cm περίπου. Αν όμως το φορτίο είναι σε ύψος λιγότερο από 1m, τότε οι πτώσεις στάθμης καταγράφονται κάθε 2,5 – 5cm. Όταν η δοκιμή γίνεται κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, σαν επίπεδο αναφοράς λαμβάνεται αυτή η υδροστατική στάθμη. Οι μετρήσεις συνεχίζονται μέχρι το φορτίο να μην είναι περισσότερο από το 1/5 του αρχικού. Για μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων και μείωση των σφαλμάτων, συνήθως εκτελούνται τρεις δοκιμές για το ίδιο δοκιμαζόμενο τμήμα με διαφορετική παροχή και υδροστατική στάθμη. Όπως γίνεται αντιληπτό, τα αποτελέσματα που εξάγονται τόσο στη δοκιμή Maag όσο και στη δοκιμή Lefranc, εξαρτώνται από την καλή ανάγνωση της υδροστατικής στάθμης μέσα στη γεώτρηση σε συνάρτηση με το χρόνο. Ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας ( $k$ ) για σωληνωμένη γεώτρηση σε όλο της το μήκος, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k = \frac{r}{4h_m} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} (m/sec) \quad (24)$$

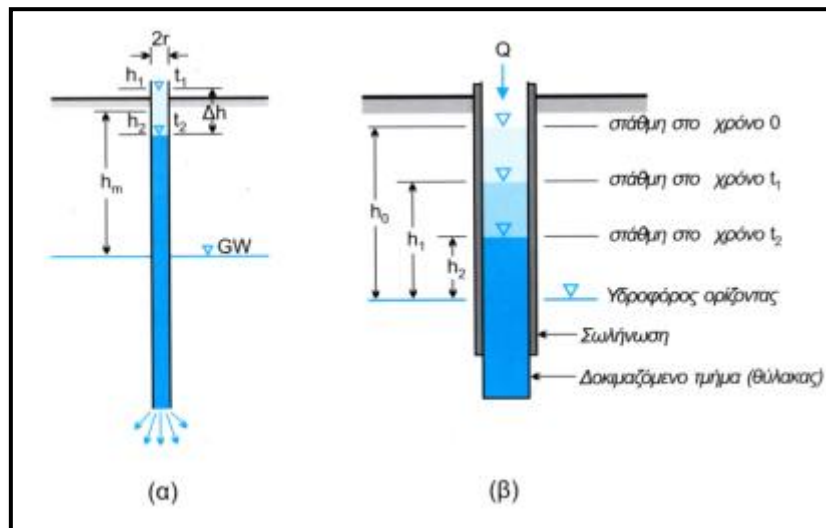
όπου:

$r$  = η ακτίνα της σωληνωμένης γεώτρησης (m).

$h_m$  = η μέση στάθμη του νερού από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (m).

$\Delta h$  = η διαφορά της στάθμης του νερού στη γεώτρηση κατά την έναρξη ( $h_1$ ) και στο τέλος της δοκιμής ( $h_2$ ) (m).

$\Delta t$  = χρόνος δοκιμής (sec).



Σχ. 15: Δοκιμή μεταβλητού φορτίου (Maag). α) Οριακές συνθήκες δοκιμής μεταβλητού φορτίου σε πλήρως σωληνωμένη γεώτρηση. β) Δοκιμή μεταβλητού φορτίου σε μερικώς σωληνωμένη γεώτρηση (Από Δημόπουλο, 2008).

Για μερικώς σωληνωμένη γεώτρηση δίνεται η σχέση:

$$k = \frac{A}{c(t_2 - t_1)} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \text{ (m/sec)} \quad (25)$$

όπου:

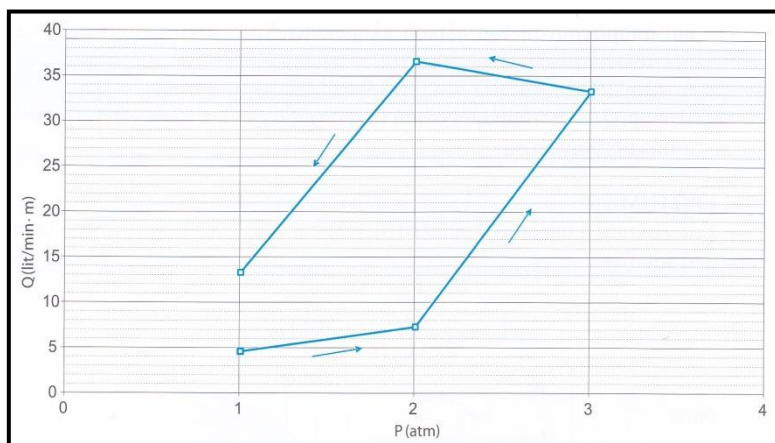
$$A = \frac{1}{4} \pi d^2 \text{ η διατομή του σωλήνα με διάμετρο } d$$

$c$  = συντελεστής σχετιζόμενος με τη γεωμετρία του δοκιμαζόμενου τμήματος. Παίρνει τιμές όμοιες με αυτές που αναφέρονται στη δοκιμή Lefranc.

### 3.5. Δοκιμές εισπίεσης νερού – Lugeon

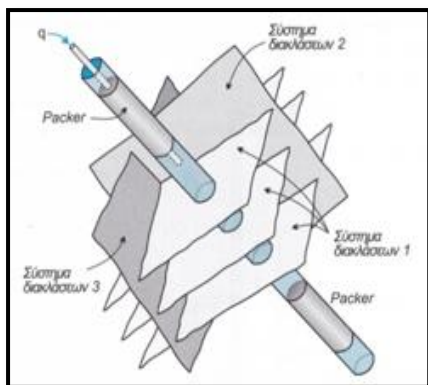
Η δοκιμή πήρε το όνομά της από τον Γάλλο ερευνητή Maurice Lugeon (1933) και χρησιμοποιείται αποκλειστικά σε βραχώδεις σχηματισμούς στους οποίους δεν χρειάζεται σωλήνωση η γεώτρηση. Σκοπός της είναι η ποσοτική εκτίμηση της διαπερατότητας της βραχώμαζας είτε σε μονάδες Lugeon είτε με τον υπολογισμό του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας ( $k$ ) προκειμένου να εντοπιστούν οι ζώνες υψηλής διαπερατότητας και μέχρι σε πιο βάθος εκτείνονται. Αυτό αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα στην εκτίμηση των διαρροών νερού κάτω από ένα φράγμα και κατ' επέκταση στον καθορισμό των μέτρων για την αποφυγή των διαφυγών. Η αρχή στην οποία στηρίζεται η μέθοδος είναι η μέτρηση της απορροφούμενης ποσότητας εισπιεσμένου νερού σε συνάρτηση με το χρόνο, από το δοκιμαζόμενο τμήμα καθορισμένου μήκους και η μεταβολή της στις διάφορες βαθμίδες πίεσεως, που εφαρμόζονται αρχικά με αύξουσα σειρά και στη συνέχεια με φθίνουσα σειρά. Το τελικό αποτέλεσμα που λαμβάνουμε για κάθε δοκιμαζόμενο τμήμα προκύπτει από την

κατασκευή διαγραμμάτων  $Q=f(P)$ , όπου  $Q$  οι απώλειες του νερού εκφρασμένες σε  $\text{lit}/\text{min.m}$ , και  $P$  (atm) η ολική εφαρμοζόμενη πίεση (Σχ. 16). Τα διαγράμματα αυτά, εκτός από τη συμβατική προσέγγιση στην αριθμητική τιμή της διαπερατότητας (σε μορφή συντελεστή  $k$  ή/και σε μορφή μονάδων Lugeon), μας βοηθάνε να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά του βραχώδους υποβάθρου σε συνθήκες αυξομείωσης του υδραυλικού φορτίου, (π.χ. σε συνθήκες μεταβολής της στάθμης του ταμιευτήρα ενός φράγματος), από τη μορφή και τη σχετική θέση του κλάδου ανόδου και καθόδου της πίεσης του σχετικού διαγράμματος.



Σχ. 16: Διάγραμμα παροχής  $Q$  - ολική πίεση  $P$ .

Η δοκιμή γίνεται είτε κατά την πρόοδο της γεώτρησης σε στάδια των 3 – 5m, από τον πυθμένα της και προς τα πάνω με τη χρήση απλού μονωτή (παρέμβυσμα - packer) είτε με την ολοκλήρωση της γεώτρησης από τον πυθμένα προς την επιφάνεια, με τη χρήση διπλού packer. Ο ρόλος του μονωτή είναι να απομονώνει το δοκιμαζόμενο τμήμα και συγχρόνως να



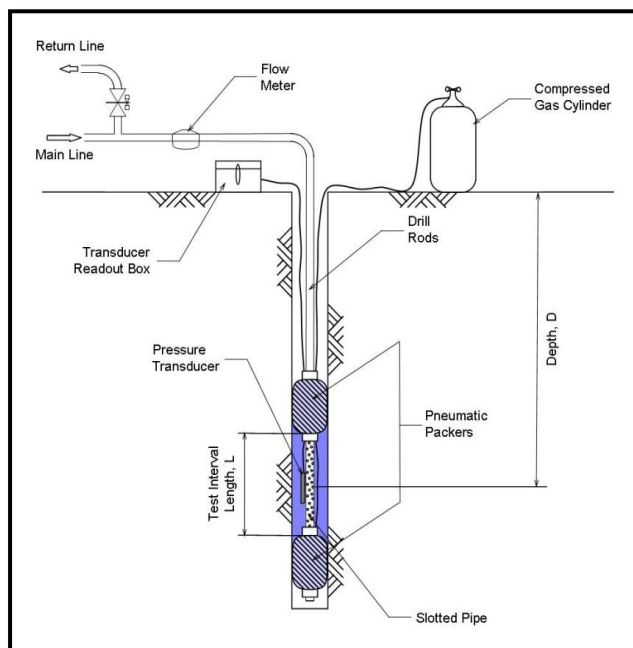
Σχ. 17: Εκτέλεση δοκιμής Lugeon με εφαρμογή διπλού packer σε βραχώμαζα που διατέμενεται από τρία συστήματα διακλάσεων (Hoek & Bray, 1981).

φράζει (υδραυλικά ή μηχανικά) υδατοστεγώς την ασωλήνωτη γεώτρηση στο επιθυμητό βάθος, έτσι ώστε κατά τη διάρκεια της δοκιμής να μην προκύπτουν ανεπιθύμητες διαφυγές νερού (Σχ.17). Η κατασκευή του μονωτή είναι ζωτικής σημασίας εάν είναι να αποφεύγονται οι απώλειες νερού κατά τη δοκιμή και εννοείται ότι όσο μεγαλύτερος είναι τόσο πιο αποτελεσματική θα είναι η δοκιμή. Όταν τα packer τοποθετηθούν στο επιθυμητό βάθος, φουσκώνονται με πιεσμένο αέριο που παρέχεται από μια φιάλη αζώτου στην κεφαλή της γεώτρησης. Το μήκος κάθε μονωτή πρέπει να είναι τουλάχιστον πέντε

φορές μεγαλύτερο από τη διάμετρο της γεώτρησης όταν αυτός διαστέλλεται. Οι μονωτές στηρίζονται πάνω στη στήλη διάτρησης η οποία χρησιμοποιείται και για την παροχή του υπό πίεση νερού στο δοκιμαζόμενο τμήμα.

Με τη χρήση το απλού μονωτή αποφεύγονται οι απώλειες νερού προς τα κάτω, ενώ οι πιθανές απώλειες που μπορεί να προκύψουν προς τα πάνω καταγράφονται, υπολογίζονται και λαμβάνονται υπόψη για την εκτίμηση της διαπερατότητας της βραχώμαζας. Το σφάλμα της διαρροής νερού μέσω των ασυνεχειών της βραχώμαζας, από πλευρικό κλάδο ροής, είναι δυνατό να απαλειφθεί με μια τοπική τσιμεντένωση στο ύψος της γεώτρησης πάνω από το μονωτή (Κουμαντάκης, 1979). Η εκτέλεση της δοκιμής με διπλό μονωτή επιφέρει πιθανές διαρροές νερού και προς τα πάνω και προς τα κάτω, γεγονός που μειώνει την ακρίβεια των μετρήσεων γιατί οι απώλειες προς τα κάτω είναι πρακτικά αδύνατο να υπολογιστούν.

Σε αντίθεση με τις δοκιμές που εκτελούνται σε εδαφικά υλικά (δοκιμές Lefranc και Maag), στη δοκιμή Lugeon το νερό εισπνέζεται στο δοκιμαζόμενο τμήμα με τη χρήση αντλίας για καθορισμένο χρονικό διάστημα (5, 10 ή 15 min). Η διαβίβαση του νερού γίνεται με φυγόκεντρη αντλία παροχής  $Q = 55 - 60 \text{ m}^3/\text{h}$  με συνολική καταθλιπτική ικανότητα 50m. Το νερό πρέπει να είναι καθαρό από σωματίδια ή άλλες φερτές ύλες γιατί προκαλούν έμφραξη των διόδων κυκλοφορίας του, κυρίως σε βραχώμαζες με πολύ μικρό εύρος ασυνεχειών. Με τη βοήθεια υδρομέτρου και μανομέτρου μετριέται αντίστοιχα η προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού από τη βραχώμαζα εκφρασμένη σε lit/min και η αντίστοιχη εφαρμοζόμενη πίεση που ασκείται στο νερό εκφρασμένη σε ύψος στήλης νερού και σε atm ( $1 \text{ atm} \approx 1 \text{ kg/cm}^2 = 10 \text{ m}$  ύψος στήλης νερού). Συνεπώς, για κάθε σταθερή πίεση που εφαρμόζεται, μετριέται η ποσότητα νερού που απορροφάται από τις ασυνέχειες της βραχώμαζας. Στο σχήμα 18 διακρίνεται μια τυπική διάταξη των οργάνων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της δοκιμής Lugeon. Η ολική ποσότητα που μπορεί να απορροφήσει ένα υπό δοκιμή τμήμα της



Σχ. 18: Διάταξη δοκιμής Lugeon.

βραχώμαζας δεν πρέπει να υπερβαίνει τη μέγιστη ικανότητα της αντλίας. Αν αυτό συμβεί, προκύπτει ότι η διαπερατότητα στο συγκεκριμένο τμήμα είναι πάρα πολύ υψηλή.

### 3.5.1. Ο παράγοντας πίεση κατά την εκτέλεση της δοκιμής

Πριν την έναρξη της δοκιμής ορίζεται η μέγιστη μανομετρική πίεση ( $P_{max}$ ). Αυτή επιλέγεται έτσι ώστε να μην υπερβαίνει την ελάχιστη κύρια τάση (confinement stress  $\sigma_3$ ) που αναμένεται στο βάθος όπου διεξάγεται η δοκιμή, για να αποφευχθούν φαινόμενα υδραυλικής θραύσης (hydraulic fracturing) ή υδραυλικής διεύρυνσης (hydraulic jacking). Γενικότερα, η μέγιστη πίεση εξαρτάται από τις συνθήκες υδραυλικής πίεσης που θα επικρατούν στο υπέδαφος μετά την κατασκευή και λειτουργία του προβλεπόμενου τεχνικού έργου. Ως γενικός κανόνας, η μέγιστη πίεση συνήθως καθορίζεται από τη σχέση 26, όπου το  $D$  ισοδυναμεί με το ελάχιστο ύψος των υπερκείμενων στρωμάτων.

$$P_{max} = D \cdot \frac{1 \text{ psi}}{ft} \quad (26)$$

Η δοκιμή διεξάγεται σε πέντε στάδια με συγκεκριμένη ποσότητα εισπιεζόμενου νερού σε κάθε στάδιο. Στον πίνακα 7 διακρίνονται τα διάφορα στάδια πίεσης για κάθε δοκιμαζόμενο τμήμα. Το πρώτο στάδιο πραγματοποιείται με τη χαμηλότερη πίεση η οποία αυξάνεται βαθμιαία (π.χ. 2, 4, 6 atm) από την κεφαλή της γεώτρησης σε κάθε μεταγενέστερο στάδιο, μέχρι να φτάσουμε στη μέγιστη πίεση. Μόλις επιτευχθεί η  $P_{max}$ , η πίεση μειώνεται εξίσου βαθμιαία ανάλογα με τα στάδια ανόδου. Ο κύκλος αυτός της αύξησης και μείωσης της πίεσης κατά τη διάρκεια της δοκιμής περιγράφεται και ως «βρόγχος πίεσης». Σε κάθε στάδιο η πίεση διατηρείται σταθερή και μετράται η ποσότητα του νερού που απορροφάται σε χρονικό διάστημα πέντε λεπτών. Εάν ο όγκος του νερού που μετρήθηκε για δύο διαδοχικές περιόδους των 5 min διαφέρει περισσότερο από 10%, τότε η μέτρηση πρέπει να ξαναγίνει για ακόμα 5 min, πριν η πίεση αλλάξει. Η μέγιστη πίεση συνήθως δεν ξεπερνά τις 10 atm.

Πίνακας 7: Μέγεθος τυπικής μανομετρικής πίεσης για κάθε στάδιο δοκιμής.

| Στάδιο δοκιμής | Περιγραφή | Βαθμίδα πίεσης                               |
|----------------|-----------|----------------------------------------------|
| 1 <sup>ο</sup> | Χαμηλή    | $1/3 \times P_{max}$ ή $0,50 \times P_{max}$ |
| 2 <sup>ο</sup> | Μέση      | $2/3 \times P_{max}$ ή $0,75 \times P_{max}$ |
| 3 <sup>ο</sup> | Μέγιστη   | $P_{max}$                                    |
| 4 <sup>ο</sup> | Μέση      | $2/3 \times P_{max}$ ή $0,75 \times P_{max}$ |
| 5 <sup>ο</sup> | Χαμηλή    | $1/3 \times P_{max}$ ή $0,50 \times P_{max}$ |

Σε τμήματα της βραχώδους που παρουσιάζουν υψηλή διαπερατότητα και εφαρμόζονται μεγάλες κλίμακες πιέσεων, η διαπερατότητα εκφράζεται σε τιμές Lugeon (1U.L. = 1lit/min.m σε πίεση 10 kg/cm<sup>2</sup> διάρκειας 10 min). Ο Lugeon (1933) στην τυποποιημένη δοκιμή που πρότεινε, καθόρισε την πίεση σε 10 atm με βάση την οποία ορίστηκε και η μονάδα Lugeon (U.L.). Στην πράξη όμως χρησιμοποιούνται πολύ χαμηλότερες πιέσεις, οπότε προτάθηκε από

τον Houlsby (1976) η μονάδα Lugeon για κάθε βαθμίδα πίεσης να υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$U.L. = \frac{Q(\text{lit} / \text{min} / \text{m})}{P_{\text{ολ}}(\text{bar})} \times 10(\text{bar}) \quad (27)$$

Κάτω από ιδανικές συνθήκες, δηλαδή σε ομογενές και ισότροπο μέσο, μια μονάδα Lugeon αντιστοιχεί σε συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας  $k = 1,3 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$  (Fell et al., 2005).

Συνεπώς, ο υπολογισμός του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας  $k$  με βάση τις δοκιμές Lugeon δίνεται από τη σχέση:

$$k = \frac{Q}{2\pi LH} \cdot \ln \frac{2L}{D} \quad \text{για } L > 4D \quad (\text{m/sec}) \quad (28)$$

όπου:

$Q$  = η παροχή νερού στην οπή της γεώτρησης ( $\text{m}^3/\text{sec}$ )

$L$  = το μήκος του δοκιμαζόμενου τμήματος (m)

$H$  = η ολική πίεση εκφρασμένη σε ύψος στήλης νερού ( $H = P_{\text{ολ}} \times 10\text{m}$ )

$D$  = η διάμετρος της γεώτρησης (m).

|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| ΔΕΛΤΙΟ ΔΟΚΙΜΗΣ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΚΑΤΑ LUGEON    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ΕΡΓΟ: ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΙΜΝΟΔΕΞΑΜΕΝΗΣ  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ΓΕΩΤΡΗΣΗ: Γ-2                           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ΒΑΘΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ: 24,70 m                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Τμήμα υπό δοκιμή: 19,70 24,70 L= 5,00 m |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

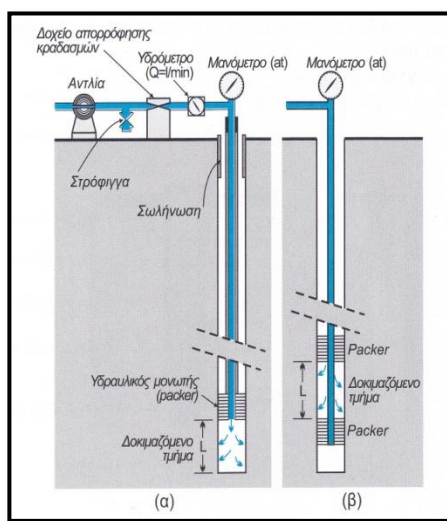
Σχ. 19: Δεδομένα και προσδιοριζόμενοι παράμετροι στον υπολογισμό του συντελεστή  $k$  από τη δοκιμή Lugeon.

Η πίεση που εφαρμόζεται στον τύπο για τον υπολογισμό του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας είναι η ολική και όχι η μανομετρική πίεση που ασκείται από την κεφαλή της γεώτρησης. Η πραγματική ολική πίεση ( $P_{\text{ολ}}$ ) που ασκείται στα τοιχώματα του δοκιμαζόμενου τμήματος προκύπτει από τον τύπο:

$$P_{o\lambda} = P_1 + P_2 - P_3 (\text{atm}) \quad (29)$$

Τη μανομετρική πίεση  $P_1$  τη μετράμε απευθείας από το μανόμετρο κατά την εκτέλεση της δοκιμής αφού πρώτα σταθεροποιηθεί ο δείκτης στην επιθυμητή βαθμίδα πίεσης. Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο τρόπο συνδεσμολογίας μεταξύ υδρομέτρου, αντλίας και μανομέτρου. Το μανόμετρο δεν πρέπει ποτέ να τοποθετείται ανάμεσα στα υπόλοιπα δύο γιατί η ένδειξή του δεν θα ανταποκρίνεται στην πίεση που εφαρμόζεται. Μια τυπική διάταξη των οργάνων μέτρησης δίνεται στο σχήμα 20.

Η υδροστατική πίεση  $P_2$  εκφράζει την πίεση της στήλης του νερού από το μανόμετρο μέχρι το μέσο του δοκιμαζόμενου τμήματος αν αυτό βρίσκεται πάνω από τη στάθμη του υπόγειου νερού, διαφορετικά μέχρι τη στάθμη των υδροφόρων στρωμάτων. Ποσοτικά η



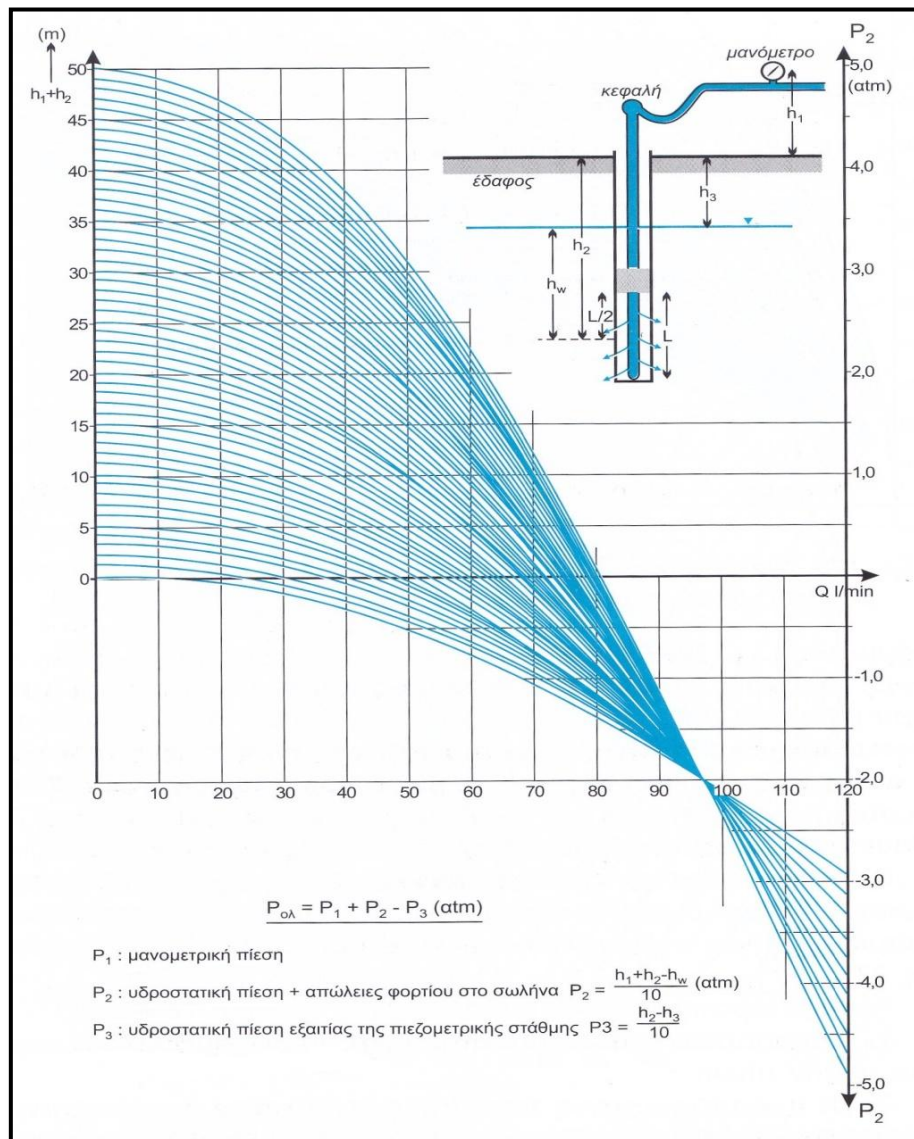
Σχ. 20: Σκαρίφημα της διαδικασίας εκτέλεσης δοκιμών Lugeon. α) με απλό packer, β) με διπλό packer.

πίεση αυτή μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση  $P_2 = h/10$  όπου  $h$  η στήλη του νερού σε m. Για παράδειγμα, μια δοκιμή σε βάθος 10 μέτρων επιφέρει αύξηση της εφαρμοζόμενης πίεσης κατά 1 atm. Είναι πολύ σημαντικό να εκτιμηθεί σωστά η ύπαρξη ή μη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα γιατί πιθανό σφάλμα θα δώσει σοβαρή απόκλιση της υδροστατικής πίεσης και κατ' επέκταση του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας. Πηγή σφάλματος μπορεί να είναι το νερό που παραμένει εντός της γεώτρησης από τη λειτουργία του γεωτρήπανου και δεν μεταβάλλεται σημαντικά εντός 30 – 60 min από το τέλος της διάτρησης. Επίσης, σφάλμα μπορεί να προκαλέσει και το νερό που

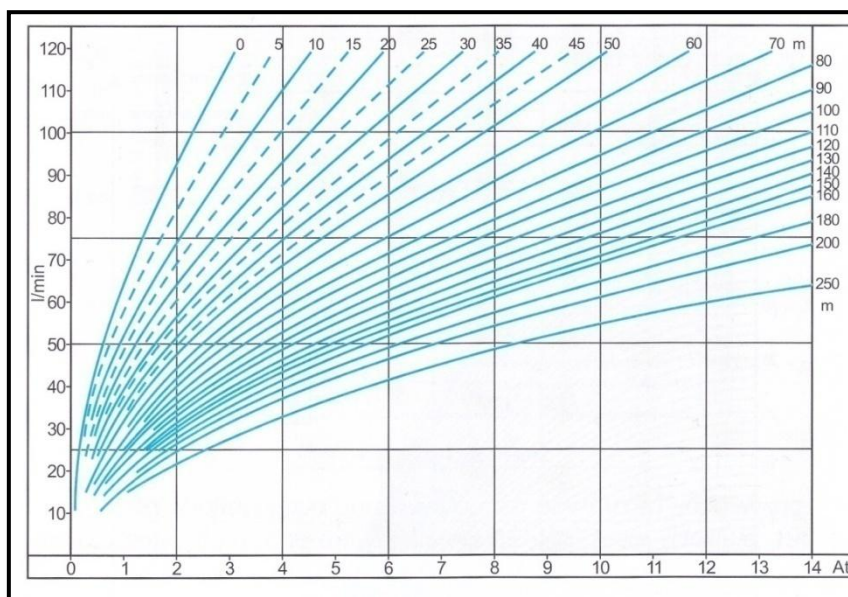
μπορεί να διαφεύγει από το δοκιμαζόμενο τμήμα προς τα πάνω με αποτέλεσμα να υποδεικνύει τη στάθμη υψηλότερα απ' ότι πραγματικά είναι. Πολλές φορές η υδροστατική πίεση  $P_2$  εκφράζει ταυτόχρονα και τις απώλειες φορτίου ( $P_3$ ) όταν αυτές είναι ασήμαντες. Στην περίπτωση αυτή, η τιμή της υπολογίζεται με τη βοήθεια νομογράμματος (Σχ. 21).

Η πίεση  $P_3$  αντιστοιχεί στο σύνολο των απωλειών φορτίου στη στήλη του εξοπλισμού που επιφέρουν τη μείωση της τελικής ασκούμενης πίεσης. Οι απώλειες οφείλονται στις τριβές του εισπιεζόμενου νερού μέσα στις σωληνώσεις (ελαστικός σωλήνας, στελέχη) και τοπικών απωλειών σε απότομη διεύρυνση ή στένωση των σωλήνων. Οι απώλειες αυξάνουν εκθετικά με την αύξηση της ποσότητας του νερού που διαπερνά τις σωληνώσεις ανά μονάδα χρόνου. Επίσης αυξάνονται γενικά με την παλαιότητα και τη φθορά του εξοπλισμού και κυρίως των σωληνώσεων, συνδέσμων κλπ. Προσεγγιστικά, παρατηρείται αύξηση κατά 30% περίπου των απωλειών σε σχέση με τις απώλειες που ισχύουν σε καινούργιους σωλήνες. Σε μικρά βάθη οι απώλειες είναι ασήμαντες και πολλές φορές συνυπολογίζονται με την

υδροστατική πίεση. Όμως σε μεγάλα βάθη είναι σημαντικές και πρέπει να υπολογίζονται. Οι διορθώσεις από τις απώλειες φορτίου δίνονται συνήθως με διάφορα τυποποιημένα διαγράμματα – νομογράμματα (Σχ. 22), η χρήση των οποίων πρέπει να γίνεται με επιφύλαξη. Συνήθως η σχεδίαση των καμπυλών απωλειών φορτίου γίνεται πειραματικά για το συγκεκριμένο εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί. Σήμερα υπάρχουν ειδικά συστήματα μέτρησης της πίεσης του νερού που εφαρμόζεται κατευθείαν στο δοκιμαζόμενο τμήμα και με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται όλες οι σχετικές διορθώσεις (Σχ. 18).



Σχ. 21: Νομόγραμμα υπολογισμού της πίεσης  $P_2$  κατά τη διάρκεια εκτέλεσης δοκιμών Lugeon Lugeon



Σχ. 22: Νομόγραμμα υπολογισμού των απωλειών φορτίου κατά την εκτέλεση δοκιμών Lugeon με στελέχη 55mm (Μαρίνος, 1985).

Για να έχουμε συγκρίσιμες τιμές σε διάφορες θέσεις και καταστάσεις της βραχώμαζας, θα πρέπει το νερό να εισπνέζεται σε αυτήν με όσο το δυνατόν ενιαία πίεση η οποία εξαρτάται από τη μανομετρική πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης, το βάθος εισπίεσης (στατική πίεση, απώλειες τριβών), τη στάθμη του υπόγειου νερού και το μήκος του δοκιμαζόμενου τμήματος (Δημόπουλος, 2008). Γενικά, η υδραυλική αγωγιμότητα που υπολογίζεται κατά τη δοκιμή Lugeon σχετίζεται με τον αριθμό, το εύρος και το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών, αλλά και με τη συμπεριφορά αυτών κατά τη διάρκεια της δοκιμής, δηλαδή αν ξεπλένονται, αποφράσσονται, διαστέλλονται κλπ.

### 3.5.2. Πηγές σφαλμάτων και τρόποι αντιμετώπισής τους

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τόσο η χρήση απλού μονωτή όσο και η χρήση διπλού μονωτή έχουν το ρίσκο παρουσίας σφαλμάτων, με τη διπλή μόνωση να εμφανίζει τα μεγαλύτερα. Ο Heitfeld (1965) κατά την εκτέλεση των δοκιμών Lugeon σε διαφορετικές ποιότητες βραχώμαζας παρατήρησε ορισμένες πηγές σφαλμάτων οι οποίες δίνονται στον πίνακα 8. Ακόμη, σε ορισμένες θέσεις οι προσροφούμενες ποσότητες νερού δεν αυξάνονται γραμμικά με την πίεση, φαινόμενο το οποίο αποδίδεται σε:

1. Υπέρμετρη αύξηση της πρόσληψης νερού σε σχέση με την αύξηση της πίεσης, λόγω:
  - 1.1. Μεγέθυνσης των δρόμων του νερού που υπήρχαν εξαιτίας της παραμόρφωσης της βραχώμαζας με αυξανόμενη πίεση.
  - 1.2. Δημιουργίας νέων δρόμων ροής εξαιτίας νέων θραύσεων.
  - 1.3. Φαινόμενων διάβρωσης της βραχώμαζας - ανάπτυξης των μικροδομών και των τοιχωμάτων τους από τα λεπτά συστατικά τα οποία είχαν γεμίσει.

Πίνακας 8: Πηγές σφαλμάτων που παρατηρούνται κατά την εκτέλεση των δοκιμών Lugeon και τρόποι εξουδετέρωσής τους (Heitfeld, 1965).

| Μόνωση          | Πηγές σφαλμάτων                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Τρόποι εξουδετέρωσης                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I. Διπλή μόνωση | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Διαρροή δια της επιφάνειας επαφής των μονωτών με τις πλευρές της γεώτρησης προς τα πάνω και προς τα κάτω.</li> <li>2. Διαρροή του νερού, μέσω των κατατιμήσεων της βραχώμαζας πάνω και κάτω από το εισπιεζόμενο τμήμα (δια πλευρικού κλάδου ροής).</li> <li>3. Εξάρτηση της εφαρμοζόμενης πίεσης στο υπό δοκιμή τμήμα της γεώτρησης από το βάθος που γίνεται η δοκιμή και από τη στάθμη του υπόγειου νερού.</li> <li>4. Εξάρτηση της εφαρμοζόμενης πίεσης στο υπό δοκιμή τμήμα της γεώτρησης από την ποσότητα του νερού που χωράει ο σωλήνας και από τη διατομή του.</li> </ol> | <p>Για το 1. α. Αύξηση της επιφάνειας των μονωτών, χρησιμοποίηση περισσότερων μονωτών, χρησιμοποίηση στεγανωτικών σωμάτων που ενεργούν υδραυλικά και εφαρμόζουν καλύτερα στις πλευρές της γεώτρησης.</p> <p>β. Υπολογισμός της ποσότητας του νερού που διαρρέει με:</p> <p>β(1) Μέτρηση της ποσότητας που ρέει από την κορυφή της γεώτρησης.</p> <p>β(2) Μέτρηση της μεταβολής του ύψους του νερού στη γεώτρηση.</p> <p>β(3) Ηλεκτρική διάταξη μέτρησης.</p> <p>γ. Εκλογή της κατάλληλης θέσης τοποθέτησης των μονωτών με βάση προηγηθείσες τηλεσκοπήσεις.</p> <p>Για το 3. και 4. Ελάττωση της πίεσης.</p> |
| II. Απλή μόνωση | <ol style="list-style-type: none"> <li>5. Διαρροή δια της επιφάνειας επαφής του μονωτή με τις πλευρές της γεώτρησης προς τα πάνω.</li> <li>6. Εξάρτηση της εφαρμοζόμενης πίεσης στο υπό δοκιμή τμήμα της γεώτρησης από το βάθος που γίνεται η δοκιμή, από τη στάθμη του υπόγειου νερού, από τη διάμετρο του σωλήνα και από την ποσότητα του εισπιεζόμενου νερού.</li> <li>7. Περιορισμός της προσλαμβανόμενης από τη βραχώμαζα ποσότητας νερού λόγω βάθους και απόδοσης της αντλίας.</li> <li>8. Διαφυγή του νερού στη βραχώμαζα πάνω και κάτω από το εισπιεζόμενο τμήμα</li> </ol>                                       | <p>Για το 1. α. Προσπάθεια ελάττωσης της διαρροής σύμφωνα με τα I/1α και γ.</p> <p>β. Προσπάθεια υπολογισμού της ποσότητας του διαρρέοντος νερού σύμφωνα με το I/1β.</p> <p>γ. Σε μεμονωμένες περιπτώσεις υπολογιστικές δυνατότητες ελάττωσης του σφάλματος.</p> <p>Για το 2. Ελάττωση της πίεσης</p> <p>Για το 3. Συνδυασμός απλής και διπλής μόνωσης.</p> <p>Για το 4. Η διαφυγή απαλείφεται υπολογιστικά.</p>                                                                                                                                                                                            |

2. Μικρότερη αύξηση της πρόσληψης νερού σε σχέση με την αύξηση της πίεσης, λόγω:
  - 2.1. Μετάβασης από ελασματοειδείς σε στροβιλώδεις καταστάσεις ροής με αυξημένη πίεση.
  - 2.2. Ιζηματογένεσης των λεπτών συστατικών στοιχείων στο περιβάλλον της γεώτρησης.

Σύμφωνα με το Heitfeld, όταν οι προσροφούμενες ποσότητες νερού που προκύπτουν με αύξηση της πίεσης δεν αντιστοιχούν σε αυτές που προκύπτουν κατά το στάδιο της ελάττωσής της, αυτό οφείλεται σε φαινόμενα θραύσης όταν η πίεση φτάνει τα 6 – 10 bar.

### 3.5.3. Η ερμηνεία των δοκιμών κατά Houlby

Ο Houlby (1976) στην εργασία του για την ερμηνεία των δοκιμών εισπίεσης νερού, πρότεινε οι αντιπροσωπευτικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας να επιλέγονται με βάση τη συμπεριφορά των τιμών Lugeon που υπολογίζονται σε κάθε στάδιο πίεσης. Ο ίδιος κατέταξε την τυπική συμπεριφορά που παρατηρείται κατά τις δοκιμές ως εξής:

- ❖ Γραμμική ροή (Laminar flow): Η υδραυλική αγωγιμότητα της βραχόμαζας είναι ανεξάρτητη της πίεσης του νερού που χρησιμοποιείται. Αυτή η συμπεριφορά είναι χαρακτηριστική για βραχώδεις σχηματισμούς με χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα όπου η ταχύτητα ροής είναι σχετικά μικρή ( $U.L. < 4$ ).
- ❖ Τυρβώδης ροή (Turbulent flow): Η υδραυλική αγωγιμότητα της βραχόμαζας μειώνεται καθώς η πίεση του νερού αυξάνεται. Αυτή η συμπεριφορά είναι χαρακτηριστική σε βραχώδεις σχηματισμούς που παρουσιάζουν εν μέρει ανοικτές έως μέτρια ανοικτές ασυνέχειες.
- ❖ Ροή διαστολής (Dilation): Παρατηρείται παρόμοια υδραυλική αγωγιμότητα στη χαμηλή και μέση πίεση, ενώ μια πολύ μεγαλύτερη τιμή καταγράφεται στη μέγιστη πίεση. Αυτή η συμπεριφορά, που παρατηρείται μερικές φορές και στις μεσαίες πιέσεις, συμβαίνει όταν η πίεση που εφαρμόζεται στο νερό είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη κύρια τάση του πετρώματος, προκαλώντας μια προσωρινή υδραυλική διεύρυνση των ρωγμών της βραχόμαζας. Αυτό με τη σειρά του προκαλεί μια αύξηση της εγκάρσιας διατομής που ευνοεί μεγαλύτερη ροή του νερού, αυξάνοντας έτσι την υδραυλική αγωγιμότητα.
- ❖ Απόπλυση (Wash - Out): Η υδραυλική αγωγιμότητα αυξάνεται καθώς προχωρά η δοκιμή, ανεξάρτητα από τις αλλαγές που γίνονται στην πίεση του νερού. Αυτή η συμπεριφορά υποδεικνύει ότι η ροή του νερού επιφέρει μόνιμη και μη αντιστρέψιμη παραμόρφωση στη βραχόμαζα η οποία οφείλεται συνήθως στην απόπλυση του υλικού πλήρωσης ή/και στις μόνιμες μετακινήσεις του βράχου. Η κατάσταση αυτή μπορεί να σημαίνει ότι οι τιμές πίεσεως είναι πολύ υψηλές.
- ❖ Πλήρωση ρωγμών (Void filling): Η υδραυλική αγωγιμότητα μειώνεται καθώς προχωρά η δοκιμή, ανεξάρτητα από τις αλλαγές που γίνονται στην πίεση του νερού. Αυτή η

συμπεριφορά υποδηλώνει ότι το νερό γεμίζει προοδευτικά τις απομονωμένες ασυνέχειες, ή εμφανίζεται διόγκωση (swelling) στις ασυνέχειες, ή ότι η αργή ροή του νερού μέσα στις ασυνέχειες προκαλεί το φράξιμό τους από τα λεπτόκοκκα σωματίδια που μεταφέρει το νερό.

Πίνακας 9: Κατάσταση ασυνεχειών της βραχώμαζας σε σχέση με τις διαφορετικές τιμές Lugeon.

| Εύρος τιμών Lugeon | Χαρακτηρισμός | Υδραυλική αγωγιμότητα k (cm/sec)      | Κατάσταση ασυνεχειών βραχώμαζας | Ακρίβεια προσέγγισης (Lugeons) |
|--------------------|---------------|---------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| <1                 | Πολύ χαμηλή   | $< 1 \times 10^{-5}$                  | Πολύ κλειστές                   | <1                             |
| 1 – 5              | Χαμηλή        | $1 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-5}$ | Κλειστές                        | $\pm 0$                        |
| 5 – 15             | Μέτρια        | $6 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$ | Εν μέρει ανοικτές               | $\pm 1$                        |
| 15 – 50            | Μεσαία        | $2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$ | Μερικώς ανοικτές                | $\pm 5$                        |
| 50 – 100           | Υψηλή         | $6 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$ | Πολύ ανοικτές                   | $\pm 10$                       |
| >100               | Πολύ υψηλή    | $> 1 \times 10^{-3}$                  | Άνοιγμα χώρων ή κενών           | >100                           |

Στον πίνακα 9 δίνονται οι διάφορες καταστάσεις των ασυνεχειών μια βραχώμαζας όπως αυτές ερμηνεύονται κατά τις δοκιμές εισπίεσης νερού. Διάφοροι ερευνητές έχουν αποδείξει ότι στη ροή που είναι αποκλειστικά τυρβώδης οι δοκιμές εισπίεσης έχουν μια τετραγωνική σχέση μεταξύ τους, σε σύγκριση με τη γραμμική ροή που η σχέση τους είναι ευθέως ανάλογη (Guerra et al. 1968, Arhippainen 1970, Lancaster-Jones 1975). Σε ένα στάδιο δοκιμής μπορεί να εμφανίζονται ρωγμές διαφόρων μεγεθών, έτσι οι λεπτότερες από αυτές ενδέχεται να παρουσιάσουν γραμμική ροή, ενώ οι ευρύτερες ρωγμές θα έχουν τυρβώδη. Επομένως, το αποτέλεσμα είναι η συνύπαρξη των δύο αυτών ροών αφού η ροή πολύ σπάνια είναι πλήρως τυρβώδης. Ο Guerra et al. (1968) αναφέρει για τον τύπο ροής με πλήρωση ρωγμών, ότι μπορεί να οφείλεται σε τριχοειδή φαινόμενα που αντιστέκονται στη διείσδυση του νερού μέσα στις λεπτές ρωγμές. Στον πίνακα 10 παρουσιάζεται μια γραφική σύνοψη των πέντε ομάδων συμπεριφοράς όπως ορίζονται από τον Houlby (1976), καθώς και η αντιπροσωπευτική τιμή Lugeon που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για κάθε ομάδα.

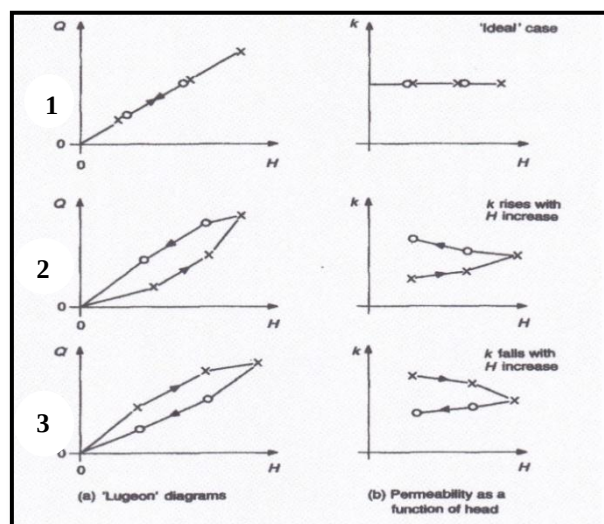
Πίνακας 10: Σύνοψη της ερμηνείας των δοκιμών Lugeon, όπως προτάθηκε από τον Houlby (1976).

| Συμπεριφορά   | Πιέσεις δοκιμής                                                                                           | Τιμή Lugeon για κάθε δοκιμή                                                                               | Περιγραφή αποτελεσμάτων                                                                                                                            | Αντιπροσωπευτική τιμή Lugeon                                                                                                                   |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ομαλή ροή     | 1 <sup>ο</sup> στάδιο    | 1 <sup>ο</sup> στάδιο    | Όλες οι τιμές Lugeon είναι περίπου ίδιες, ανεξάρτητα της πίεσης νερού                                                                              | Μέσος όρος των πέντε τιμών από τα στάδια.                                                                                                      |
|               | 2 <sup>ο</sup> στάδιο    | 2 <sup>ο</sup> στάδιο    |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
|               | 3 <sup>ο</sup> στάδιο    | 3 <sup>ο</sup> στάδιο    |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
|               | 4 <sup>ο</sup> στάδιο    | 4 <sup>ο</sup> στάδιο    |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
|               | 5 <sup>ο</sup> στάδιο    | 5 <sup>ο</sup> στάδιο    |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
| Τυρβώδης ροή  | 1 <sup>ο</sup> στάδιο    | 1 <sup>ο</sup> στάδιο    | Οι τιμές Lugeon μειώνονται καθώς η πίεση αυξάνει. Η ελάχιστη τιμή Lugeon παρατηρείται στο στάδιο της μέγιστης πίεσης νερού.                        | Χρησιμοποιείται η τιμή Lugeon που αντιστοιχεί στην μέγιστη πίεση (3 <sup>ο</sup> στάδιο).                                                      |
|               | 2 <sup>ο</sup> στάδιο    | 2 <sup>ο</sup> στάδιο    |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
|               | 3 <sup>ο</sup> στάδιο    | 3 <sup>ο</sup> στάδιο    |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
|               | 4 <sup>ο</sup> στάδιο    | 4 <sup>ο</sup> στάδιο    |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
|               | 5 <sup>ο</sup> στάδιο  | 5 <sup>ο</sup> στάδιο  |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
| Ροή διαστολής | 1 <sup>ο</sup> στάδιο  | 1 <sup>ο</sup> στάδιο  | Οι τιμές Lugeon μεταβάλλονται ανάλογα με τη πίεση του νερού. Η μέγιστη τιμή παρατηρείται στο στάδιο της μέγιστης πίεσης νερού.                     | Χρησιμοποιείται η μέση τιμή των δύο χαμηλών ή των δύο μέσων πιέσεων (1 <sup>ο</sup> , 2 <sup>ο</sup> , 4 <sup>ο</sup> , 5 <sup>ο</sup> στάδιο) |
|               | 2 <sup>ο</sup> στάδιο  | 2 <sup>ο</sup> στάδιο  |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
|               | 3 <sup>ο</sup> στάδιο  | 3 <sup>ο</sup> στάδιο  |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
|               | 4 <sup>ο</sup> στάδιο  | 4 <sup>ο</sup> στάδιο  |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
|               | 5 <sup>ο</sup> στάδιο  | 5 <sup>ο</sup> στάδιο  |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
| Απόπλυση      | 1 <sup>ο</sup> στάδιο  | 1 <sup>ο</sup> στάδιο  | Η τιμή Lugeon αυξάνεται καθώς προχωρά η δοκιμή. Το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών ξεπλένεται από τη ροή του νερού.                                  | Χρησιμοποιείται η μέγιστη (τελική) τιμή Lugeon (5 <sup>ο</sup> στάδιο).                                                                        |
|               | 2 <sup>ο</sup> στάδιο  | 2 <sup>ο</sup> στάδιο  |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
|               | 3 <sup>ο</sup> στάδιο  | 3 <sup>ο</sup> στάδιο  |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
|               | 4 <sup>ο</sup> στάδιο  | 4 <sup>ο</sup> στάδιο  |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
|               | 5 <sup>ο</sup> στάδιο  | 5 <sup>ο</sup> στάδιο  |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
| Πλήρωση       | 1 <sup>ο</sup> στάδιο  | 1 <sup>ο</sup> στάδιο  | Η τιμή Lugeon μειώνεται καθώς προχωρά η δοκιμή. Αυτό προκαλείται με την πλήρωση των κενών από το νερό σε ένα μερικώς κορεσμένο βραχώδη σχηματισμό. | Χρησιμοποιείται η τελική τιμή Lugeon (5 <sup>ο</sup> στάδιο).                                                                                  |
|               | 2 <sup>ο</sup> στάδιο  | 2 <sup>ο</sup> στάδιο  |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
|               | 3 <sup>ο</sup> στάδιο  | 3 <sup>ο</sup> στάδιο  |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
|               | 4 <sup>ο</sup> στάδιο  | 4 <sup>ο</sup> στάδιο  |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |
|               | 5 <sup>ο</sup> στάδιο  | 5 <sup>ο</sup> στάδιο  |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                |

### 3.5.4. Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τις δοκιμές Lugeon

Εκτός από τους Heitfeld (1965) και Houlsby (1976) και άλλοι ερευνητές ασχολήθηκαν με τη συμπεριφορά ενός εξεταζόμενου τμήματος της βραχώμαζας σε σχέση με την προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού που επιτυγχάνεται με την αντίστοιχη εφαρμοζόμενη πραγματική πίεση. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αποδίδονται σε διαγράμματα παροχής νερού σε συνάρτηση με την ολική πίεση, από τα οποία προκύπτουν αρκετά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της βραχώμαζας σε περίπτωση καταπόνησής της από πρόσθετα υδραυλικά φορτία, αλλά και για την αξιοπιστία της δοκιμής. Αν σε ένα τέτοιο διάγραμμα παρατηρείται αύξηση των απωλειών νερού στο τμήμα με τις φθίνουσες πιέσεις, τότε αυτό υποδεικνύει ότι οι ασυνέχειες είτε διογκώθηκαν είτε ξεπλύθηκαν κατά τη διάρκεια του κύκλου με τις αύξουσες πιέσεις. Αντίθετα, αν στον κλάδο με τις φθίνουσες πιέσεις οι απώλειες νερού είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες απώλειες στην αύξουσα πίεση, τότε η διαπερατότητα μειώνεται πιθανόν λόγω μεταφοράς υλικών τα οποία περιορίζουν το άνοιγμα των ασυνεχειών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παριστάνονται γραφικά είτε σε διάγραμμα πίεσης / διαπερατότητας, είτε σε διάγραμμα πίεσης / παροχής. Στην πράξη, τα αποτελέσματα κατατάσσονται σε τρεις ομάδες (Σχ. 23):

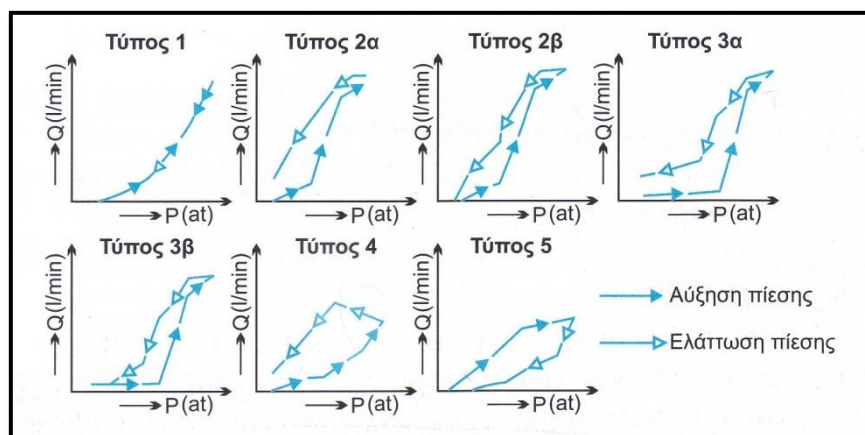
1. Την «ιδανική» περίπτωση: Ο νόμος του Darcy υπαγορεύει ότι η ροή είναι ευθέως ανάλογη της πίεσης, επομένως προβλέπεται μια οριζόντια γραμμή στο διάγραμμα πίεσης / διαπερατότητας. Στο διάγραμμα πίεσης / παροχής (διάγραμμα Lugeon) η ευθεία γραμμή διέρχεται από την αρχή των αξόνων.
2. Η διαπερατότητα φαίνεται να αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης.
3. Η διαπερατότητα φαίνεται να μειώνεται με την αύξηση της πίεσης.



Σχ. 23: Τυπικά αποτελέσματα από δοκιμή Lugeon

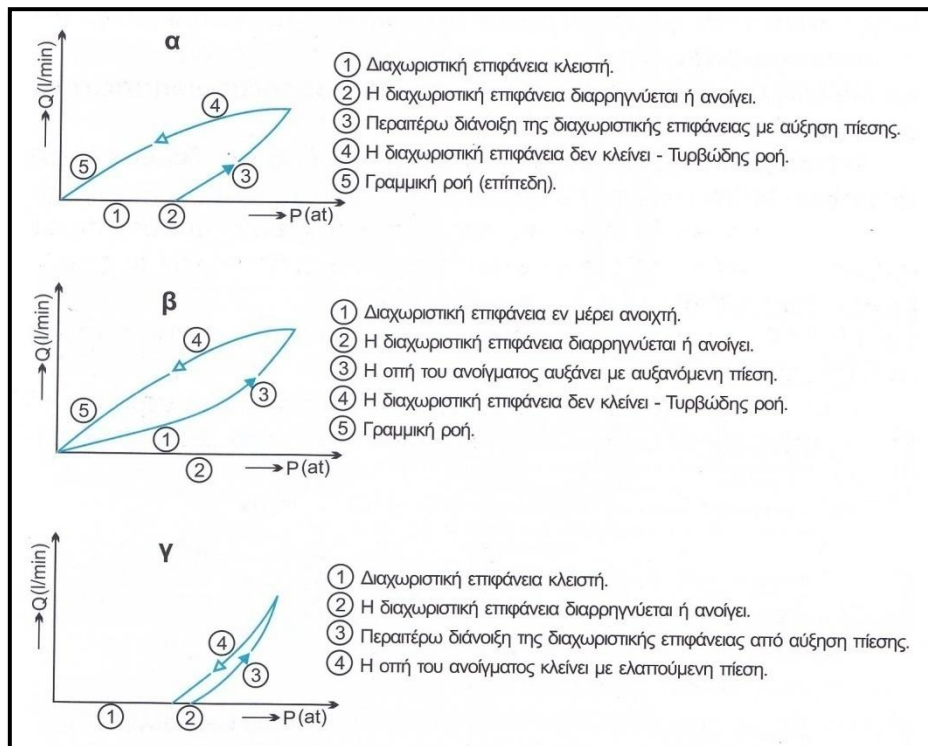
Ο Klopp (1977) κατέληξε σε πέντε βασικούς τύπους διαγραμμάτων που ερμηνεύουν τη συμπεριφορά της βραχώμαζας, οι οποίοι δίνονται συνοπτικά στο σχήμα 24.

- Τύπος 1: Κατά τη διάρκεια της εισπίεσης δεν παρουσιάζεται καμιά μεταβολή της βραχύμαζας.
- Τύπος 2α: Κατά την εισπίεση εμφανίζεται μια παραμόρφωση της βραχύμαζας, η οποία εν μέρει δεν είναι αντιστρεπτή.
- Τύπος 2β: Η εμφανιζόμενη παραμόρφωση της βραχύμαζας κατά την εισπίεση είναι αντιστρεπτή.
- Τύπος 3α: Η ξαφνική αύξηση της προσλαμβανόμενης ποσότητας νερού με αυξανόμενη πίεση δείχνει φαινόμενα θραύσης. Επιπλέον το φαινόμενο μόνο κατά ένα μέρος είναι αντιστρεπτό.
- Τύπος 3β: Ανάλογο φαινόμενο με το 3α, μόνο που το φαινόμενο είναι αντιστρεπτό.
- Τύπος 4: Ο τύπος αυτός με αρχικά αυξανόμενη ποσότητα νερού κατά τη διάρκεια πτώσης της πίεσης, αποδίδεται σε φαινόμενα διάβρωσης της βραχύμαζας (περιοχές ρηγμάτων, ενδεχόμενα χρειάζονται τσιμεντενέσεις).
- Τύπος 5: Η πολύ μειωμένη ποσότητα πρόσληψης νερού με την ελάττωση της πίεσης, αποδίδεται σε επιστροφή του νερού σε μια βραχύμαζα με μικρή διαπερατότητα, χωρίς επαρκή σύνδεση με τη γεώτρηση.



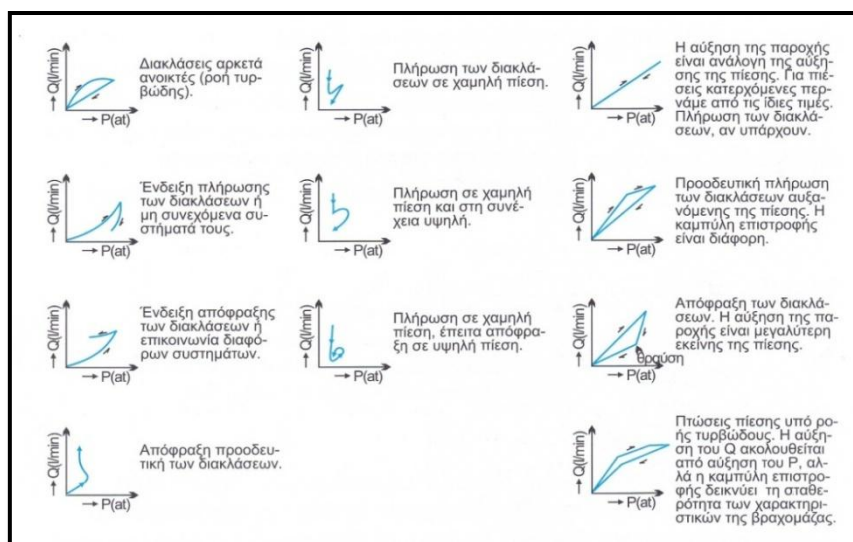
Σχ. 24: Ταξινόμηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται κατά την εκτέλεση Lugeon (Klapp, 1977).

Ο Wittke (1984) δίνει ακόμα τρεις βασικούς τύπους (Σχ. 25) που ερμηνεύουν τη συμπεριφορά της βραχύμαζας κατά την εκτέλεση των δοκιμών Lugeon σε διαρρηγμένη βραχύμαζα με ανοικτές (α), εν μέρει ανοικτές (β) ή εντελώς κλειστές ασυνέχειες (γ).



Σχ. 25: Αποτελέσματα δοκιμών Lugeon σε μια διαρρηγμένη διαχωριστική επιφάνεια. Παραδείγματα: α) διαχωριστική επιφάνεια κλειστή στην αρχή της δοκιμής, β) διαχωριστική επιφάνεια ολοκληρωτικά ή εν μέρει ανοιχτή κατά την αρχή της δοκιμής, γ) η διαχωριστική επιφάνεια κλείνει σε ελαττούμενη πίεση (Wittke, 1984).

Ανάλογα, και ίσως πληρέστερα, διαγράμματα  $Q=f(P)$  δίνονται από τον Λιακούρη (1975) από δοκιμές που διεξήγαγε η Δ.Ε.Η. σε διάφορες θέσεις κατασκευής φραγμάτων (Σχ. 26). Οι τύποι αυτοί καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα της μορφής που παίρνουν τα διαγράμματα από τα αποτελέσματα των εισπίσεων σε ένα εξεταζόμενο τμήμα.



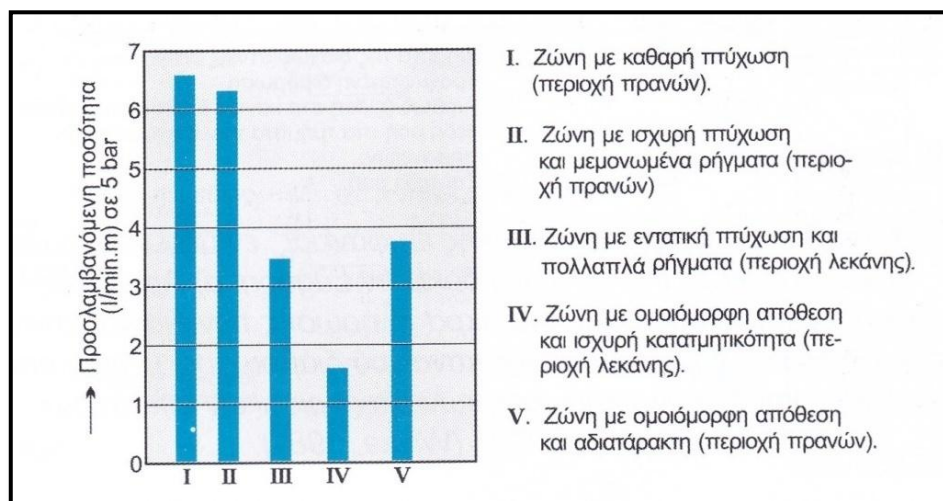
Σχ. 26: Μορφές διαγραμμάτων  $P - Q$  κατά την εκτέλεση δοκιμών Lugeon σε θέσεις φραγμάτων (Λιακούρης, 1976).

Όπως γίνεται αντιληπτό από όλους τους τύπους των διαγραμμάτων που αναφέρθηκαν πιο πάνω, δεν υπάρχει καμιά γραμμική σχέση που να συνδέει την προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού με την εφαρμοζόμενη ολική πίεση. Επομένως, η δοκιμή και η μετέπειτα ερμηνεία πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή γιατί θα καθορίσει και τα ανάλογα μέτρα στεγανοποίησης για τον περιορισμό των διαφυγών και άρα την ασφάλεια του τεχνικού έργου.

### 3.5.5. Παράσταση των πολυάριθμων δοκιμών Lugeon

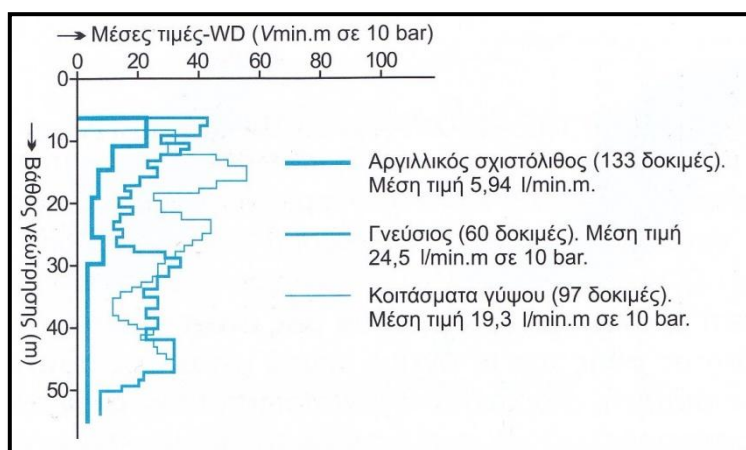
Οι δοκιμές Lugeon που πραγματοποιούνται για την κατασκευή ενός τεχνικού έργου είναι πολυάριθμες, επομένως έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για την συγκεντρωτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται. Οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής (από Δημόπουλο, 2008):

**A. Σχηματική παράσταση της μέσης τιμής ανάλογα με τις ομογενείς περιοχές σε γεωλογική και μορφολογική βάση (στηλοειδή διαγράμματα):** Για την ποσοτική εκτίμηση της μέσης τιμής λαμβάνεται υπόψη η ποσοστιαία αναλογία κάθε τιμής επί του συνολικού μήκους της γεώτρησης και επί του ολικού μήκους δοκιμών κάθε τμήματος. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί ως βάση για γενικές μελέτες της διαπερατότητας τμηματικών περιοχών και για το καθορισμό του μεγέθους των μέτρων στεγανοποίησης. Έτσι π.χ. παρουσιάζεται μια καθαρή σχέση της προσλαμβανόμενης ποσότητας νερού από τη μορφολογική κατάσταση και την τεκτονική καταπόνηση (σχήμα 27).



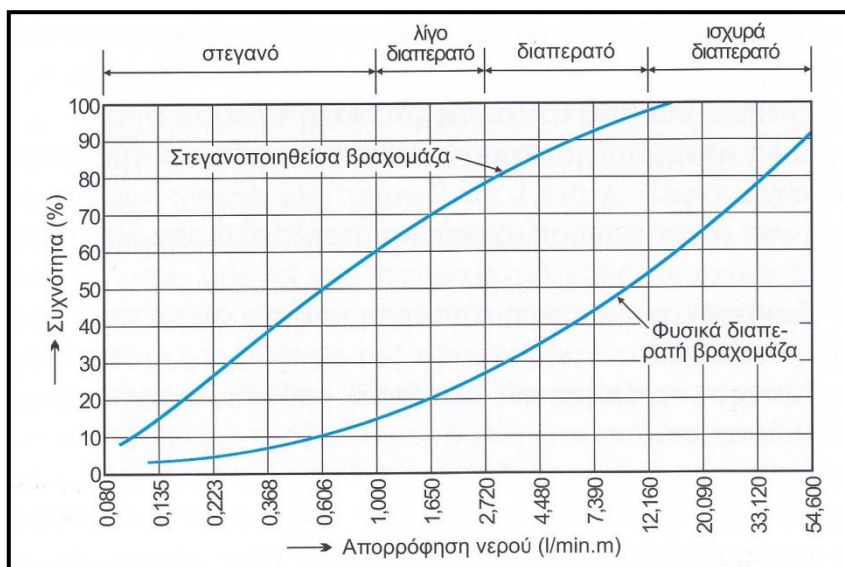
Σχ. 27: Αποτελέσματα δοκιμών Lugeon σε διάφορες ομογενείς περιοχές του φράγματος.

**B. Σχηματική παράσταση της μέσης τιμής σε σχέση με το βάθος:** Εδώ τοποθετούνται σε διαγράμματα οι μέσες τιμές της προσλαμβανόμενης ποσότητας νερού για κάθε στάδιο βάθους όπου έγινε η μέτρηση. Στο σχήμα 28 απεικονίζονται τρία διαγράμματα βάθους σε τρία διαφορετικά φράγματα με διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες της περιοχής.



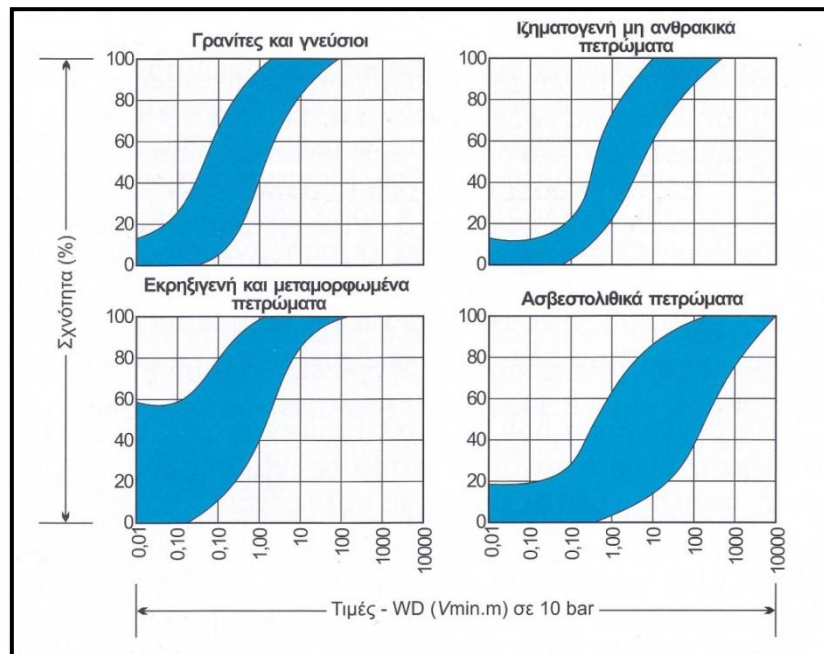
Σχ. 28: Σχέση της προσλαμβανόμενης ποσότητας νερού με το βάθος της γεώτρησης σε διάφορα φράγματα (κατά Schade, 1977).

Γ. Αθροιστικές καμπύλες των αποτελεσμάτων των δοκιμών Lugeon: Διάφοροι ερευνητές προσπάθησαν να παρουσιάσουν, μέσα από μια στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών Lugeon με τη μορφή αθροιστικών καμπύλων, τυπικές μορφές για καθορισμένες συνθήκες της βραχομάζας (Konjarowa 1964, Dittrich & Luttker 1966 και Schade 1977). Το σχήμα 29 δίνει την προτεινόμενη διαίρεση σε βαθμίδες διαπερατότητας κατά τον Schade (1977) με μια παράσταση της βραχομάζας στη φυσική και στεγανοποιημένη της κατάσταση με τη μορφή αθροιστικών καμπύλων.



Σχ. 29: Αθροιστικές καμπύλες αποτελεσμάτων δοκιμών Lugeon που εκτελέστηκαν σε βραχομάζα σε φυσική και στεγανοποιημένη κατάσταση (Schade, 1977).

Η Konjarowa (1962) δέχεται, ότι οι αθροιστικές αυτές καμπύλες παρουσιάζουν ειδικές μορφές για τα πετρώματα με διαφορετική πετρογραφία (Σχ. 30).



Σχ. 30: Περιοχή διασποράς της συχνότητας των τιμών απορρόφησης νερού κατά την εκτέλεση δοκιμών Lugeon για διάφορα πετρώματα (Konjarowa, 1962).

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών έχουν αναπτυχθεί αυτοματοποιημένα συστήματα συλλογής δεδομένων (Σχ. 31) που μπορούν να μετρήσουν, να καταγράψουν και να εμφανίσουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο. Τα συστήματα αυτά μετράνε το ρυθμό ροής και την πίεση ανά τακτά χρονικά διαστήματα, επομένως είναι δυνατό να παρακολουθούνται οι τιμές Lugeon καθώς προχωρά η δοκιμή.



Σχ. 31: Εξοπλισμός για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των δοκιμών Lugeon και των τσιμεντενέσεων.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

#### ΤΟ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟ ΕΡΓΟ ΣΟΛΕΑΣ

##### 4.1. Το ιστορικό για την κατασκευή του φράγματος

Η κατασκευή του φράγματος εκπληρώνει ένα πολύχρονο αίτημα των κοινοτήτων της κοιλάδας της Σολέας. Η κατασκευή του χρονολογείται από το 1960, όταν η τότε κυβέρνηση άντλησε πόσιμο νερό από το Τρόδος και συγκεκριμένα από την πηγή του «πικρομιρουδκιού» και το μετέφεραν στον Καλοπαναγιώτη και σε άλλες κοινότητες της κοιλάδας της Μαραθάσας για ικανοποίηση των καταναλωτικών αναγκών της περιοχής. Κάτοικοι, κοινοτάρχες και αρδευτικά τμήματα των χωριών της Σολιάς αντέδρασαν από τη συγκεκριμένη ενέργεια. Ο Πρόεδρος της Δημοκρατίας υποσχέθηκε ότι ως αντάλλαγμα για το νερό που αντλήθηκε από το Τρόδος, θα κατασκευάζονταν 14 εξωποτάμιες υδατοδεξαμενές στην περιοχή της Σολιάς. Ακολούθως τέθηκε η ιδέα για κατασκευή φράγματος στην ευρύτερη περιοχή της κοιλάδας. Η κατασκευή του φράγματος ήταν επιβεβλημένη καθώς τα νερά του ποταμού Καρυώτη, ενός από τους λίγους ποταμούς με ετήσια απορροή, κατέληγαν ανεκμετάλλευτα στο θαλάσσιο κόλπο της κατεχόμενης Μόρφου. Το εν λόγω φράγμα επρόκειτο αρχικά να κατασκευαστεί στον Άγιο Θεόδωρο Σολιάς. Μέσω τεχνητής παράκαμψης από τον ποταμό Καρυώτη το νερό θα κατέληγε στο φράγμα. Οι Τουρκοκύπριοι, οι οποίοι διατηρούν δικαιώματα στον Καρυώτη, έκαναν ένσταση για κατασκευή του φράγματος στον Αγίου Θεοδώρου και έτσι ναυάγησε αυτή η προσπάθεια. Η νέα προσπάθεια που ξεκίνησε εδώ και μερικά χρόνια καρποφόρησε και τελικά το φράγμα είναι στα τελικά του στάδια με τη διαφορά ότι θα κατασκευαστεί στη Φλάσου και όχι στον Άγιο Θεόδωρο.

## 4.2. Θέση του έργου

Η κοιλάδα της Σολέας βρίσκεται στις βόρειες πλαγιές της οροσειράς του Τροόδους, περί τα 50 χλμ. δυτικά της Λευκωσίας. Διαρρέεται από τον ποταμό Καρυώτη μήκους 28km, ένα από τους σπουδαιότερους ποταμούς της ΒΔ Κύπρου με αξιόλογη παροχή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η λεκάνη απορροής της κοιλάδας έχει εμβαδό περίπου 90 km<sup>2</sup>. Το κύριο τμήμα του έργου είναι το εξωποτάμιο φράγμα Σολέας, που χωροθετείται κοντά στα χωριά Λινού και Φλάσου, στη λεκάνη απορροής ενός μικρού κλάδου του ποταμού Ατσά. Αυτή η λεκάνη απορροής γειτνιάζει με τη λεκάνη του ποταμού Καρυώτη. Το φράγμα εκτροπής τοποθετείται επί του ποταμού Καρυώτη, κοντά στον οικισμό Κοράκου. Δύο από τις τέσσερις συνολικά ρυθμιστικές δεξαμενές του έργου χωροθετούνται στον υδροκρίτη των προαναφερόμενων λεκανών, στο χωριό Φλάσου, ενώ οι άλλες δύο δεξαμενές χωροθετούνται κοντά στους οικισμούς Ευρύχου και Τεμπριά. Τα τέσσερα αντλιοστάσια είναι κατανομημένα σε διάφορες θέσεις, με το αντλιοστάσιο Α1 στα κατάντη του πόδα του φράγματος Σολέας, το αντλιοστάσιο Α2 στον υδροκρίτη των δύο λεκανών απορροής και τα αντλιοστάσια Α3 και Α4 κοντά στον ποταμό Καρυώτη (Σχ. 32).

## 4.3. Σύντομη περιγραφή του έργου

Το σύνθετο αυτό έργο περιλαμβάνει όπως προαναφέραμε την κατασκευή του εξωποτάμιου φράγματος Σολέας, την κατασκευή του φράγματος εκτροπής των υδάτων του ποταμού Καρυώτη, την κατασκευή των ρυθμιστικών δεξαμενών (δεξαμενές εξισορρόπησης) και των αντλιοστασίων, την τοποθέτηση των αγωγών μεταφοράς του νερού και τέλος την κατασκευή των έργων εκτροπής – υδροληψίας – των έργων εξόδου και του μικρής κλίμακας υπερχειλιστή.

### 4.3.1. Το φράγμα

Το φράγμα είναι χωμάτινο με ύψος 56m, μήκος και πλάτος στέψης 444m και 6m αντίστοιχα. Η χωρητικότητα του ταμιευτήρα είναι  $4,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ , ενώ η λίμνη καταλαμβάνει μια έκταση εμβαδού 193.000 m<sup>2</sup>. Η ανώτερη στάθμη ύδατος είναι στα 359,50 m πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Το υψόμετρο στέψης είναι στα 361,60 m. Αποτελείται από ένα κεντρικό αργιλικό πυρήνα και σώματα στήριξης κατασκευασμένα από υλικό λαβών προερχόμενο κυρίως από την περιοχή του ταμιευτήρα. Το πλάτος του πυρήνα στη βάση του είναι 30m, ενώ στη στέψη φτάνει τα 4m. Γενικά το πάχος του αργιλικού πυρήνα είναι μεγάλο λόγω της όχι και πολύ καλής ποιότητας του υλικού. Το πλάτος του συνολικού φράγματος είναι 220m. Κατά μήκος του σώματος καθώς και μέσα σε γεωτρήσεις τοποθετούνται ηλεκτρικά πιεσόμετρα με σκοπό τη συνεχή παρατήρηση της ανάπτυξης της πίεσης πόρων. Επίσης, μέσα στον πυρήνα τοποθετείται συνδυασμός οργάνων κλισιομέτρου –

καθιζισιμέτρου. Ο όγκος του σώματος εκτιμάται γύρω στα  $1.800.000\text{m}^3$ . Το σώμα του φράγματος αποτελείται από τις παρακάτω ζώνες:

- Ζώνη 1: Αδιαπέρατα αργιλικά υλικά (πυρήνας) που ελήφθησαν από γειτνιάζοντες δανειοθαλάμους.
- Ζώνη 2: Φίλτρα και στραγγιστήρια
  - ✓ Ζώνη 2Α: Φίλτρο λεπτόκοκκο
  - ✓ Ζώνη 2Β: Φίλτρο χονδρόκοκκο
- Ζώνη 3: Κατάλληλα υλικά εκσκαφής (λάβες)
  - ✓ Ζώνη 3Α: Υλικά εκσκαφής Α' κατηγορίας
  - ✓ Ζώνη 3Β: Υλικά εκσκαφής Β' κατηγορίας
- Ζώνη 4: Επένδυση προστασίας ανάντη πρανούς φράγματος
  - ✓ Ζώνη 4Α: Λιθορριπή προστασίας από κυματισμό
  - ✓ Ζώνη 4Β: Υπόβαση λιθορριπής προστασίας
- Ζώνη 5: Επένδυση κατόντη πρανούς φράγματος με επίλεκτα βραχώδη υλικά εκσκαφής (λάβρα)
- Ζώνη 6: Υλικά οδοστρωσίας (αμμοχάλικα)

Η διατομή του φράγματος με τον πυρήνα και τις ζώνες του φράγματος δίνεται στο σχήμα 33.

#### 4.3.2. Φράγμα εκτροπής

Το φράγμα εκτροπής στην Κοράκου είναι ένα χαμηλό φράγμα κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα, συνολικού όγκου  $900\text{m}^3$ , με εξαμμοωτή και διάταξη για την αποδέσμευση της περιβαλλοντικής παροχής.

#### 4.3.3 Δεξαμενές εξισορρόπησης

Οι τέσσερις δεξαμενές εξισορρόπησης είναι επενδυμένες με σκυρόδεμα. Η συνολική τους χωρητικότητα φτάνει τα  $7.300\text{m}^3$ , με όλα τα απαραίτητα έργα ασφαλείας και εισόδου και εξόδου του νερού. Ο μέγιστος όγκος νερού ( $2.500\text{m}^3$ ) βρίσκεται στη δεξαμενή της κοινότητας Ευρύχου, ενώ ο ελάχιστος όγκος στην κοινότητα Τεμβριάς.

#### 4.3.4. Αγωγοί μεταφοράς

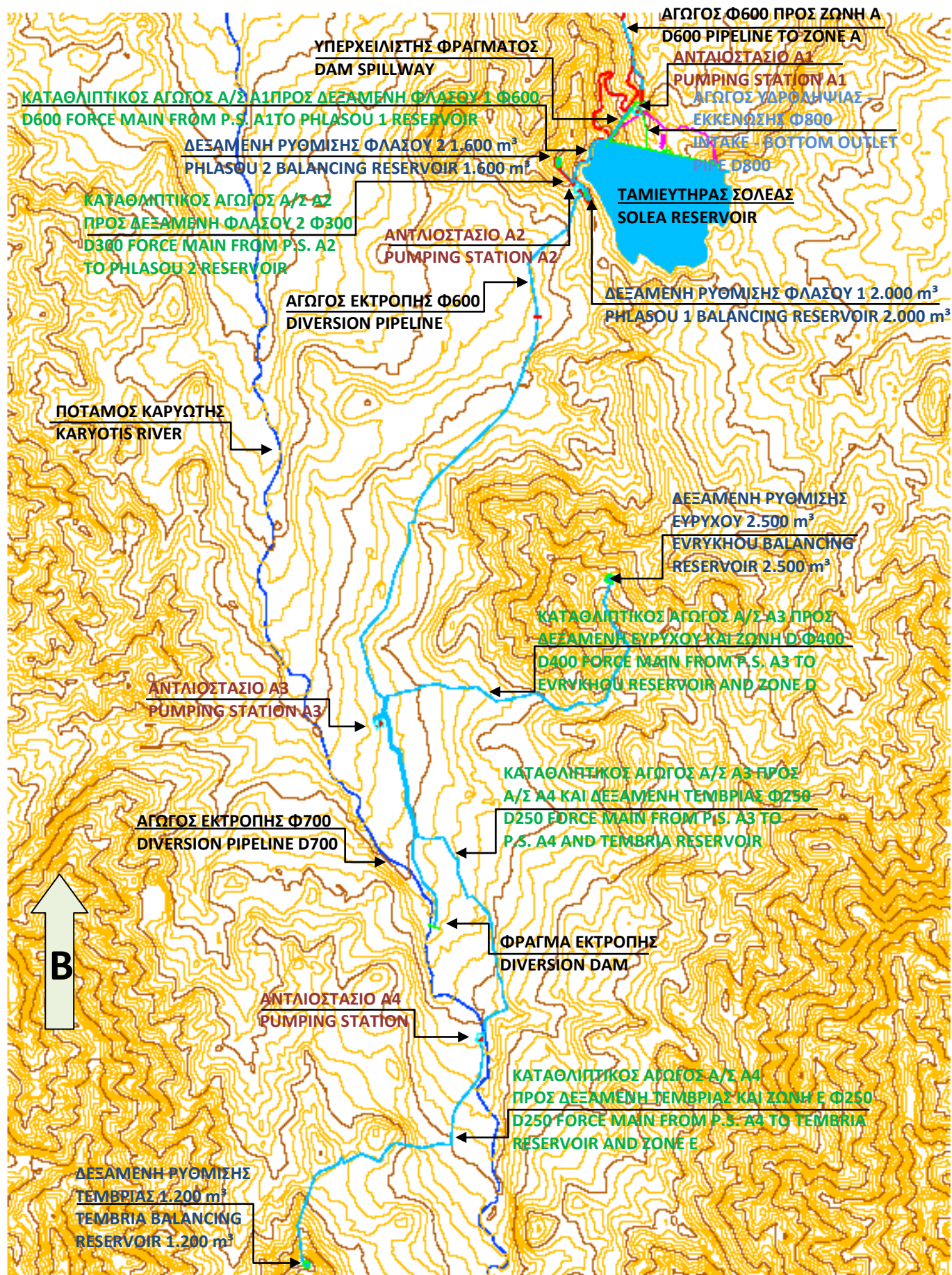
Οι αγωγοί μεταφοράς είναι κατασκευασμένοι από ελατό χυτοσίδηρο, διαμέτρου 250 – 700mm και με συνολικό μήκος 8,50 km.

#### **4.3.5. Έργα εκτροπής - εκκένωσης – υδροληψίας**

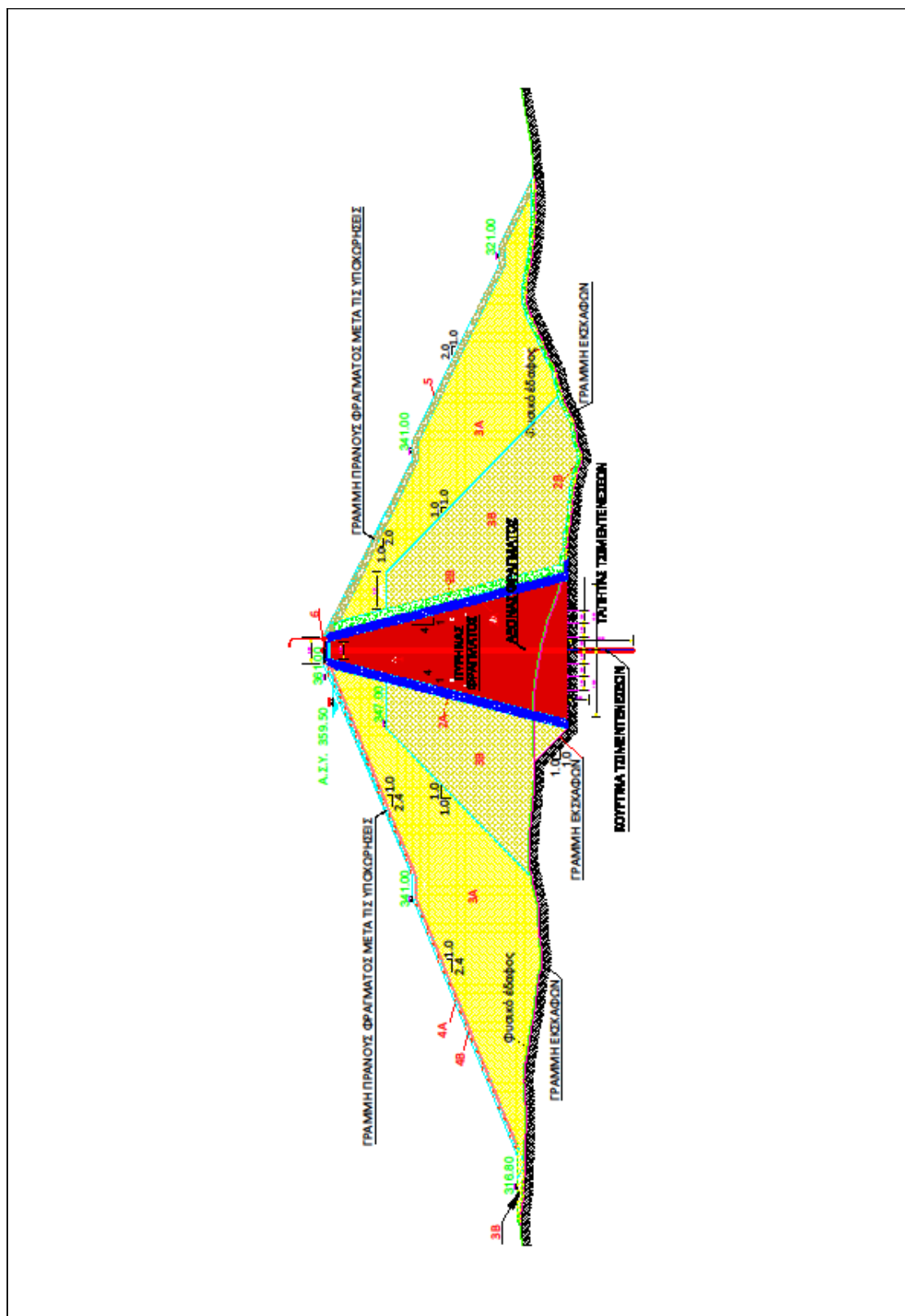
Τα έργα εκτροπής – εκκένωσης – υδροληψίας αποτελούνται από ένα οχετό με οπλισμένο σκυρόδεμα διαμέτρου 2,20m και μήκους 165m, καθώς και από εγκιβωτισμένο αγωγό διαμέτρου 800mm και μήκους 122m.

#### **4.3.6. Υπερχειλιστής**

Ο υπερχειλιστής είναι μια στενή διώρυγα στο αριστερό αντέρεισμα του φράγματος, κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα μήκους 220m και ανοικτής ορθογώνιας διατομής. Η στενή διατομή του οφείλεται στο γεγονός ότι η στάθμη του νερού μέσα στον ταμιευτήρα είναι ελεγχόμενη, αφού όπως προείπαμε πρόκειται για ένα εξωποτάμιο φράγμα που τροφοδοτείται μέσω αγωγών.



Σχ. 32: Τοπογραφικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του φράγματος Σολέας. Διακρίνονται ο ταμιευτήρας και το σύνολο των συνοδών έργων του (περιγραφή στο κείμενο). Οι ζώνες άρδευσης απεικονίζονται στο σχ. 1. Κλίμακα 1:20.000



Σχ. 33: Διατομή του φράγματος Σολέας, με τις ζώνες και τα τεχνικά στοιχεία του έργου. Κλίμακα 1:1000

#### 4.4. Γεωερευνητικό πρόγραμμα

Το γεωερευνητικό πρόγραμμα είχε σα σκοπό να επαληθεύσει την υπεδάφια λιθολογία της περιοχής και γενικά τις επικρατούσες γεωλογικές - γεωτεχνικές συνθήκες (π.χ. το πάχος της αποσαθρωμένης ζώνης κατά μήκος του προτεινόμενου άξονα, την ποιότητα των πετρωμάτων καθώς και τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών). Σημαντικό ήταν επίσης να εξεταστεί η κατάσταση των υπόγειων υδάτων και η διαπερατότητα του υποβάθρου θεμελίωσης. Το πρόγραμμα που εκπονήθηκε στην περιοχή περιλαμβάνει συνολικά δώδεκα ερευνητικές γεωτρήσεις, όλες πυρηνοληπτικές και κατακόρυφες, με διάμετρο γεώτρησης και πυρήνα 96mm / 62mm αντίστοιχα. Το συνολικό βάθος των γεωτρήσεων είναι 394,65m και έγιναν με τη χρήση αδαμαντοκορώνας και δειγματολήπτη διπλού σωλήνα. Οι επτά από τις γεωτρήσεις αυτές βρίσκονται πάνω στον άξονα του φράγματος και στις οποίες έγιναν δοκιμές εισπίεσης νερού (WP - TESTS) , ενώ οι υπόλοιπες πέντε είναι σε διάφορα σημεία μέσα στον ταμιευτήρα του φράγματος. Επίσης, η υπαίθρια έρευνα περιλαμβάνει γεωλογική χαρτογράφηση τόσο στη περιοχή θεμελίωσης του φράγματος όσο και στον ταμιευτήρα αυτού, σε κλίμακα 1:1000. Τέλος, το γεωερευνητικό πρόγραμμα περιλαμβάνει την εκσκαφή δύο τάφρων (trenches) με σκοπό να αποκτηθούν λεπτομερή δεδομένα για την καταλληλότητα των πετρωμάτων ως υλικό κατασκευής για το σώμα του φράγματος. Ο γεωλογικός χάρτης και όλες οι εργασίες που περιλαμβάνονται στο γεωερευνητικό πρόγραμμα, απεικονίζονται στο σχήμα 34. Οι ερευνητικές γεωτρήσεις έγιναν με σκοπό:

- Να εξεταστούν οι υπόγειες γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή του φράγματος και το κατά πόσο υφίσταται κάποιο κύριο γεωλογικό - τεκτονικό «εμπόδιο» στην κατασκευή του.
- Να προκύψουν λεπτομερή στοιχεία για τις ιδιότητες των πετρωμάτων σε βάθος, τόσο για την εξέταση του σχεδιασμού, όσο και για τη χρήση τους ως υλικό κατασκευής του φράγματος.
- Να αξιολογηθεί η διαπερατότητα του υποβάθρου σε διαφορετικά βάθη με δοκιμές εισπίεσης νερού.
- Να υπολογισθεί το πάχος των αλουβιακών και άλλων επιφανειακών αποθέσεων.
- Να υπολογισθεί το βάθος της αποσάθρωσης έτσι ώστε να προσδιοριστεί το βάθος και το μέγεθος της απαραίτητης εκσκαφής για τη θεμελίωση.
- Να προσδιοριστεί η υδραυλική αγωγιμότητα στη θέση θεμελίωσης έτσι ώστε να εκτιμηθεί η έκταση και η ποσότητα των τιμμεντενέσεων που είναι απαραίτητο για την ασφάλεια της κατασκευής καθώς και η στεγανότητα των αντρευσμάτων.

Μετά το πέρας των εργασιών στεγανοποίησης οι ερευνητικές γεωτρήσεις θα χρησιμεύσουν ως πιεζόμετρα παρατήρησης με την εγκατάσταση διάτρητου σωλήνα για να παρακολουθείται η κατάσταση του υπόγειου νερού.

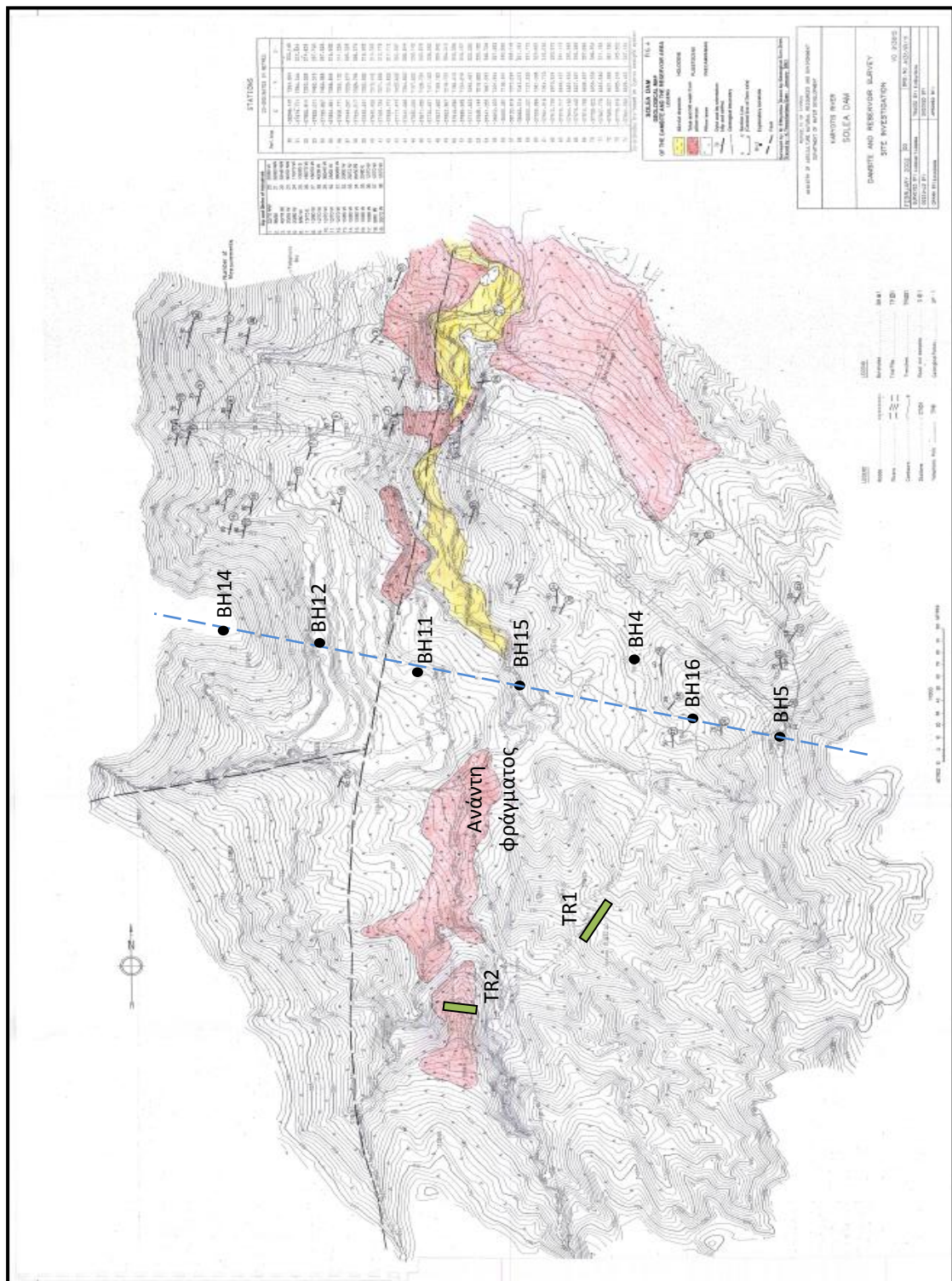
Στον πίνακα 11 δίνονται τα στοιχεία των ερευνητικών γεωτρήσεων, όπως αυτές τοποθετούνται πάνω στον άξονα του φράγματος, με διεύθυνση Δύση – Ανατολή.

Πίνακας 11: Στοιχεία ερευνητικών γεωτρήσεων.

| Γεώτρηση | Απόλυτο υψόμετρο (m) | Βάθος (m) | Τοποθεσία           |
|----------|----------------------|-----------|---------------------|
| 14       | 364,29               | 30,15     | Αριστερό αντέρεισμα |
| 12       | 332,76               | 40,1      | Αριστερό αντέρεισμα |
| 11       | 316,52               | 55,0      | Αριστερό αντέρεισμα |
| 15       | 306,45               | 50,3      | Πεδινό τμήμα        |
| 4        | 321,84               | 35,0      | Δεξί αντέρεισμα     |
| 16       | 325,31               | 34,8      | Δεξί αντέρεισμα     |
| 5        | 344,18               | 30,0      | Δεξί αντέρεισμα     |

#### 4.4.1. Δανειοθάλαμοι, υλικά κατασκευής του φράγματος

Βασικό στοιχείο της μελέτης είναι να καθοριστεί η ποιότητα και οι διαθέσιμες ποσότητες του υλικού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δομικό υλικό στην κατασκευή του φράγματος. Το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης και το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων πραγματοποίησαν επί τόπου έρευνα στο χώρο του φράγματος με στόχο τον προγραμματισμό των υπεδάφιων ερευνών για τους δανειοθαλάμους αργίλου. Το Τ.Γ.Ε. ήταν υπεύθυνο για την καταγραφή των δανειοθαλάμων, ενώ το Τ.Α.Υ. για τις εργαστηριακές δοκιμές των δειγμάτων. Οι δανειοθάλαμοι που έχουν ήδη ερευνηθεί για την κατασκευή του φράγματος στον Άγιο Θεόδωρο μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικά με αυτούς στην περιοχή της Σολέας. Επίσης, ποσότητες αργλικού υλικού εντοπίζονται και στις κολλουβιακές αποθέσεις της περιοχής του ταμιευτήρα και της θέσης του φράγματος. Κατά την προκαταρκτική φάση της έρευνας, έγιναν συνολικά πέντε ερευνητικές γεωτρήσεις και 2 τάφροι (trenches) μέσα στον ταμιευτήρα με σκοπό να διερευνηθεί η καταλληλότητα της βραχώμαζας ως υλικό κατασκευής του αναχώματος. Το Τ.Α.Υ. συνέλεξε δείγματα για εργαστηριακή ανάλυση από δύο θέσεις. Το υλικό της τάφρου 1 (Σχ. 34) είναι κυψελοειδείς λάβες μέτριας αντοχής, οξειδωμένες, καστανού χρώματος, μέτριας έως υψηλής αποσάθρωσης. Σε δεύτερο δείγμα που πάρθηκε από τη χάραξη του δρόμου, το πέτρωμα ήταν και πάλι κυψελοειδείς λάβες μέτριας έως χαμηλής αντοχής, οξειδωμένες, καστανού χρώματος, πολύ αποσθρωμένες. Η τάφρος 2 έφτασε τις λάβες μόνο στη ΒΔ πλευρά και στον πυθμένα αυτής.



Σχ. 34: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής θεμελίωσης του φράγματος (Κλίμακα 1:1000).

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό κατά την περίοδο της κατασκευής του φράγματος και των υπόλοιπων συνοδών έργων του.



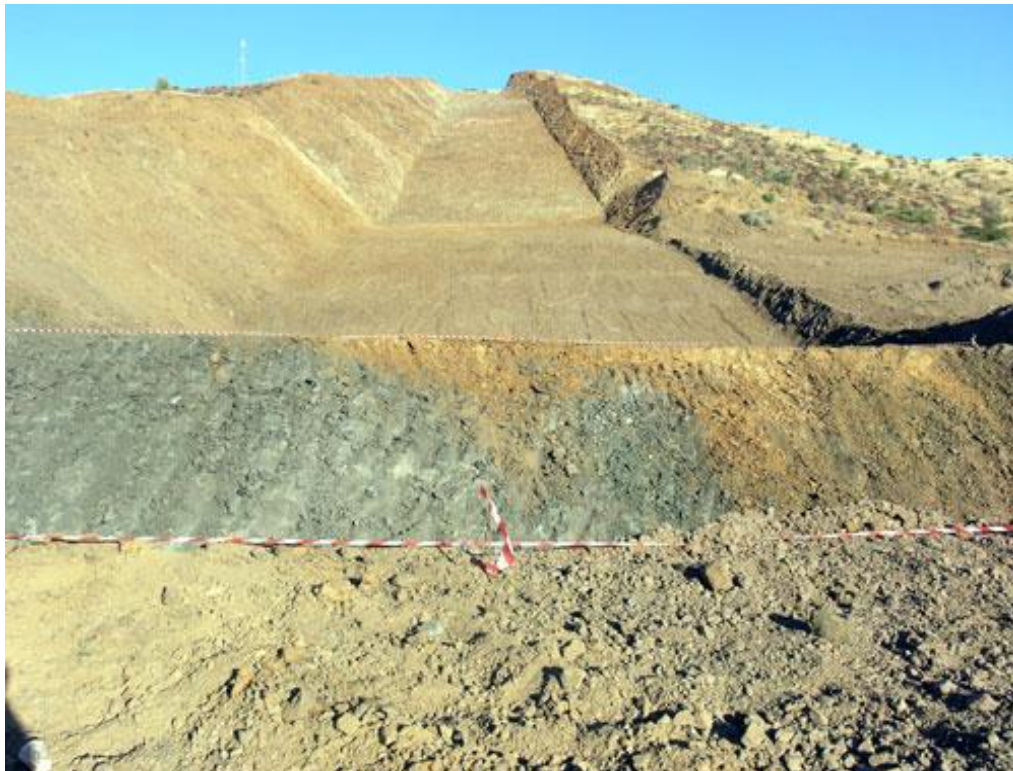
Σχ. 35: Η θέση του άξονα του φράγματος πριν την εκσκαφή.



Σχ. 36: Πανοραμική όψη από το αριστερό αντέρεισμα κατά τη φάση κατασκευής.  
Διακρίνονται οι διάφορες ζώνες του σώματος του φράγματος.



Σχ. 37: Γενική όψη του πυρήνα του φράγματος. Διακρίνεται ο σχετός εκτροπής - εκκένωσης στον πυρήνα του φράγματος (άσπρο βέλος).



Σχ. 38: Όψη της εκσκαφής για τη θεμελίωση του πυρήνα στο αριστερό αντέρεισμα.



Σχ. 39: Άποψη του ανάντη πρανούς του φράγματος. Διακρίνεται η ζώνη 4Α (λιθορριπή προστασίας).



Σχ. 40: Γενική όψη του τεχνικού εκτροπής.



Σχ. 41: Σκυροδέτηση βάσης στο φάτνωμα 1 στην ρυθμιστική δεξαμενή Φλάσου 1 (χωρητικότητα νερού 2.000 m<sup>3</sup>).



Σχ. 42: Τοποθέτηση αγωγού στον οχετό εκτροπής.



Σχ. 43: Εκσκαφή του υπερχειλιστή του φράγματος.



Σχ. 44: Όψη του έργου εισόδου υδροληψίας στη λεκάνη του ταμιευτήρα.

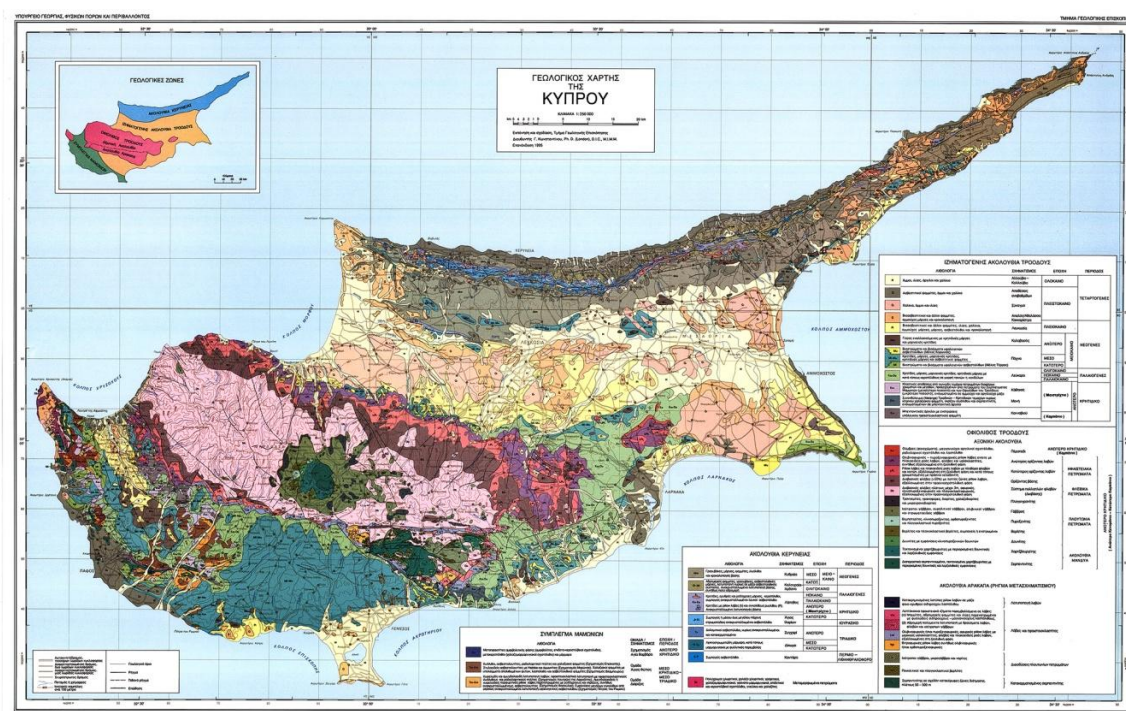
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΚΥΠΡΟΥ

#### 5.1. Γενικά γεωλογικά στοιχεία

Η Κύπρος βρίσκεται στο ΝΑ άκρο της Ανατολικής Μεσογείου με συνολική έκταση 9250 km<sup>2</sup>. Εντάσσεται εν μέρει στο Αλπικό ορογενετικό σύστημα και εν μέρει στη νεότερη Μεσογειακή ορογένεση. Γεωλογικά χωρίζεται σε τέσσερις μεγάλες ζώνες (Σχ. 44):

- Η ζώνη της Κερύνειας ή Πενταδάκτυλου με την αλπική ιζηματογενή ακολουθία
- Η ζώνη του Τροόδους με το οφιολιθικό σύμπλεγμα
- Η ζώνη (ή σύμπλεγμα) των Μαμωνίων
- Η ιζηματογενής ακολουθία του Τροόδους.



Σχ. 45: Γεωλογικός χάρτης Κύπρου (κλίμακα 1:250.000). (Από Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου).

#### 5.1.1. Η ζώνη της Κερύνειας ή Πενταδάκτυλου

Η ζώνη της Κερύνειας είναι η βορειότερη γεωλογική ζώνη της Κύπρου και θεωρείται ως η νοτιότερη εμφάνιση της Ταυρο - Δειναρικής Αλπικής Ζώνης. Αποτελείται κυρίως από Αλπικά ιζήματα ανθρακικής σύστασης, που χρονολογούνται από το Πέρμιο και φτάνουν μέχρι το Παλαιόκαινο. Μέσα στα ανθρακικά πετρώματα βρίσκεται και ένας σχηματισμός πελαγικών ασβεστόλιθων ηλικίας Α. Κρητιδικού, μέσα στον οποίο παρεμβάλλονται βασικής

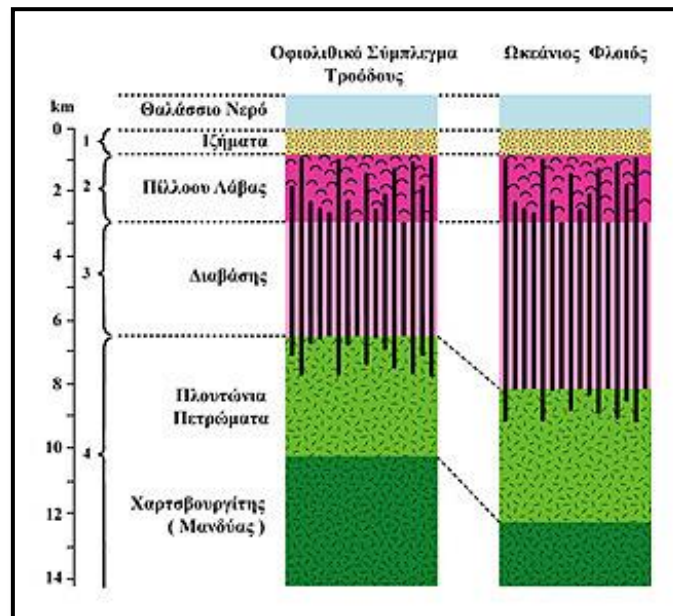
σύστασης pillow λάβες και αλκαλικοί ρυόλιθοι. Η ανθρακική σειρά καταλήγει σε ένα φλύσχη ηλικίας Ηωκαίνου πάνω στον οποίο τοποθετείται τεκτονικά ένας νεότερος διαφορετικός φλύσχη ηλικίας Μέσου – Άνω Μειόκαινου. Η ηφαιστειότητα του Α. Κρητιδικού θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει ένα ηφαιστειακό τόξο που σχηματίστηκε σε ένα παλιό ηπειρωτικό περιθώριο κατά την υποβύθιση του ωκεάνιου πυθμένα της ζώνης του Τροόδους προς Βορρά.

### 5.1.2. Η ζώνη του Τροόδους

Η ζώνη του Τροόδους αποτελεί το γεωλογικό πυρήνα της Κύπρου και περιλαμβάνει μια από τις σημαντικότερες, πλήρεις και καλά μελετημένες οφιολιθικές ακολουθίες στον κόσμο. Περιέχει όλη τη στρωματογραφία που χαρακτηρίζει μια τυπική οφιολιθική σειρά, από την κατώτερη μονάδα τα υπερβασικά πετρώματα (μανδύας), τα ανώτερα βασικά πετρώματα (ωκεάνιος φλοιός), το σύμπλεγμα φλεβών (sheeted dykes complex), οι pillow λάβες και τα ιζήματα βαθιάς θάλασσας. Η ζώνη αυτή δημιουργήθηκε κατά το Άνω Κρητιδικό στη μεσοωκεάνια ράχη μιας ωκεάνιας λεκάνης της Νεοτηθύος. Η οφιολιθική μάζα του Τροόδους εμφανίζεται ως μια επιμηκυμένη δομή με διεύθυνση ΔΒΔ – ΑΝΑ. Πιστεύεται όμως ότι βυθίζεται προς Βορρά κάτω από την ιζηματογενή σειρά που βρίσκεται στους βόρειους πρόποδες του βουνού και στην περιοχή της Μεσαορίας, καθώς και κάτω από την Αλπική ιζηματογένεση του Πενταδάκτυλου. Τα οφιολιθικά πετρώματα του Τροόδους περιλαμβάνουν από κάτω προς τα πάνω (Σχ. 46):

- Πλουτωνικά υπερβασικά πετρώματα (χαρτσβουργίτες, δουνίτες, βερλίτες, πυροξενίτες), εν μέρει σερπεντινωμένα.
- Πλουτωνικά βασικά και όξινα πετρώματα (γάββροι, πλαγιογρανίτες).
- Ένα σύμπλεγμα βασικών φλεβών (διαβάσες, βασάλτες), τυπικών της υποθαλάσσιας ηφαιστειότητας. Προήλθαν από τη στερεοποίηση του μάγματος στις διόδους διείσδυσης και μεταφοράς του από τους μαγματικούς θαλάμους στη βάση του ωκεάνιου φλοιού, τροφοδοτώντας ταυτόχρονα τις υποθαλάσσιες εκχύσεις λαβών στον ωκεάνιο πυθμένα.
- Χαρακτηριστικές pillow λάβες βασαλτικής – ανδεσιτικής σύστασης, που είναι αποτέλεσμα υποθαλάσσιας ηφαιστειακής έκχυσης. Μεταξύ των φλεβικών πετρωμάτων και των «μαξιλαροειδών» λαβών (pillow lavas) υπάρχει μια μεταβατική ζώνη γνωστή ως «Ορίζοντας Βάσης».

Η στρωματογραφία του παρουσιάζει τοπογραφική αναστροφή, δηλ. τα στρωματογραφικά κατώτερα πετρώματα εμφανίζονται στην κορυφή του, ενώ τα στρωματογραφικά ανώτερα στις παρυφές του. Αυτή η φαινόμενη αναστροφή οφείλεται στον τρόπο ανύψωσης του (δημιουργία δόμου) αλλά και στη διαφορική του διάβρωση.



Σχ. 46: Σχηματική λιθοστρωματογραφική στήλη του οφιολιθικού συμπλέγματος του Τροόδους (Από Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου).

Άμεσα συνδεδεμένα με τους οφιολίθους του Τροόδους είναι τα κοιτάσματα μεικτών θειούχων, χρωμίτη και αμιάντου. Ο σιδηροπυρίτης είναι το κύριο μέταλλευμα που συναντάται και στην περιοχή του φράγματος Σολέας. Τα κοιτάσματα αυτά σχηματίστηκαν σε διάφορες στρωματογραφικές ενότητες των οφιολίθων (λάβες, δουνίτη, σερπεντινίτη, αντίστοιχα) και ήλθαν στην επιφάνεια ως αποτέλεσμα της ανύψωσής τους. Η επιφανειακή αποκάλυψη του χαλκού και του αμιάντου είχε ως αποτέλεσμα την ανακάλυψη και εκμετάλλευσή του από τους αρχαίους κατοίκους του νησιού.

### 5.1.3. Το σύμπλεγμα των Μαμωνίων

Το Σύμπλεγμα Μαμωνίων αποτελεί μια ξεχωριστή και τεκτονικά πολύπλοκη συγκέντρωση εκρηξιγενών, ιζηματογενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων, των οποίων η ηλικία κυμαίνεται από το Μέσο Τριαδικό μέχρι το Ανώτερο Κρητιδικό. Τα πετρώματα αυτά, επωθήθηκαν κατά το Μαιστρίχτιο (πριν 75 εκ. χρόνια) πάνω και δίπλα στους οφιολίθους του Τροόδους. Το σύμπλεγμα των Μαμωνίων είναι ουσιαστικά μια ζώνη οφιολιθικών μιγμάτων (mélanges) που αποτελείται από ωκεάνια ιζήματα (κερατόλιθοι, πηλίτες, πελαγικοί ασβεστόλιθοι, αργιλοπυριτικά) ηλικίας Τριαδικού – Κρητιδικού, τεκτονικά αναμεμιγμένα με οφιολιθικά πετρώματα (γάββροι, διαβάσεις, pillow λάβες, σερπεντινίτες) καθώς και από μεταμορφωμένα πετρώματα (μάρμαρα, χαλαζίτες, αμφιβολίτες, σιπολίτες). Τα μεταμορφωμένα πετρώματα πιθανό να αντιπροσωπεύουν πετρώματα του παλιού ηπειρωτικού περιθωρίου της Γκοντβάνας, στο οποίο έγινε η αρχική ηπειρωτική διάρρηξη του Τριαδικού, για να εξελιχθεί μετέπειτα στην ωκεάνια λεκάνη του Τροόδους.

#### 5.1.4. Η ιζηματογενής ακολουθία του Τροόδους

Η ζώνη των αυτόχθονων ιζηματογενών πετρωμάτων είναι ηλικίας Α. Κρητιδικού – Πλειστόκαινου και υπέρκειται των οφιολίθων. Περιβάλλει την οφιολιθική μάζα του Τροόδους σχεδόν από όλες τις πλευρές και προεκτείνεται στη χαμηλή περιοχή της Μεσαορίας. Στη στρωματογραφική του στήλη συναντάμε από κάτω προς τα πάνω:

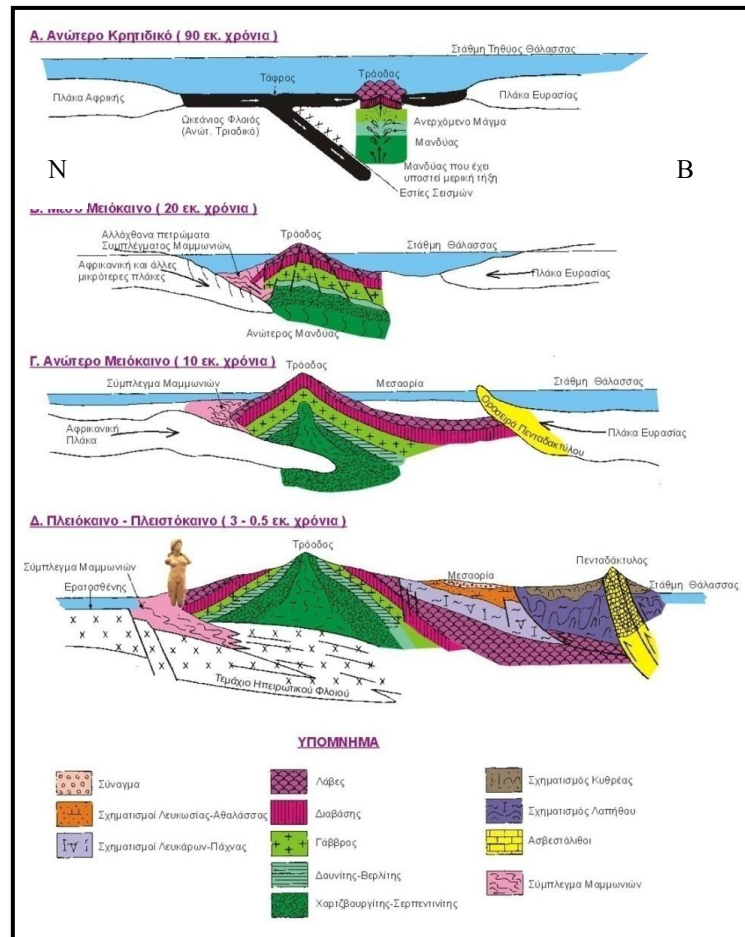
- Ραδιολαρίτες, ιλυόλιθους, ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα, μαγγανιούχους πηλίτες και μπεντονιτικούς αργίλους ηλικίας Α. Κρητιδικού.
- Πελαγικά ιζήματα (ασβεστιτικά, μαργαϊκά, πυριτικά) ηλικίας Παλαιογενούς.
- Υφαλογενείς ασβεστόλιθους, μάργες, ασβεστομάργες και κοραλλιογενείς ασβεστόλιθους ηλικίας Μειοκαίνου.
- Μάργες, κροκαλοπαγή, βιογενείς ασβεστόλιθους ηλικίας Πλειοκαίνου – Τεταρτογενούς.

#### 5.2. Γεωτεκτονική εξέλιξη της νήσου Κύπρου

Η γεωτεκτονική εξέλιξη της Κύπρου ξεκινάει από το Τριαδικό με την ηπειρωτική διάρρηξη ενός τεμάχους της Αφρικανικής πλάκας (Γκοντβάνας), το οποίο εξελίχτηκε στη δημιουργία ωκεάνιου φλοιού με ανάπτυξη τυπικής μεσοωκεάνιας ράχης (Σχ. 47). Η μετέπειτα καταστροφή της ωκεάνιας λεκάνης άρχισε με ενδοωκεάνια υποβύθιση και υποβύθιση τμήματος του ωκεανού κάτω από το Ευρασιατικό ηπειρωτικό περιθώριο. Η υποβύθιση αυτή προκάλεσε την επώθηση των οφιολίθων της ωκεάνιας λεκάνης του Τροόδους πάνω στη Γκοτβάνα κατά την περίοδο του Α. Κρητιδικού, ενώ ταυτόχρονα στα πετρώματα του ηπειρωτικού περιθωρίου που έχει υποστεί την αρχική ηπειρωτική διάρρηξη δημιουργήθηκε το οφιολιθικό *mélanges* των Μαμωνίων. Σημαντικό ρόλο στη τοποθέτηση των οφιολίθων πιστεύεται ότι έπαιξε η προς Βορρά μετακίνηση του υποθαλάσσιου υβώματος του Ερατοσθένη που δημιουργήθηκε πάνω στο ωκεάνιο τμήμα της Αφρικανικής πλάκας.

Έτσι, στο Τριτογενές και Τεταρτογενές δημιουργήθηκε μια διπλή ωκεάνια υποβύθιση κάτω από το ηπειρωτικό περιθώριο της Ευρασίας. Η αρχική υποβύθιση έγινε κάτω από την Αλπική ζώνη του Πενταδάκτυλου και ακολούθησε η δεύτερη υποβύθιση νότια της Κύπρου κάτω από τη μάζα των οφιολίθων του Τροόδους. Αυτό ερμηνεύει και την μετανάστευση του Κυπριακού Τόξου από τη θέση του Πενταδάκτυλου, στη θέση νότια του Τροόδους το οποίο εξακολουθεί μέχρι και σήμερα να ανυψώνεται. Εξηγεί επίσης και την κλίση των πετρωμάτων του Τροόδους προς Βορρά. Η ζώνης της Κερύνειας επωθείται πάνω στη ζώνη του Τροόδους με φορά κίνησης από Βορρά προς Νότο. Σημαντικό επίσης στοιχείο για την γεωτεκτονική εξέλιξη του νησιού είναι η διαπίστωση της αριστερόστροφης περιστροφής της Κύπρου κατά 90°. Ο μηχανισμός και η ηλικία της περιστροφής βρίσκεται ακόμα υπό συζήτηση. Η απότομη ανύψωση του χώρου της Κύπρου έγινε κατά το Πλειστόκαινο, τα τελευταία 2,5 περίπου

εκατομμύρια χρόνια, οπότε αναδύθηκαν το σημερινό Τρόδος και ο Πενταδάκτυλος σε υψόμετρα πολύ πιο ψηλά και από τα σημερινά. Η ανύψωση αυτή, συνδυασμένη με τις έντονες κλιματικές αλλαγές του Πλειστοκαίνου, είχε ως αποτέλεσμα την εκτεταμένη διάβρωση των οροσειρών, κυρίως εκείνης του Τροόδους, και τη μεταφορά τεράστιων ποσοτήτων προϊόντων διάβρωσης (κροκάλες, άμμος και ιλύς) που αποτέθηκαν στις κοιλάδες των μεγάλων ποταμών και στο χώρο της Μεσαορίας.



Σχ. 47: Σχηματική απεικόνιση της δημιουργίας των οφιολίθων του Τροόδους (Α) και της γεωλογικής εξέλιξης της Κύπρου (Β - Δ). (Από Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΣΟΛΕΑΣ

#### 6.1. Λιθοστρωματογραφία

Τόσο η θέση του φράγματος όσο και η περιοχή του ταμιευτήρα τοποθετούνται στο ηφαιστειακό σύμπλεγμα των οφιολίθων του Τροόδους. Τα πετρώματα της κατώτερης σειράς των pillow λαβών εμφανίζονται σε όλη την περιοχή της έρευνας. Η σειρά αυτή χαρακτηρίζεται από ροές λάβας που παρεμβάλλονται από φλέβες και κοίτες βασαλτικής κυρίως σύστασης. Οι pillow λάβες έχουν σφαιρικό ή ελλειψοειδές σχήμα, με το μέγεθός τους να ξεπερνά το 1m σε διάμετρο και με εμφανή περιθώρια ψύξης. Χαρακτηριστικό των εμφανίσεων αυτών είναι η κατά τόπους έντονη κυψελοειδής υφή, μικρής - ενδιάμεσης κοκκομετρίας, με καστανό έως υποκίτρινο χρώμα όταν είναι αποσαθρωμένες και πρασινότερο όταν είναι υγιείς. Οι κυψέλες (χάσματα) είναι κυρίως γεμάτες με ζεόλιθο ή ασβεστίτη. Το ορυκτό κελαδονίτης, πολύ χαρακτηριστικό από το λαμπερό πράσινο χρώμα του, συνδέεται με αυτές τις λάβες. Στις κατώτερες pillow λάβες συναντώνται επίσης χαλκοπυρίτης, σιδηροπυρίτης ή άλλα πυριτικά ορυκτά. Οι σχισμές – ρωγμές σε αυτά τα πετρώματα, όταν είναι πληρωμένες, περιέχουν πυριτικό υλικό, ασβεστίτη ή άλλα ορυκτά (π.χ. χλωρίτης). Κοντά στην επιφάνεια του εδάφους είναι ανοικτές ή γεμάτες με ιλύ και άργιλο. Τα πλουτωνικά πετρώματα που παρεμβάλλονται μέσα στις κατώτερες μαξιλαροειδείς λάβες, ταξινομούνται σε 2 ομάδες:

- α) τις μικρές και ακανόνιστες διεισδύσεις των βασαλτικών κοιτών μικρής κλίσης και
- β) τις μεγάλες φλέβες διεύθυνσης Β – Ν κυρίως, με μεγάλη γωνία κλίσης προς τα Δυτικά.

Και οι δύο ομάδες αναγνωρίζονται εύκολα στην ύπαιθρο αφού είναι πιο ανθεκτικές στη διάβρωση και τέμνουν εγκάρσια τις εμφανίσεις των λαβών.

Οι επιφανειακές αποθέσεις αποτελούνται από σχετικά μικρού πάχους αλλουβιακές αποθέσεις με ιλυοαμμώδη χαλίκια, καθώς και από κολλούβια και υλικά διάβρωσης των λαβών. Το αποσαθρωμένο τμήμα του βράχου και τα υλικά διάβρωσης είναι οι πιο εκτεταμένοι επιφανειακοί σχηματισμοί στην περιοχή της έρευνας. Οι αλλουβιακές αποθέσεις εμφανίζονται κατάντη του φράγματος και εκτείνονται σε όλο το πλάτος, 10 - 28m, του ρέματος Αργάκι και της κοίτης πλημμυρών. Η έκτασή τους διακρίνεται πιο καθαρά στο γεωλογικό χάρτη της θέσης του φράγματος και του ταμιευτήρα (Σχ. 34), ενώ το πάχος τους δεν αναμένεται να είναι πάνω από 3 – 4 m. Τα κολλούβια αποτελούνται από γωνιώδη τεμάχια των λαβών, ενσωματωμένα σε ένα καστανό υλικό από ιλυώδη άμμο. Φακοί από λεπτομερές

υλικό (ιλύ - άργιλο) περιέχονται επίσης μέσα σ' αυτό το μίγμα. Οι κολλουβιακές αποθέσεις συναντώνται στο δεξί και αριστερό αντέρεισμα κατάντη του άξονα του φράγματος, καθώς και στην περιοχή του ταμιευτήρα. Το πάχος τους δεν αναμένεται να είναι πάνω από 5m.

Η αφαίρεση της βλάστησης και της φυτικής γης καθώς και η εκσκαφή των έντονα αποσαθρωμένων επιφανειακών πετρωμάτων, μέχρι βάθος περίπου 1m και στα δύο αντερείσματα, θεωρείται απαραίτητη κάτω από τη θέση θεμελίωσης του φράγματος. Η εκσκαφή του πυρήνα (core trench) εκτελέστηκε σε όλο το μήκος του άξονα φράγματος με σκοπό είναι να απομακρύνει τις επιφανειακές αποθέσεις οι οποίες θεωρούνται ιδιαίτερα συμπιεστοί και διαπερατοί σχηματισμοί. Το μέσο πάχος αυτών των αποθέσεων εκτιμάται μεταξύ 4 - 5m. Το πλάτος της θα πρέπει να περιλαμβάνει τις ζώνες φίλτρων που γειτνιάζουν με τη ζώνη του αργιλικού πυρήνα και αποτελούν ουσιαστικά το σώμα του φράγματος. Η αφαίρεση των έντονα αποσαθρωμένων και θρυμματισμένων λαβών θεωρείται επίσης απαραίτητη γιατί τα κερματισμένα μέλη γεμίζουν με άργιλο που εμποδίζει την αποτελεσματική κατασκευή της διαφραγματικής κουρτίνας.

## 6.2. Τεκτονική

Ένα κυρίως ρήγμα διασχίζει, από βορρά προς νότο, την περιοχή της θέσης του φράγματος ακολουθώντας περίπου τη διαδρομή του καναλιού Αλουπότρυπες Αργάκι. Ένα δευτερεύον ρήγμα ακολουθεί έναν παράπλευρο κλάδο του ρέματος στο δυτικό κομμάτι του ταμιευτήρα (Σχ. 34). Από τις ερευνητικές γεωτρήσεις προκύπτει η παρουσία διατμητικών ζωνών με περιορισμένο πλάτος 10 - 30cm. Σε αυτές τις ζώνες συνήθως απαντώνται λατυποπαγείς λάβες ή ιλυοαργιλώδη υλικά. Εκτενείς μετρήσεις της βύθισης και παράταξης των φλεβών έδειξαν μια γενική κλίση προς ΔΒΔ. Η επικρατούσα γωνία κλίσης στο αριστερό αντέρεισμα είναι  $70^{\circ}$  -  $80^{\circ}$ , ενώ στο δεξί αντέρεισμα είναι  $50^{\circ}$  -  $60^{\circ}$ . Πιστεύεται ότι η γωνία κλίσης των φλεβών στο δεξί αντέρεισμα επηρεάστηκε από το κυρίως ρήγμα που αναφέρθηκε πιο πάνω. Κάποιες μετρήσεις κοντά στα δύο ρήγματα έδειξαν βύθιση προς τα ανατολικά, προφανώς επηρεασμένη από τη δράση των δύο ρηγμάτων. Λεπτομέρειες όλων των μετρήσεων δίνονται στο γεωλογικό χάρτη του φράγματος (Σχ. 34). Οι φλέβες και οι κοίτες που παρεμβάλλονται μέσα στις λάβες διακλαδώνονται κυρίως κάθετα στην παράταξή τους, ενώ στις λάβες η διακλάδωση είναι συνήθως ακτινωτή στη μαξιλαροειδή μορφή και κionoειδής στη μη μαξιλαροειδή μορφή.

## 6.3. Γεωμορφολογία

Η κοιλάδα της Σολέας παρουσιάζει ανάπτυξη προς Βορρά και η μορφολογία της περιοχής ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από τις λιθολογικές μονάδες και την τεκτονική δομή. Οι pillow λάβες που αποσαθρώνονται πιο εύκολα, οδηγούν σε ήπιο ανάγλυφο που χαρακτηρίζεται από μέτριες κλίσεις. Οι πιο ανθεκτικές στη διάβρωση φλέβες και κοίτες,

προβάλλουν σαν απότομα τοιχώματα και αναπτύσσονται τοπικά σαν ακανόνιστο ανάγλυφο. Οι κλίσεις που καθορίζουν τα όρια της θέσης του φράγματος είναι μεγάλες καθώς διατέμνονται από χαράδρες. Σε κάποιες άλλες θέσεις όμως οι κλίσεις είναι σχετικά ομαλές.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΣΟΛΕΑΣ

#### 7.1. Κερματισμός της βραχομάζας

Ο κερματισμός της βραχομάζας εκτιμήθηκε μέσω του δείκτη ποιότητας βράχου ή δείκτη κερματισμού R.Q.D. (Rock Quality Designation, Deere et al., 1967) ο οποίος βρίσκει εφαρμογή μόνο σε βραχώδεις σχηματισμούς. Όλοι οι πυρήνες με μήκος μεγαλύτερο των 10cm αθροίζονται και το συνολικό τους μήκος εκφράζεται σαν εκατοστιαία αναλογία του συνολικού μήκους της πυρηνοληψίας. Για την ταξινόμηση της βραχομάζας με βάση το δείκτη αυτό χρησιμοποιείται ο πίνακας 12.

Πίνακας 12: Χαρακτηρισμός βραχομάζας από τιμές R.Q.D.

| RQD (%)  | Χαρακτηρισμός                                            |
|----------|----------------------------------------------------------|
| 0 – 25   | Πολύ κακής ποιότητας βραχομάζα (ισχυρά χαλαρωμένη)       |
| 25 – 50  | Κακής ποιότητας βραχομάζα (ισχυρά κατατμημένη)           |
| 50 – 75  | Μέσης ποιότητας βραχομάζα (μέτρια κατατμημένη)           |
| 75 – 90  | Καλής ποιότητας βραχομάζα (ελαφρά κατατμημένη)           |
| 90 - 100 | Πολύ καλής ποιότητας βραχομάζα (πολύ ελαφρά κατατμημένη) |

Η πλειοψηφία των τιμών R.Q.D. στις γεωτρήσεις της θέσης θεμελίωσης του φράγματος αντιστοιχούν σε βραχομάζα καλής ποιότητας έως και πολύ κακής ποιότητας. Συγκεκριμένα, πολύ κακής έως κακής ποιότητας βραχομάζα παρουσιάζεται στη Γ14 σε βάθος 0 - 13,8 m, στη Γ12 σε βάθος 0 - 22,5 m, στη Γ11 σε βάθος 0 - 6,2 m και 43 - 51,4 m, στη Γ15 σε βάθος 0 - 10,8 m, στη Γ4 σε βάθος 0 - 13,2 m και 22,8 - 35 m, στη Γ16 σε βάθος 0 - 11 m και 24,3 - 34,8 m και στη Γ5 σε βάθος 0 - 6,4 m. Κακή έως μέσης ποιότητας βραχομάζα συναντάται στη Γ14 σε βάθος 13,8 - 30,15 m, στη Γ12 σε βάθος 22,5 - 40,1 m, στη Γ11 σε βάθος 6,2 - 10m, στη Γ15 σε βάθος 21,5 - 50,3 m και στη Γ5 σε βάθος 6,4 - 28,7 m. Μέσης έως καλής ποιότητας βραχομάζα συναντάται στη Γ4 σε βάθος 13,2 - 22,8 m και στη Γ16 σε βάθος 11 - 24,3 m. Καλής έως πολύ καλής ποιότητας βραχομάζα παρουσιάζεται στη Γ11 σε βάθος 10 - 43 m και 51,4 - 55 m, στη Γ15 σε βάθος 10,8 - 21,5 m και στη Γ5 στο βάθος των 28,7 - 30 m.

Η ομαδοποίηση των τιμών R.Q.D. παρουσιάζεται στο σχήμα 48α. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι η βραχομάζα στο πρώτο τμήμα (αριστερό αντέρεισμα) παρουσιάζεται ως κακής ποιότητας. Στο μέσο περίπου της τομής και προς το δεξί αντέρεισμα η βραχομάζα είναι μέσης ποιότητας, ενώ στο υπόλοιπο κομμάτι εμφανίζεται ως καλής ποιότητας. Συμπερασματικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι η βραχομάζα στο αριστερό αντέρεισμα είναι

πολύ διαρρηγμένη (κατατμημένη), ενώ στο υπόλοιπο τμήμα ο κερματισμός είναι μικρότερος.

Η σειρά με την οποία αναφέρονται οι γεωτρήσεις είναι βάσει της θέσης τους πάνω στον άξονα θεμελίωσης του φράγματος, έτσι ώστε να έχουμε όσο το δυνατό καλύτερη αντίληψη της κατάστασης που επικρατεί στη βραχώμαζα στη θέση αυτή. Η θέση των γεωτρήσεων φαίνεται στο γεωλογικό χάρτη που παρατίθεται στο σχήμα 34.

## 7.2. Ασυνέχειες της βραχώμαζας

Η βραχώμαζα είναι σαφώς επηρεασμένη από έντονη διάρρηξη στη θέση θεμελίωσης και λόγω αυτού οι pillow λάβες εμφανίζονται έντονα έως πλήρως διαρρηγμένες, όπως αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Σε μερικές μάλιστα γεωτρήσεις η διάρρηξη και ο κερματισμός τους είναι πλήρης. Αυτό παρατηρείται στη Γ12 σε βάθος 13,8 - 14,4 m, 21,3 - 21,7 m και 22,2 - 22,5 m, στη Γ11 σε βάθος 15,0 - 15,3 m, 16,9 - 17,3 m, 19,9 - 20,0 m, 43,3 - 43,8 m, 47,8 - 48,2 m και 49,3 - 50,1 m, στη Γ15 σε βάθος 0,0 - 1,9 m, 2,75 - 3,0 m και 5,2 - 5,8 m, στη Γ4 σε βάθος 7,2 m, 8,8 - 9,5m, 10,0 - 10,8 m, 26,8 - 27,3 m και 27,7 - 28,2 m και στη Γ5 σε βάθος 0,0 - 2,6 m και 3,4 - 4,6 m. Ο πλήρης κερματισμός πιθανόν να οφείλεται στις ζώνες διάτμησης που προκαλούνται από τη δράση των γειτονικών ρηγμάτων. Μόνο σε μερικές γεωτρήσεις παρατηρείται μέτριος βαθμός διάρρηξης. Αυτές είναι η Γ14 σε όλο της το μήκος, η Γ12 σε βάθος 23,5 - 40,1 m, η Γ11 σε βάθος 6,2 - 55,0 m εκτός από τοπικές παρεμβολές με έντονη διάρρηξη όπως αναφέρονται πιο πάνω, στη Γ15 σε βάθος 12,5 - 24,0 m και σε βάθος 26,0 - 50,3 m όπου υπάρχουν όμως και τοπικές παρεμβολές από πλήρη κερματισμό και στη Γ5 σε βάθος 14,7 - 19,3 m.

Λατυποπαγείς λάβες απαντώνται σε διάφορες γεωτρήσεις και το πιθανότερο είναι να συνδέονται και αυτές με ζώνες διάτμησης. Τέτοιες συναντάμε στη Γ12 σε βάθος 3,1 - 3,3 m, 5,3 - 6,2 m, 8,0 - 8,2 m, 11,1 - 11,3 m και 14,4 - 15,3 m, στη Γ11 σε βάθος 15,9 - 16,2 m, 15,9 - 24,5 m και 29,0 - 45,0 m, στη Γ15 σε βάθος 7,6 - 8,2 m, 10,8 - 12,3 m και τοπικές ζώνες από λατυποπαγή πέραν των 41,0 m, στη Γ4 σε βάθος 12,7 - 13,0 m και 21,0 - 21,3 m, στη Γ16 σε βάθος 11,4 - 12,4 m, 17,0 - 18,4 m, 20,6 - 21,3 m, 24,6 - 25,0 m, 27,0 - 27,7 m και 30,0 - 31,5 m και στη Γ5 σε βάθος 6,0 - 7,7 m, 8,9 - 9,3 m, 9,6 - 11,6 m, 12,5 - 12,9 m, 13,7 - 14,7 m και 19,4 - 20,0 m.

Πολλές ασυνέχειες είναι λείες με στιλβωμένες επιφάνειες και σαπωνοειδή υφή όπως π.χ. στη γεώτρηση Γ4 σε βάθος 18,4 m.

Διατμητικές ζώνες απαντώνται σε πολλές γεωτρήσεις με μεταβλητό πάχος που κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά μέχρι μερικά εκατοστά. Τέτοιων ειδών ζώνες συναντάμε στη Γ12 σε βάθος 14,4 - 14,9 m και 21,7 - 22,5 m, στη Γ11 σε βάθος 4,8 - 5,1 m, 5,7 - 6,2 m, 8,0 - 8,05 m, 9,30 - 9,35 m, 31,8 - 32,0 m και 32,6 - 32,7 m, στη Γ15 σε βάθος 26,0 - 26,8 m, 29,2 - 29,4 m, 29,7 - 30,3 m, 34,9 - 35,1 m, 37,2 - 38,2 m, 41,5 - 41,7 m, 42,2 - 42,4 m και 49,5 - 49,7 m, στη Γ4 σε βάθος 10,0 - 10,8 m και 26,8 - 27,2 m και στη Γ5 σε βάθος 3,3 - 4,0m, 5,3

- 6,0 m, 19,6 - 19,8 m, 22,4 - 23,0 m, 25,0 - 25,4 m, 25,6 - 25,7 m, 26,0 - 28,3 m και 28,5 - 28,8 m. Χαρακτηριστική είναι επίσης η παρουσία ερυθρού σχιστόλιθου με γράμμωση ολίσθησης στη Γ12 σε βάθος 12,2 - 12,3 m η οποία οφείλεται είτε στη δράση κάποιου ρήγματος είτε να αποτελεί μια παλιά επιφάνεια ολίσθησης. Επίσης, γράμμωση ολίσθησης παρατηρείται σε ρωγμές στη Γ16 σε βάθος 21,7 και 34,6 m.

Ο ασβεστίτης είναι το πιο κοινό δευτερογενές υλικό πλήρωσης στις ασυνέχειες (ρωγμές). Σε μερικές περιπτώσεις δρα σαν «επουλωτικό» αποκαθιστώντας σε κάποιο βαθμό τη θραύση του πετρώματος. Επίσης σαν υλικό πλήρωσης συναντάται αργιλικό υλικό, ενώ τοπικά σιδηροπυρίτης και χλωρίτης. Τοπικά οι ρωγμές είναι οξειδωμένες και εμφανίζονται με ομαλές ή κυματοειδείς επιφάνειες. Οι ασυνέχειες περιγράφονται στα έντυπα καταγραφής των γεωτρήσεων στη στήλη «διάστημα θραύσεων πυρήνα (fracture spacing)» σε λογαριθμική κλίμακα (σε mm) που εκφράζει την απόσταση των ασυνεχειών που παρουσιάζονται σε ένα τυχαίο μήκος ομοιογενούς πετρώματος. Στη συνέχεια γίνεται η αναγωγή του σε συντελεστή ρωγμάτωσης ( $k$ ) που εκφράζει τη μέση απόσταση αυτών των ασυνεχειών. Στο σχήμα 48β γίνεται μια ομαδοποίηση του συντελεστή ρωγμάτωσης, όπως αυτός προκύπτει από τις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις του φράγματος Σολέας, με βάση την κατάταξη του πίνακα 13.

Ο συντελεστής ρωγμάτωσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k = \frac{n}{L} \text{ (m}^{-1}\text{)} \quad (30)$$

όπου:

$n$  = πλήθος ασυνεχειών.

$L$  = μήκος προσανατολισμένης ευθείας.

Πίνακας 13: Ταξινόμηση βραχόμαζας με βάση την πυκνότητα των ασυνεχειών της.

| Χαρακτηρισμός           | Απόσταση διακλάσεων (m) | Συντελεστής ρωγμάτωσης $k$ (m <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|
| Πολύ ελαφρά διαρρηγμένη | > 2                     | < 0,5                                         |
| Ελαφρά διαρρηγμένη      | 2 – 0,6                 | 0,5 – 1,7                                     |
| Μέτρια διαρρηγμένη      | 0,6 – 0,2               | 1,7 – 5                                       |
| Έντονα διαρρηγμένη      | 0,2 – 0,06              | 5 – 17                                        |
| Πλήρως διαρρηγμένη      | <0,06                   | > 17                                          |

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εξέταση του συντελεστή ρωγμάτωσης στην θέση θεμελίωσης του φράγματος, δείχνουν ότι η βραχόμαζα είναι έντονα διαρρηγμένη σε όλο σχεδόν το εύρος της, με εξαίρεση ένα μικρό τμήμα στους πρόποδες του αριστερού αντερείσματος και ένα τμήμα στο δεξί αντέρεισμα.

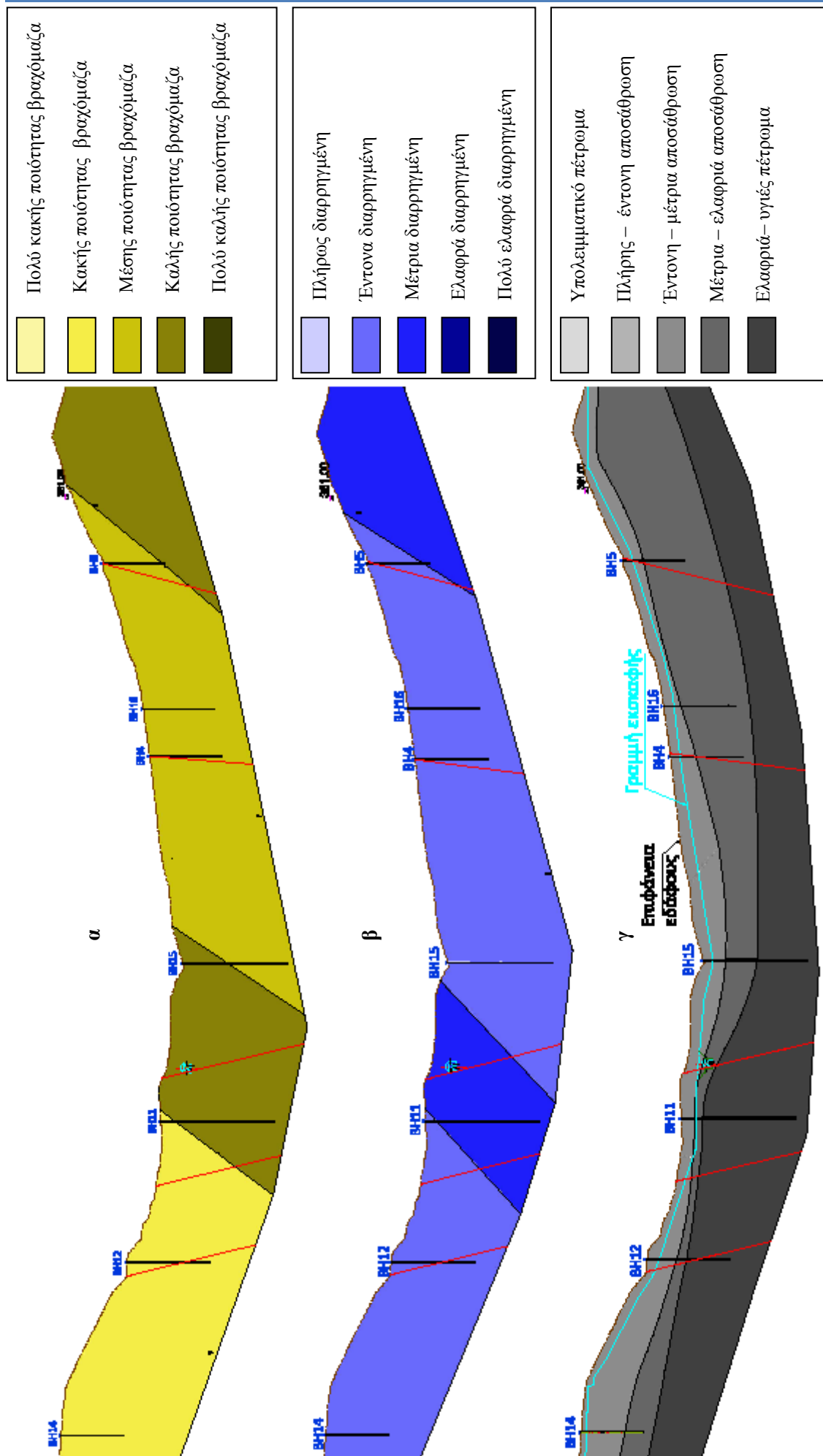
### 7.3. Αποσάθρωση

Ο βαθμός αποσάθρωσης των βραχωδών σχηματισμών όπως προτάθηκε από την I.S.R.M (International Society for Rock Mechanics) το 1981 δίνεται στον πίνακα 14.

Πίνακας 14: Βαθμός αποσάθρωσης βραχωδών σχηματισμών (κατά ISRM, 1981).

| Κατηγορία πετρώματος           | Περιγραφή                                                                                      | Βαθμός αποσάθρωσης |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Υγιές πέτρωμα                  | Χωρίς ίχνη αποσάθρωσης                                                                         | I                  |
| Ελαφρά αποσαθρωμένο            | Η αποσάθρωση περιορίζεται μόνο στις επιφάνειες των ασυνεχειών (αποχρωματισμός)                 | II                 |
| Μέτρια αποσαθρωμένο            | Έντονη αποσάθρωση στις επιφάνειες των ασυνεχειών και ελαφρά αποσάθρωση στη μάζα του πετρώματος | III                |
| Έντονα αποσαθρωμένο            | Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του πετρώματος, με τοπική ευθρυπτότητα του υλικού               | IV                 |
| Πλήρως αποσαθρωμένο            | Πλήρης αποσάθρωση και μεγάλη ευθρυπτότητα του υλικού, με διατήρηση της υφής και της δομής      | V                  |
| Υπολειμματικό πέτρωμα / έδαφος | Η υφή και η δομή υλικού έχει καταστραφεί και μπορεί να χαρακτηριστεί σαν έδαφος                | VI                 |

Οι υπόγειες έρευνες καθώς και οι παρατηρήσεις πεδίου, δείχνουν ότι η αποσάθρωση επηρεάζει τα πετρώματα σε σχετικά μεγάλα βάθη τόσο στη θέση θεμελίωσης όσο και στον ταμιευτήρα του φράγματος. Η βραχώμαζα στη θέση του φράγματος παρουσιάζει μεταβλητό βάθος αποσάθρωσης. Έτσι στη Γ14 φτάνει σε βάθος 21,4 m, στη Γ12 σε βάθος 14,4 m, στη Γ11 και Γ16 σε βάθος 6,2 - 8,0 m και στη Γ15, Γ4 και Γ5 σε βάθος από 9,5 - 12 m. Η ομαδοποίηση της αποσάθρωσης από τα αποτελέσματα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων δίνεται στο σχήμα 47γ.



Σχ. 48: Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων της υπόγειας έρευνας στο φράγμα Σολέας. α) Δείκτης κεραματισμού R.Q.D., β) ρωγμότητας, γ) Βαθμός αποσάθρωσης. Οι κόκκινες γραμμές αντιστοιχούν σε κανονικό ρήγμα. Κλίμακα 1:2000

#### 7.4. Διαπερατότητα (από επί τόπου δοκιμές εισπίεσης νερού)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το φράγμα θεμελιώνεται πάνω στη σειρά των κατώτερων μαξιλαροειδών λαβών του οφιολιθικού συμπλέγματος του Τροόδους, όπως και η λεκάνη του ταμειυτήρα. Από τη φύση τους τα πετρώματα αυτά θεωρούνται αδιαπέρατα (στεγανά), χωρίς πρωτογενές πορώδες. Επομένως, το υπόβαθρο θεμελίωσης αποτελεί κατά γενική ομολογία μια ευνοϊκή θέση για την κατασκευή και λειτουργία του φράγματος. Παρ' όλα αυτά, η έντονη τεκτονική καταπόνηση που έχει υποστεί κατά τη γεωλογική του ιστορία προκάλεσε τη δημιουργία πληθώρας ασυνεχειών και έντονο κερματισμό στη μάζα του. Σε συνδυασμό με την επιφανειακή αποσάθρωση και την παρουσία κανονικών ρηγμάτων, η διαπερατότητα παρουσιάζεται αυξημένη και έτσι κρίνεται αναγκαίο να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα στεγανοποίησης.

Οι δοκιμές εισπίεσης νερού (Lugeon tests) έγιναν σε όλες τις ερευνητικές γεωτρήσεις της θέσης θεμελίωσης του φράγματος για την αξιολόγηση της διαπερατότητας της βραχόμαζας. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά πέντε στάδια πίεσης, τρία σε αύξουσα σειρά και δύο σε φθίνουσα. Σε κάθε στάδιο αντιστοιχεί ένα ζεύγος τιμών πίεσης  $P$  - απορρόφησης νερού  $Q$  το οποίο απεικονίζεται σε διάγραμμα  $Q=f(P)$ . Η σύνταξη των διαγραμμάτων αυτών δίνει πληροφορίες για τη συμπεριφορά της βραχόμαζας κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Το μήκος του δοκιμαζόμενου τμήματος κυμαίνεται από 1,5 έως 5 m. Η πίεση που ασκείται σε κάθε στάδιο αυξάνεται ανάλογα με το βάθος της δοκιμής. Η διαδικασία εκτέλεσης περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.5. Τα αποτελέσματα της απορρόφησης μετατρέπονται σε τιμές Lugeon (σχέση 27).

Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε αντλία με μέγιστη ικανότητα 58,4lit/5min. Σε μερικά τμήματα της γεώτρησης δεν έγινε εφικτός ο έλεγχος της διαπερατότητας της βραχόμαζας γιατί η διαπερατότητα της ήταν τόσο υψηλή που δεν μπορούσε να καταγραφεί πίεση με τη μέγιστη ικανότητα της αντλίας. Με βάση το κριτήριο Lugeon (1933) (σελ. 25) λαμβάνεται σαν οριακή τιμή απώλειας νερού το 1-2 lit/min.min σε πίεση 10 kg/cm<sup>2</sup>. Επομένως, όταν η απορρόφηση σε Lugeon κυμαίνεται μεταξύ 0 - 2 U.L. τότε η βραχόμαζα θεωρείτο στεγανή και κατάλληλη για θεμελίωση χωρίς κανένα μέτρο στεγανοποίησης, ενώ σε τιμές μεγαλύτερες από 2 U.L. είναι απαραίτητα τα μέτρα στεγανοποίησης με κουρτίνα και τάπητα τσιμεντενέσεων.

Το υδρογεωλογικό καθεστώς της περιοχής ελέγχεται από τα οφιολιθικά πετρώματα και τις ασυνέχειές τους. Η στάθμη του υπόγειου νερού συναντήθηκε κατά τη διάρκεια της διάτρησης σε όλες τις ερευνητικές γεωτρήσεις κατά μήκος του προτεινόμενου άξονα του φράγματος. Κατά τη διάρκεια της διάτρησης των γεωτρήσεων μετριοτάνα συνεχώς η πιεζομετρική στάθμη μέσα στις γεωτρήσεις με σκοπό να λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της πραγματικής πίεσης που δεχόταν το δοκιμαζόμενο τμήμα κατά τη δοκιμή εισπίεσης νερού. Μετά την ολοκλήρωση της γεώτρησης, κάθε μια από αυτές μετατρέπεται σε

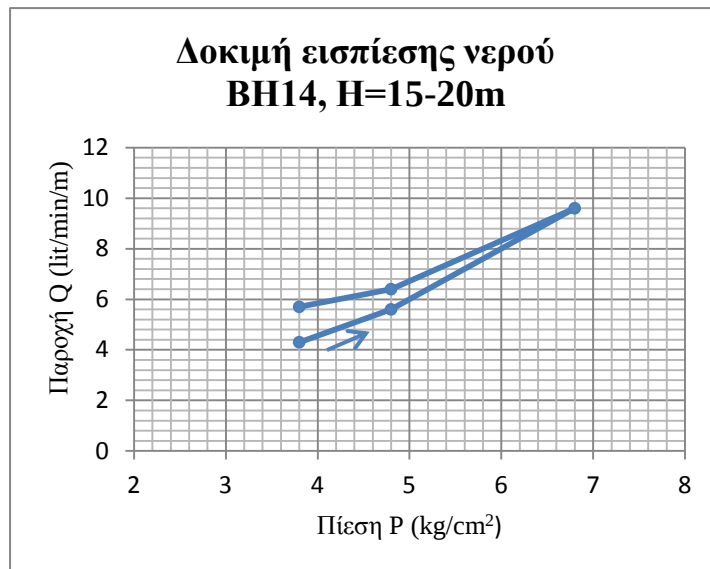
πιεζόμετρο παρατήρησης εγκαθιστώντας σωλήνα διαμέτρου 1'' (25,4 mm), διάτρητη ως το κάτω άκρο και με κατάλληλο περιμετρικό χαλικόφιλτρο. Μετρήσεις της στάθμης του υπόγειου νερού θα λαμβάνονται μια φορά το μήνα προκειμένου να καθοριστεί η επικρατούσα κατάσταση του υπόγειου νερού.

Η ομαδοποίηση των τιμών Lugeon από τις ερευνητικές γεωτρήσεις φαίνεται στο σχήμα 49α όπου διακρίνεται η διαπερατότητα να παίρνει σχετικά πολύ υψηλές τιμές ακολουθώντας περίπου το βάθος της έντονης αποσάθρωσης. Ο διαχωρισμός των τιμών Lugeon είναι: 0 - 5Lu, 5 - 10Lu, 10 - 20Lu, 20 - 30Lu, 30 - 40Lu, >40Lu. Λόγω της πολύ μεγάλης απορρόφησης νερού κατά τις δοκιμές Lugeon και σε συνδυασμό με την έντονη αποσάθρωση των επιφανειακών στρωμάτων, κρίθηκε αναγκαία η εκσκαφή του υπεδάφους κατά μήκος του άξονα του φράγματος. Σκοπός της εκσκαφής, η οποία έχει ένα μέσο πάχος 4 - 6m, είναι η αφαίρεση όλων επιφανειακών αποθέσεων και της πολύ αποσαθρωμένης και διαρρηγμένης βραχώμαζας, που θεωρούνται πολύ διαπερατοί και συμπιεστοί σχηματισμοί. Δεδομένου ότι τα επιφανειακά στρώματα θα αφαιρεθούν, δεν γίνεται αξιολόγηση της διαπερατότητας αυτού του τμήματος. Στη γεώτρηση Γ4 η βραχώμαζα εμφανίζεται συμπαγής (άρρηκτη) με μηδενική παροχή σε όλο της το βάθος. Στη Γ14 η διαπερατότητα είναι μικρότερη από 5 Lugeon μετά από τα 20 m, στη Γ12 και στη Γ11 είναι μικρότερη από 5 Lugeon μετά τα 10 m, ενώ στη Γ15, Γ16 και Γ5 είναι μικρότερη μετά τα πρώτα 5 m.

Σε όλες σχεδόν τις γεωτρήσεις παρατηρούνται τμήματα όπου η απορρόφηση νερού είναι μηδενική, το οποίο σημαίνει ότι η βραχώμαζα σε αυτά τα τμήματα είναι πρακτικά αδιαπέρατη. Τέτοια συναντάμε στη Γ12 σε βάθος 20 - 40,1 m, στη Γ11 σε βάθος 15 - 45 m και 50 - 55 m, στη Γ15 σε βάθος 5 - 34,8 m, στη Γ4 σε όλο το βάθος, στη Γ16 σε βάθος 10 - 15 m και 25 - 34,8 m και στη Γ5 σε βάθος 15 - 30 m. Εν αντιθέσει, υπάρχουν τμήματα, κυρίως κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, όπου η διαπερατότητα είναι τόσο υψηλή που ήταν αδύνατο να μετρηθεί η απορρόφηση νερού. Τέτοια απαντώνται στη Γ14 σε βάθος 1,5 - 5 m και στη Γ11 σε βάθος 5 - 10 m. Για ένα αντιπροσωπευτικό μέγεθος της διαπερατότητας σε κάθε γεώτρηση, υπολογίζεται ο μέσος συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας (σχέση 28). Αυτό αποτελεί ένα μέτρο του μεγέθους της συνολικής (κατακόρυφης και οριζόντιας) διαπερατότητας το οποίο μας δίνει τη δυνατότητα να συγκρίνουμε την υδραυλική αγωγιμότητα στα δύο αντερείσματα και στο πεδινό τμήμα της ζώνης θεμελίωσης του φράγματος.

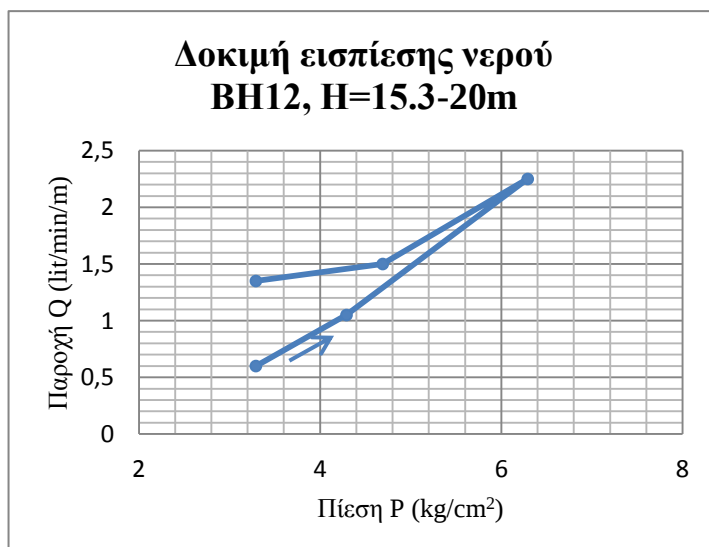
Παρακάτω γίνεται μια αξιολόγηση της διαπερατότητας όπως προκύπτει από τις δοκιμές εισπίεσης νερού. Επίσης, δίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα των διαγραμμάτων απεικόνισης της απορρόφησης σε σχέση με την ολική πίεση για τμήματα των γεωτρήσεων που έγιναν οι δοκιμές εισπίεσης νερού και η αντίστοιχη περιγραφή της συμπεριφοράς της βραχώμαζας. Η απορρόφηση Q είναι εκφρασμένη σε lit/min/m, ενώ η ολική (πραγματική) πίεση P σε kg/cm<sup>2</sup>.

✚ Στη γεώτρηση Γ14 η βραχώμαζα παρουσιάζεται έντονα έως μέτρια αποσαθρωμένη μέχρι το βάθος των 21,4 m. Η συμπεριφορά της κατά τις δοκιμές Lugeon σε βάθος από 5 – 30,15 m είναι περίπου η ίδια και δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Η ροή του νερού γίνεται μέσω των ανοικτών ασυνεχειών μέσα στη μάζα της βραχώμαζας. Μέχρι το βάθος των 25m, οι τιμές των προσλαμβανόμενων ποσοτήτων νερού υπερβαίνουν το όριο του 1 Lugeon, επομένως παρουσιάζεται η ανάγκη για μέτρα στεγανοποίησης τουλάχιστον μέχρι αυτό το βάθος. Ο μέσος συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας υπολογίζεται σε  $1,04 \times 10^{-6}$  m/sec.



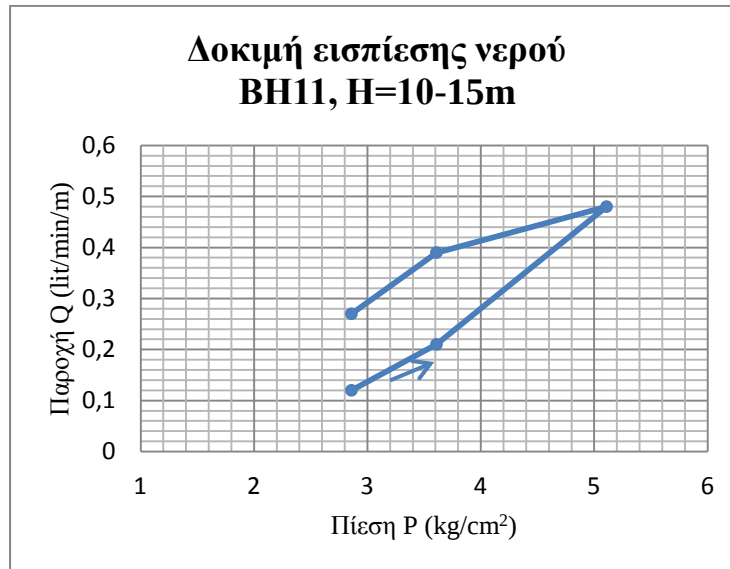
Κατά την εισπίεση εμφανίζεται μια παραμόρφωση της βραχώμαζας, η οποία εν μέρει δεν είναι αντιστρεπτή. Η προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού αυξάνεται στα στάδια ελάττωσης της πίεσης και ίσως να οφείλεται σε διάβρωση των ασυνεχειών.

✚ Η γεώτρηση Γ12 διάτρησε έντονα έως μέτρια αποσαθρωμένη βραχώμαζα μέχρι το βάθος των 14,4m. Μέχρι τα 20m η απορρόφηση νερού είναι μεγαλύτερη του επιτρεπτού ορίου, επομένως επιβάλλονται τα κατάλληλα μέτρα στεγανοποίησης. Η ροή του νερού γίνεται μέσω των ανοικτών ρωγμών ή μέσα από τις αδύνατες ή θρυμματισμένες ζώνες που προκλήθηκαν πιθανώς από κάποια ζώνη διάτμησης. Ο μέσος συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας υπολογίζεται σε  $1,81 \times 10^{-6}$  m/sec.



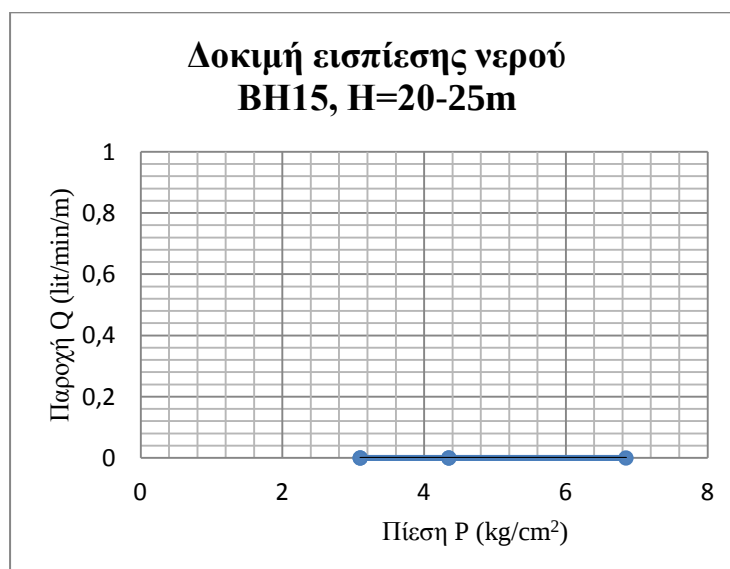
Κατά την εισπίεση εμφανίζεται μια παραμόρφωση της βραχώμαζας, η οποία εν μέρει δεν είναι αντιστρεπτή. Στο 4° στάδιο πίεσης παρατηρείται άνοιγμα των ασυνεχειών που οφείλεται σε θραύση ή ξέπλυμα αυτών και έτσι η παροχή δεν παρουσιάζει αισθητή μείωση με την πίεση.

Η αποσάθρωση στη γεώτρηση Γ11 είναι έντονη έως μέτρια μέχρι τα 6 m. Σε βάθος 2 - 5m η διάτρηση συναντά φλέβες βασάλτη μέτριας αποσάθρωσης. Μέχρι τα 10 m οι απώλειες νερού είναι πάρα πολύ μεγάλες και έτσι είναι αναγκαία η τσιμεντένεση μέχρι το βάθος αυτό. Από 10 - 55m η απορρόφηση νερού είναι μικρότερη από 1 lit/min.m, επομένως η βραχύμαζα είναι πρακτικά αδιαπέρατη και δεν χρειάζονται μέτρα στεγανοποίησης. Ο μέσος συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας υπολογίζεται σε  $4,32 \times 10^{-6}$  m/sec.

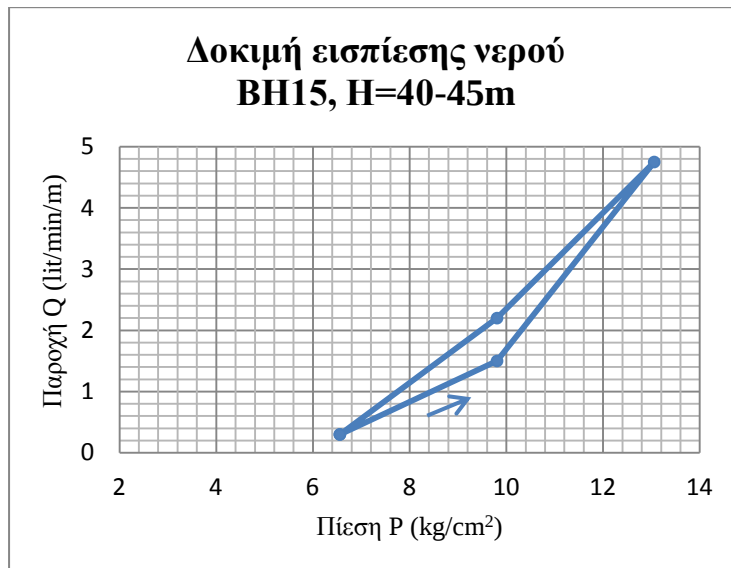


Κατά την εισπίεση εμφανίζεται μια παραμόρφωση της βραχύμαζας, η οποία δεν είναι αντιστρεπτή.

Στη γεώτρηση Γ15 συναντήθηκε έντονα έως μέτρια αποσαθρωμένη βραχύμαζα μέχρι τα 11 m. Από 5 - 35m η πρόσληψη νερού είναι μηδενική που πιθανότατα οφείλεται στη μη υδραυλική επικοινωνία των ασυνεχειών. Ακολούθως, μέχρι τα 50,30m η διαπερατότητα εμφανίζεται πολύ μικρή, μέσα στα πλαίσια των επιτρεπτών ορίων απορρόφησης νερού και ως εκ τούτου δεν αντιμετωπίζονται προβλήματα στεγανοποίησης. Η μικρή ροή του νερού μπορεί να γίνεται μέσω των αδύνατων ζωνών που παρατηρούνται σε αυτό το βάθος. Ο μέσος συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας υπολογίζεται σε  $0,638 \times 10^{-6}$  m/sec.

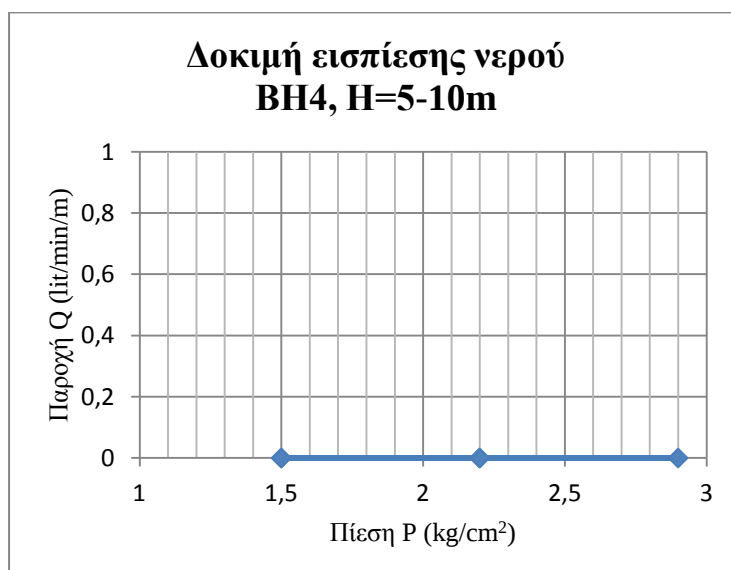


Κατά τη διάρκεια της εισπίεσης δεν παρουσιάζεται καμία μεταβολή στη βραχύμαζα. Η παροχή σε όλα τα στάδια πίεσης είναι μηδενική.



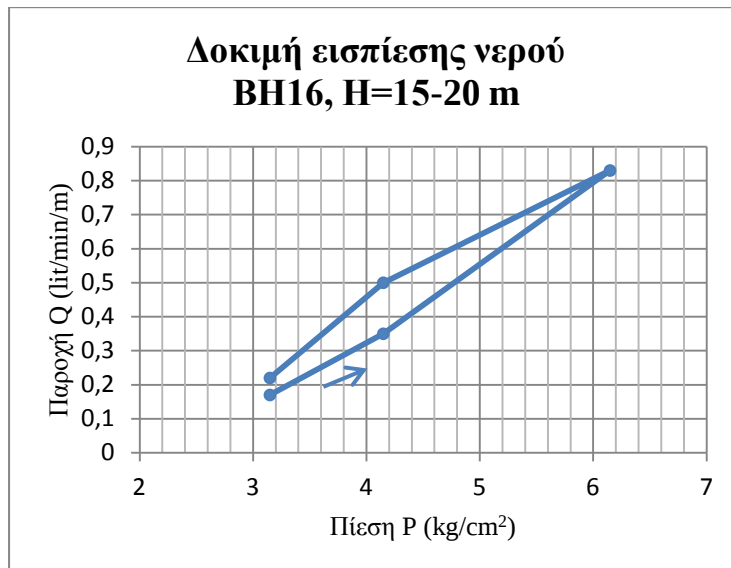
Κατά τη διάρκεια της εισπίεσης εμφανίζεται μια ελαστική παραμόρφωση της βραχώμαζας, η οποία είναι αντιστρεπτή.

✚ Στη γεώτρηση Γ4 η έντονη αποσάθρωση φτάνει μέχρι τα 12m. Παρ' όλα αυτά, η βραχώμαζα εμφανίζεται αρκετά συμπαγής (στεγανή), με μηδενική απορρόφηση σε όλο της το βάθος. Αυτό ίσως να οφείλεται στη μη υδραυλική επικοινωνία των ασυνεχειών και στις τραχείες ή πληρωμένες με ασβεστίτη ρωγμές.



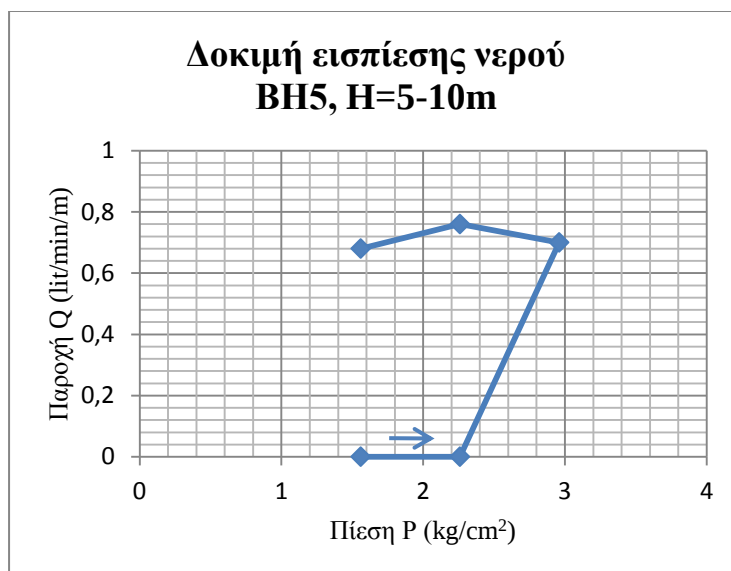
Κατά τη διάρκεια της εισπίεσης δεν παρουσιάζεται καμιά μεταβολή στη βραχώμαζα. Η παροχή σε όλα τα στάδια πίεσης είναι μηδενική και ισχύει για όλο το βάθος της γεώτρησης.

✚ Στη γεώτρηση Γ16, μετά τα 5m σε ελαφρά αποσαθρωμένη βραχώμαζα, η απορρόφηση νερού είναι πολύ μικρή έως μηδενική και δεν ξεπερνά τα επιτρεπτά όριο απωλειών νερού, επομένως δεν εμπνέει κάποια ανησυχία όσο αφορά τη διαπερατότητά της. Η μικρή κυκλοφορία του νερού λαμβάνει χώρα μέσα από τις ρωγμές και τις λατυποπαγείς ζώνες. Ο μέσος συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας υπολογίζεται σε  $1,27 \times 10^{-6}$  m/sec.



Κατά τη διάρκεια της εισπίεσης εμφανίζεται μια παραμόρφωση της βραχώμαζας (πιθανό ξέπλυμα των ασυνεχειών), η οποία εν μέρει είναι αντιστρεπτή.

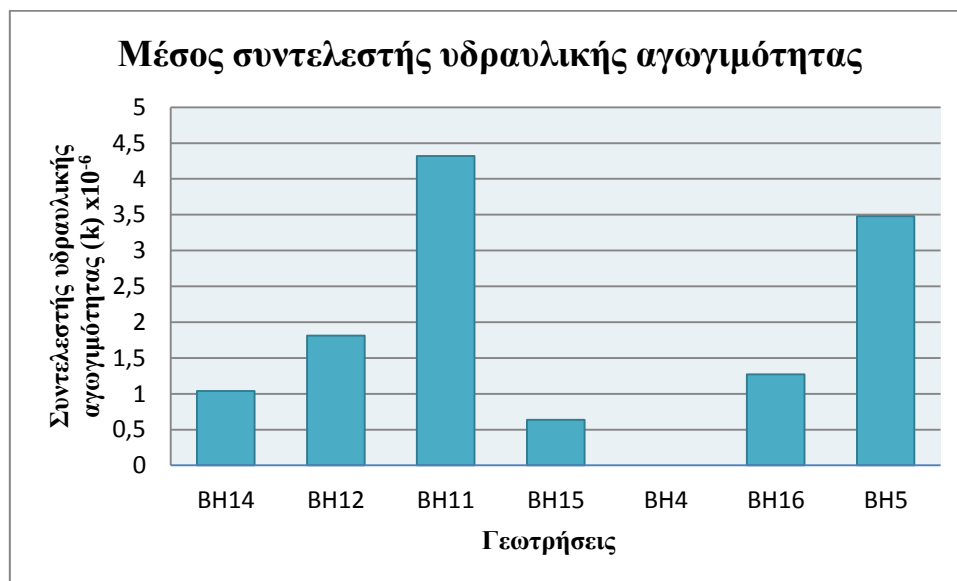
✚ Στη γεώτρηση Γ5 η έντονη έως μέτρια αποσάθρωση περιορίζεται μέχρι τα 14,3m, όπου και οι απορροφήσεις νερού είναι μεγαλύτερες από 1 Lugeon. Ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα της απορρόφησης σε συνάρτηση με την πίεση είναι αυτό που δίνεται παρακάτω όπου οι απώλειες νερού αυξάνονται ακόμα και όταν η πίεση ελαττώνεται. Οι απαιτήσεις για τσιμεντενέσεις περιορίζονται στα πρώτα 15m. Ο μέσος συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας υπολογίζεται σε  $3,48 \times 10^{-6}$  m/sec.



Η ξαφνική αύξηση της προσλαμβανόμενης ποσότητας νερού με αυξανόμενη πίεση δείχνει φαινόμενα θραύσης, ενώ η αυξανόμενη παροχή κατά τη διάρκεια πτώσης της πίεσης (4<sup>ο</sup> στάδιο) αποδίδεται σε φαινόμενα διάβρωσης της βραχώμαζας (ενδεχόμενα χρειάζονται τσιμεντενέσεις). Η παραμόρφωση είναι μη αντιστρεπτή.

Στο σχήμα 50 δίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του μέσου συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας, όπως αυτός υπολογίστηκε για κάθε γεώτρηση. Αυτό που παρατηρείται είναι μια αυξημένη υδραυλική αγωγιμότητα στο αριστερό αντέρεισμα (BH14, BH12, BH11), ενώ στο δεξί αντέρεισμα (BH4, BH16, BH5) φαίνεται να είναι μικρότερη. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι οι κύριοι δρόμοι κυκλοφορίας του νερού είναι

αποκλειστικά μέσω των ασυνεχειών που προκλήθηκαν από την τεκτονική καταπόνηση των σχηματισμών. Επίσης, η παρουσία κανονικών ρηγμάτων μπορεί κατά περίπτωση να ευνοεί την αύξηση της διαπερατότητας όπως και η συχνή παρουσία διατμητικών ζωνών, που εμφανίζονται ως λατυποπαγείς λάβες και θρυμματισμένες ζώνες και επιτρέπουν τη διέλευση του νερού. Οι τιμές Lugeon, όπως προκύπτουν από τις δοκιμές εισπίεσης νερού, δείχνουν ότι η κουρτίνα τσιμεντενέσεων είναι απαραίτητη σε όλο μήκος του άξονα του φράγματος (με εξαίρεση ίσως τη Γ4) για να εξασφαλιστεί η στεγανότητα της θέσης θεμελίωσης. Συγκεκριμένα, το στεγανό διάφραγμα πρέπει να φτάνει μέχρι τα 25 και τα 15m, στην περιοχή των γεωτρήσεων Γ14 και Γ5 αντίστοιχα.



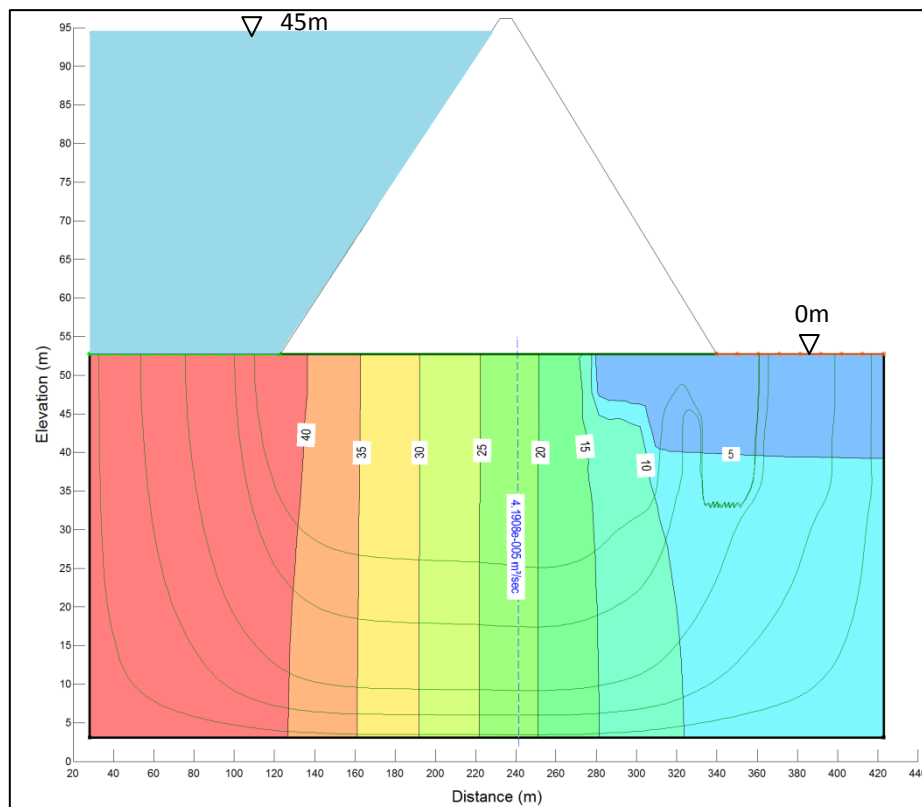
Σχ. 50: Σχηματική απεικόνιση του μέσου συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας της βραχώμαζας κατά μήκος του άξονα της ζώνης θεμελίωσης.

#### 7.4.1. Διαφυγές νερού κάτω από το σώμα του φράγματος

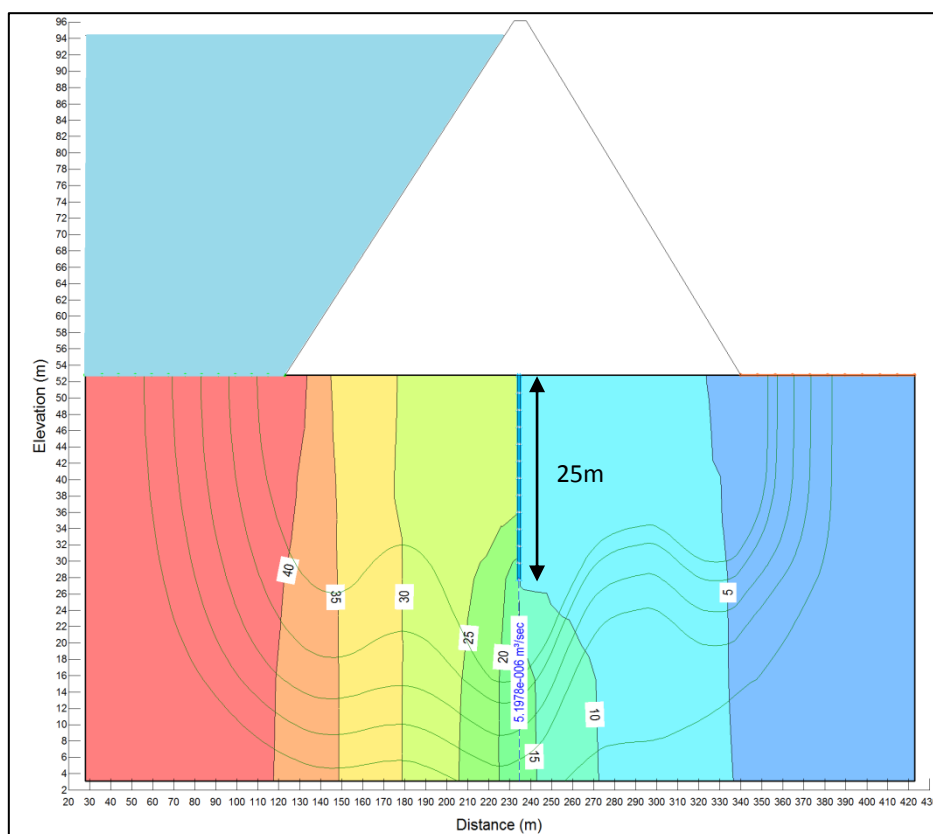
Το δίκτυο υπόγειας ροής του φράγματος Σολέας σχεδιάστηκε με τη βοήθεια του προγράμματος GeoStudio. Ο στόχος της απεικόνισης αυτής είναι να δείξουμε και να συγκρίνουμε την κατάσταση της υπόγειας ροής του νερού κάτω από το φράγμα, πριν και μετά την κατασκευή της στεγανής διαφραγματικής κουρτίνας (cutoff).

Στο σχήμα 51 απεικονίζεται το δίκτυο ροής του υπόγειου νερού πριν από την κατασκευή του στεγανού διαφράγματος. Η διαρροή του νερού κάτω από το φράγμα υπολογίζεται σε  $4,19 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$  ( $3,62 \text{ m}^3/\text{day}$ ). Με δεδομένο ότι η διαφορά στην πιεζομετρική στάθμη ανάντη και κατάντη του φράγματος είναι 45m, τότε το  $\Delta h$  (διαφορά υδραυλικού φορτίου από μια ισοδυναμική γραμμή σε μια άλλη) είναι 5 m. Η υδραυλική αγωγιμότητα του κορεσμένου τμήματος είναι  $5,07 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$ .

Αντίθετα, οι διαφυγές νερού κάτω από το σώμα του φράγματος, μετά την κατασκευή του στεγανού διαφράγματος και χωρίς να ληφθεί υπόψη η κατασκευή του τάπητα τσιμεντενέσεων, υπολογίζονται σε  $5,19 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}$  ( $0,44 \text{ m}^3/\text{day}$ ) (Σχ. 52). Αυτό που επιδιώκεται με την κατασκευή του στεγανού διαφράγματος είναι η αύξηση του μήκους των γραμμών ροής του νερού κατά την παράκαμψή του. Η αύξηση του μήκους ροής προκαλεί τη μείωση της υδραυλικής κλίσης εκατέρωθεν του φράγματος και συνεπώς τη διαφυγή του νερού.



Σχ. 51: Δίκτυο ροής του υπόγειου νερού κάτω από το σώμα του φράγματος.



Σχ. 52: Δίκτυο ροής μετά την κατασκευή της κουρτίνας τσιμεντενέσεων.

### 7.5. Πρωτεύουσες τσιμεντενέσεις

Κατά μήκος του σώματος του φράγματος και στην προέκτασή του εντός των αντρευσμάτων, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 92 πρωτεύουσες (P) τσιμεντενέσεις στεγανοποίησης, που αποτελούν μέρος του ολικού στεγανού διαφράγματος κάτω από τη ζώνη θεμελίωσης του φράγματος. Στις 18 από αυτές εκτελέστηκαν και δοκιμές εισπίεσης νερού. Η μεταξύ τους απόσταση είχε προβλεφθεί να είναι 6m και είναι όλες κατακόρυφες. Εξάιρεση αποτελεί ένα τμήμα του αριστερού αντρείσματος όπου η κουρτίνα τσιμεντενέσεων είναι κεκλιμένη κατά  $15^\circ$  λόγω της μεγάλης διαπερατότητας που εμφανίζει. Σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι οι πρωτεύουσες οπές, καθώς και όλη η κουρτίνα τσιμεντενέσεων, έγινε αφότου προηγήθηκε η απαραίτητη εκσκαφή της θεμελίωσης του πυρήνα και του σώματος του φράγματος. Η ομαδοποίηση της προσλαμβανόμενης ποσότητας νερού (σε Lugeon) στις πρωτεύουσες οπές δίνεται στο σχήμα 49β. Στον πίνακα 15 δίνονται τα υψόμετρα έξι πρωτευουσών οπών τσιμεντενέσεως, όπως αυτά προέκυψαν μετά την εκσκαφή.

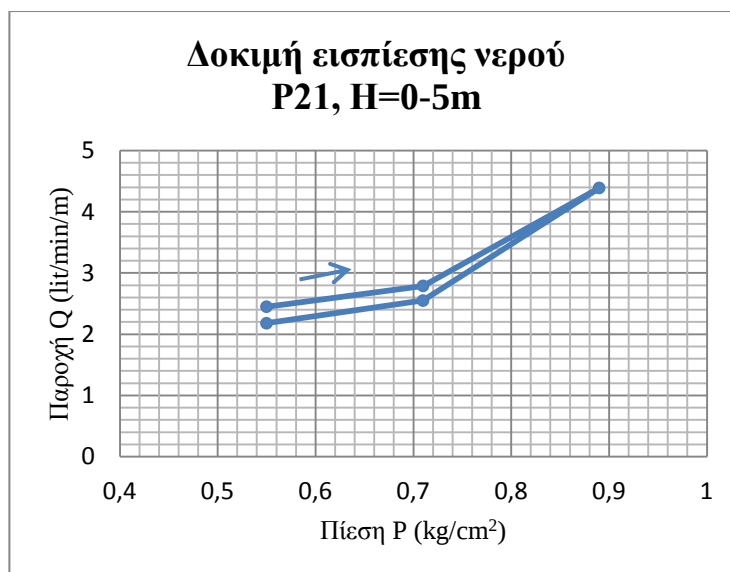
Πίνακας 15: Υψόμετρα πρωτευουσών οπών τσιμεντενέσεως.

| Οπή τσιμεντενέσεως | Απόλυτο υψόμετρο (m) | Τελικό υψόμετρο (m) | Βάθος (m) |
|--------------------|----------------------|---------------------|-----------|
| P-21               | 325,50               | 322,00              | 15,30     |
| P-32               | 316,80               | 309,30              | 15,30     |
| P-40               | 311,50               | 305,00              | 15,30     |

|      |        |        |       |
|------|--------|--------|-------|
| P-60 | 321,00 | 316,00 | 15,30 |
| P-68 | 331,00 | 326,00 | 15,30 |
| P-72 | 337,00 | 332,30 | 15,30 |

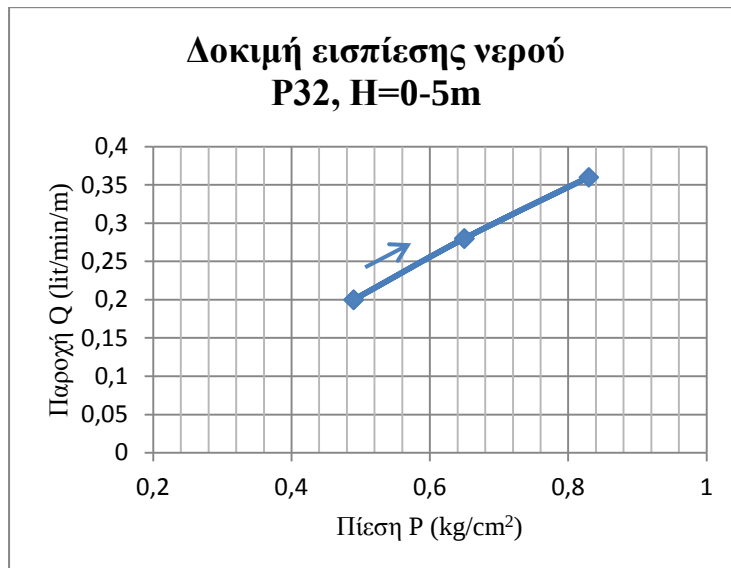
Στη συνέχεια γίνεται μια αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τις πρωτεύουσες οπές τσιμεντένεσης που γειτνιάζουν με τις αντίστοιχες ερευνητικές, με σκοπό να διαφανεί η αποτελεσματικότητά τους στη διαπερατότητα και στη συμπεριφορά της βραχώμαζας.

🔧 Πρωτεύουσα οπή P-21: Η P-21 βρίσκεται κοντά στη γεώτρηση Γ12 και διέτρησε μέτρια έως πολύ αποσαθρωμένη λάβα σε όλο της το βάθος. Συγκριτικά με τη Γ12, η διαπερατότητα εμφανίζεται αυξημένη έως πολύ αυξημένη, πιθανό λόγω της υδραυλικής θραύσης των ασυνεχειών. Η διαπερατότητά της εμφανίζεται πολύ μεγάλη από 0 - 5m (42 Lugeon), ενώ από 5 - 15,30m δεν μπορούσε να γίνει μέτρηση των απωλειών λόγω της πολύ υψηλής διαπερατότητας. Η ροή του νερού γίνεται μέσω των ρωγμών και των πολύ διαρρηγμένων ζωνών που συναντώνται στη γεώτρηση.



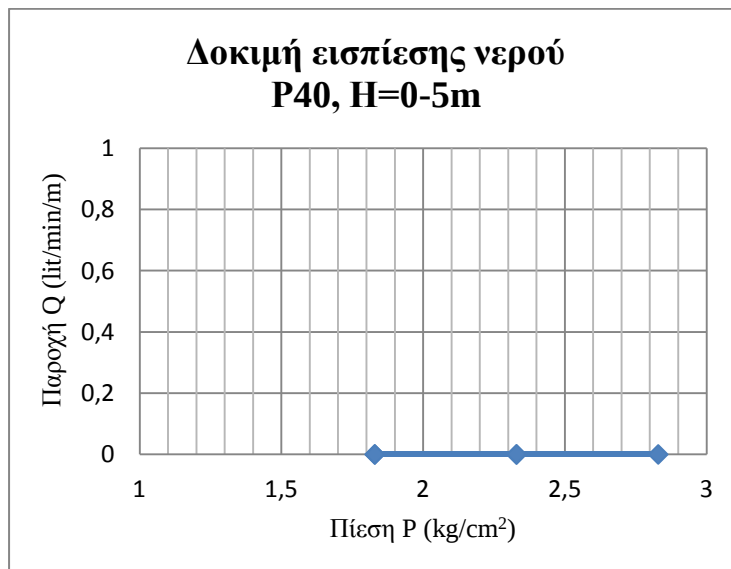
Κατά τη διάρκεια της εισπίεσης παρατηρείται μια απότομη αύξηση της πρόσληψης νερού με την αύξηση της πίεσης η οποία μπορεί να οφείλεται σε ξέπλυμα των ασυνεχειών. Η μειωμένη όμως παροχή κατά τα στάδια ελάττωσης της πίεσης δείχνει φαινόμενα επούλωσης των ασυνεχειών. Το φαινόμενο μόνο κατά μέρος είναι αντιστρεπτό.

🔧 Πρωτεύουσα οπή P-32: Η P-32 βρίσκεται κοντά στη γεώτρηση Γ11. Η βραχώμαζα παρουσιάζεται υγιής (σχεδόν άρρηκτη) σε όλο το βάθος της οπής. Η εκσκαφή των 7m που προηγήθηκε στη γεώτρηση Γ11 σε συνδυασμό με την εισπίεση ενέματος, είχαν σαν αποτέλεσμα την αισθητή μείωση της διαπερατότητας μέχρι το βάθος των 10m από την επιφάνεια. Η διαπερατότητα εμφανίζεται πολύ χαμηλή στα πρώτα 5m, ενώ μετέπειτα η απορρόφηση νερού είναι μηδενική.



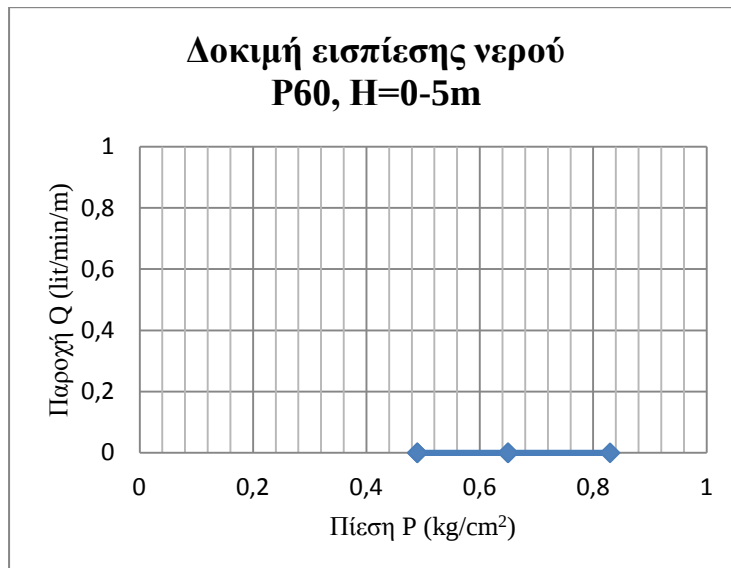
Κατά τη διάρκεια της εισπίεσης δεν παρουσιάζεται καμιά μεταβολή στη βραχύμαζα.

✚ Πρωτεύουσα οπή P-40: Βρίσκεται σε γειτονία με τη γεώτρηση Γ15, όπου συναντάται υγιής βραχύμαζα σε όλο της το βάθος. Παρά τον τοπικά έντονο κερματισμό που εμφανίζει, οι απώλειες νερού κατά τις δοκιμές Lugeon είναι μηδενικές. Συγκριτικά με τη Γ15, δεν παρουσιάζει καμιά μεταβολή.



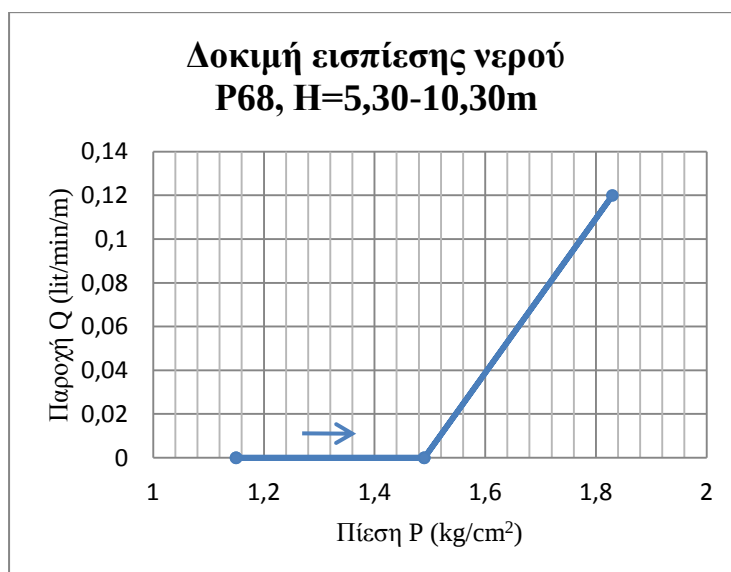
Κατά τη διάρκεια της εισπίεσης δεν παρουσιάζεται καμιά μεταβολή στη βραχύμαζα.

✚ Πρωτεύουσα οπή P-60: Βρίσκεται πολύ κοντά στη γεώτρηση Γ4 και δεν εμφανίζει καμιά μεταβολή στη διαπερατότητα σε σύγκριση με αυτή. Οι απώλειες νερού είναι μηδενικές σε όλο το μήκος της οπής (15 m). Η βραχύμαζα εμφανίζεται μέτρια αποσθρωμένη έως σχετικά υγιής. Ιδιαίτερα σε βάθος 13 – 15m οι ρωγμές έχουν λείες επιφάνειες λόγω μεταλλοφορίας.



Κατά τη διάρκεια της εισπίεσης δεν παρουσιάζεται καμιά μεταβολή στη βραχύμαζα.

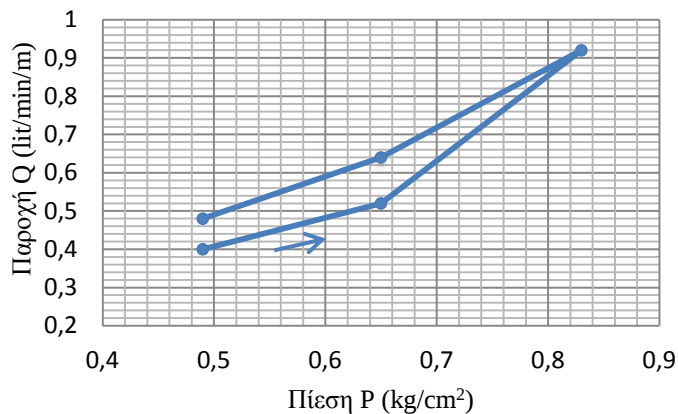
 Πρωτεύουσα οπή P-68: Η P-68 γειτνιάζει με τη γεώτρηση Γ16. Έπειτα από την εκσκαφή των πρώτων 5 m και την τσιμεντένεση, η απορρόφηση του νερού κατά τις δοκιμές Lugeon σχεδόν εκμηδενίζεται.



Κατά τη διάρκεια της εισπίεσης προκαλείται μια ελαστική παραμόρφωση και το φαινόμενο είναι αντιστρεπτό.

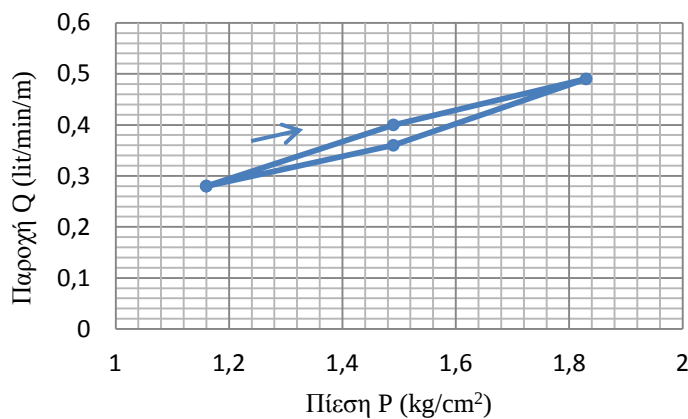
 Πρωτεύουσα οπή P-72: Η P-72 βρίσκεται κοντά στη γεώτρηση Γ5. Η βραχύμαζα είναι μέτρια έως ελαφρά αποσθρωμένη. Η διαπερατότητα στα 5m είναι αυξημένη (10 Lugeon) σε σχέση με το υπόλοιπο βάθος της οπής. Χαρακτηριστικό είναι ότι τα φαινόμενα θραύσης που εμφανίζονται στη Γ5 σε βάθος 5 - 10m, μετά τη τσιμεντένεση εξαλείφονται και η βραχύμαζα παρουσιάζει μικρότερη διαπερατότητα.

### Δοκιμή εισπίεσης νερού P72, H=0-5.3m



Κατά τη διάρκεια της εισπίεσης εμφανίζεται μια παραμόρφωση στη βραχώμαζα, η οποία είναι εν μέρει αντιστρεπτή. Η αυξημένη παροχή στα στάδια ελάττωσης της πίεσης ίσως να οφείλονται σε υδραυλική θραύση.

### Δοκιμή εισπίεσης νερού P72, H=5.3-10.3m



Κατά τη διάρκεια της δοκιμής παρατηρείται επούλωση των ασυνεχειών (πιθανή πλήρωση με ένεμα) και το φαινόμενο είναι αντιστρεπτό.

#### 7.5.1. Τάπητας τσιμεντενέσεων

Ο τάπητας τσιμεντενέσεων στο φράγμα Σολέας φτάνει σε βάθος 5m κάτω από τον αργιλικό πυρήνα του φράγματος. Για την κατασκευή του ανοίχτηκε ένα δίκτυο γεωτρήσεων σε κάναβο 3,00 x 3,00m σε πλάτος ίσο με τα 2/3 του πλάτους του πυρήνα. Το μήκος του είναι ίσο με τη μήκος της στέψης του φράγματος. Χαρακτηριστικό του τάπητα είναι ότι περιλαμβάνει τρεις σειρές τσιμεντενέσεων εκατέρωθεν της κεντρικής κουρτίνας, κυρίως στο κεντρικό κομμάτι του φράγματος. Στις γεωτρήσεις αυτές δεν εκτελούνται δοκιμές εισπίεσης νερού, παρά μόνο μετριέται η ποσότητα προσλαμβανόμενου ενέματος (kg/m) σε αυτά τα 5m.

#### 7.6. Γεωτρήσεις ελέγχου

Οι γεωτρήσεις ελέγχου (CH) γίνονται με το πέρας της κατασκευής της κουρτίνας τσιμεντενέσεων με σκοπό να προσδιοριστούν οι τυχόν παραμένουσες περιοχές με αυξημένη

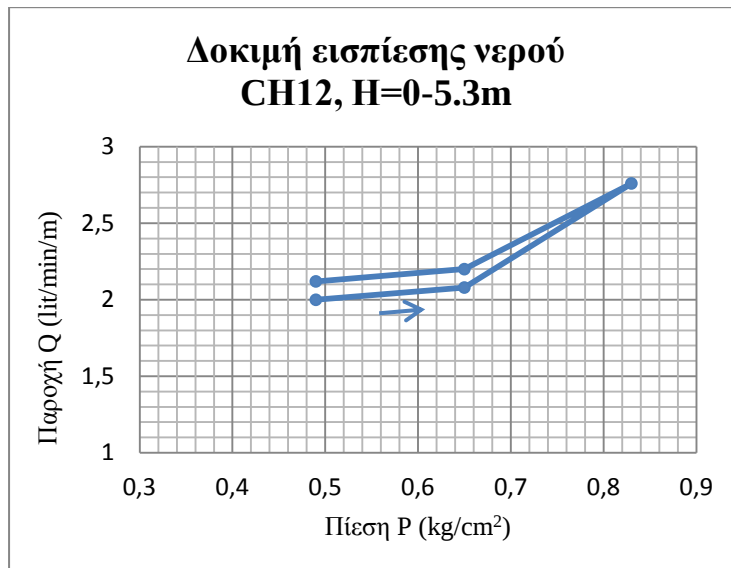
διαπερατότητα και να εκτιμηθεί η απόσταση διάδοσης του ενέματος, αφού όπως είναι λογικό, κατά τόπους θα συναντούν το ενεματικό υλικό των τσιμεντενέσεων το οποίο επουλώνει τις ασυνέχειες. Όπως και με την κουρτίνα τσιμεντενέσεων, οι γεωτρήσεις ελέγχου εκτελούνται από τη νέα επιφάνεια που προκύπτει από την εκσκαφή των επιφανειακών σχηματισμών. Οι γεωτρήσεις ελέγχου στο φράγμα Σολέας εκτελούνται σε αξονικές αποστάσεις 50m μεταξύ τους και είναι όλες κεκλιμένες κατά  $60^\circ$ , πάντα ομόρροπα με την κλίση του εκάστοτε αντερείσματος. Εξαίρεση αποτελούν οι γεωτρήσεις ελέγχου 7, 8 και 9 στις οποίες η απόσταση μεταξύ τους είναι πολύ μικρότερη. Η ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων απορρόφησης νερού από τις δοκιμές Lugeon δίνεται στο σχήμα 49γ. Στον πίνακα 16 δίνονται τα βάθη και τα υψόμετρα των γεωτρήσεων ελέγχου, όπως αυτά προκύπτουν μετά την εκσκαφή του πυρήνα και του σώματος του φράγματος.

Πίνακας 16: Απόλυτα υψόμετρα γεωτρήσεων ελέγχου.

| Γεωτρήσεις ελέγχου | Υψόμετρο εδάφους (m) | Τελικό υψόμετρο (m) | Βάθος (m) |
|--------------------|----------------------|---------------------|-----------|
| CH-1               | 312,0                | 307,0               | 20,6      |
| CH-2               | 311,5                | 305,0               | 20,3      |
| CH-3               | 315,0                | 309,0               | 25,3      |
| CH-4               | 308,0                | 302,3               | 20,3      |
| CH-5               | 324,3                | 319,3               | 25,3      |
| CH-6               | 325,0                | 320,0               | 20,3      |
| CH-7               | 314,4                | 308,4               | 20,3      |
| CH-8               | 314,4                | 308,4               | 10,3      |
| CH-9               | 314,4                | 308,4               | 10,3      |
| CH-10              | 342,0                | 337,5               | 35,3      |
| CH-11              | 360,8                | 357,0               | 25,8      |
| CH-12              | 326,5                | 323,0               | 10,3      |

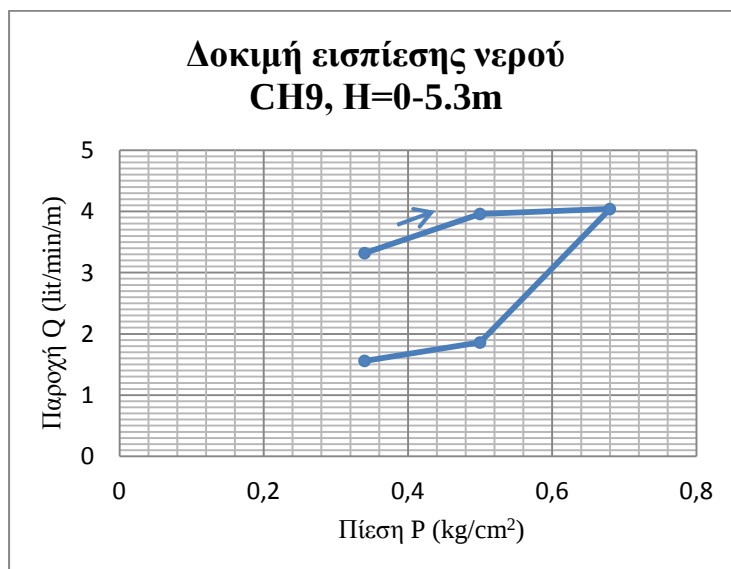
Στη συνέχεια γίνεται μια αξιολόγηση των γεωτρήσεων αυτών από τα έντυπα καταγραφής τους. Η σειρά με την οποία αναφέρονται είναι βάσει της θέσης τους πάνω στον άξονα θεμελίωσης του φράγματος, από το αριστερό προς το δεξί αντέρεισμα.

 Γεώτρηση ελέγχου CH-12: Η βραχώμαζα είναι πολύ αποσαθρωμένη σε όλο το βάθος, με υψηλή διαπερατότητα (37 Lugeon) μέχρι 5m, ενώ στη συνέχεια η απορρόφηση μηδενίζεται. Επίσης παρουσιάζεται έντονα οξειδωμένη, κατακερματισμένη μέχρι τα 8m. Χαρακτηριστική είναι η παρουσία στιλβωμένης επιφάνειας σε βάθος 9,80m. Εντοπίστηκε παρουσία ενέματος σε βάθος 0,60 - 0,80m.



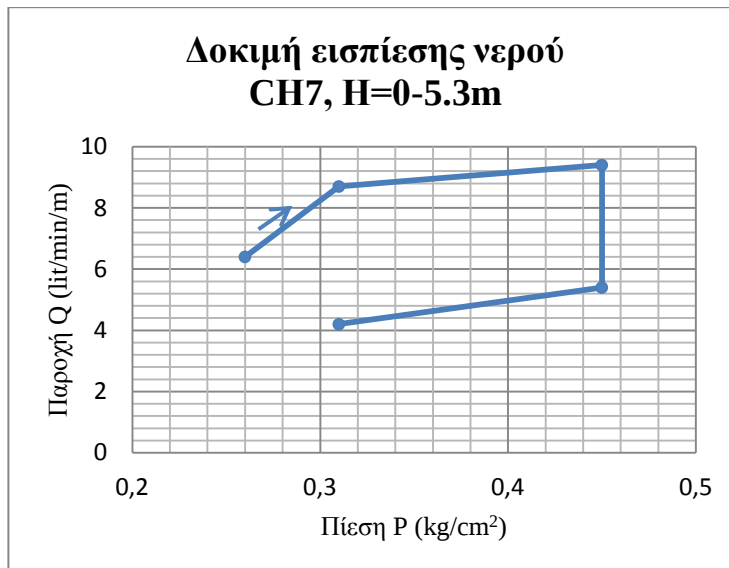
Κατά τη διάρκεια της εισπίεσης παρατηρείται μια παραμόρφωση στη βραχόμαζα, η οποία εν μέρει είναι αντιστρεπτή.

**Γεώτρηση ελέγχου CH-9:** Η βραχόμαζα είναι σχετικά υγιής με κατά τόπους έντονη διάρρηξη. Οι ασυνέχειες εμφανίζονται τραχείες επιφάνειες με τοπική εμφάνιση μεταλλοφορίας (σιδηροπυρίτης). Ποσότητα ενέματος δεν συναντήθηκε πουθενά στη γεώτρηση.



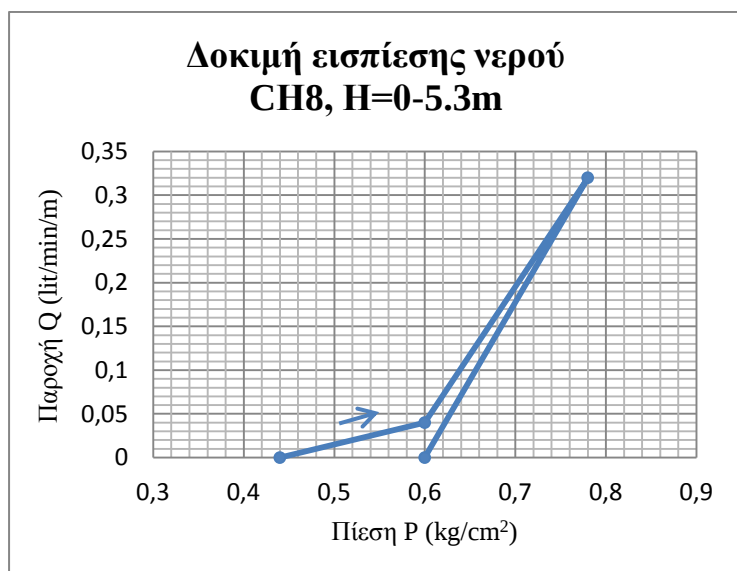
Η ελαττούμενη προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού με ελαττούμενη επίσης πίεση, δείχνει φαινόμενα επούλωσης των ασυνεχειών.

**Γεώτρηση ελέγχου CH-7:** Η βραχόμαζα είναι σχετικά υγιής με μέτρια διάρρηξη και κατά τόπους συμπαγής. Οι ασυνέχειες είναι αραιές, με τραχείες κυρίως επιφάνειες. Κατά τόπους συναντάται και παρουσία σιδηροπυρίτη. Ποσότητα ενέματος δεν συναντήθηκε πουθενά στη γεώτρηση.



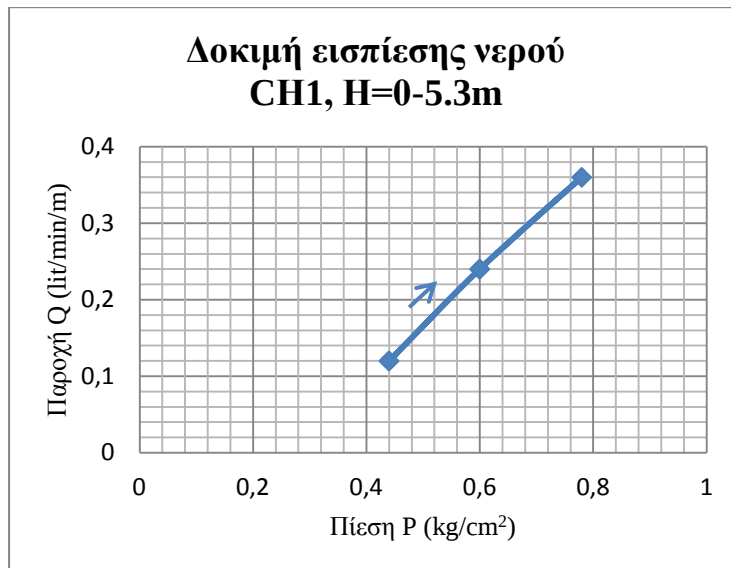
Η ισχυρά ελαττούμενη προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού στην ίδια μέγιστη πίεση δείχνει φαινόμενα έμφραξης των ασυνεχειών.

 Γεώτρηση ελέγχου CH-8: Παρουσιάζει ίδια χαρακτηριστικά με τη γεώτρηση CH-7.



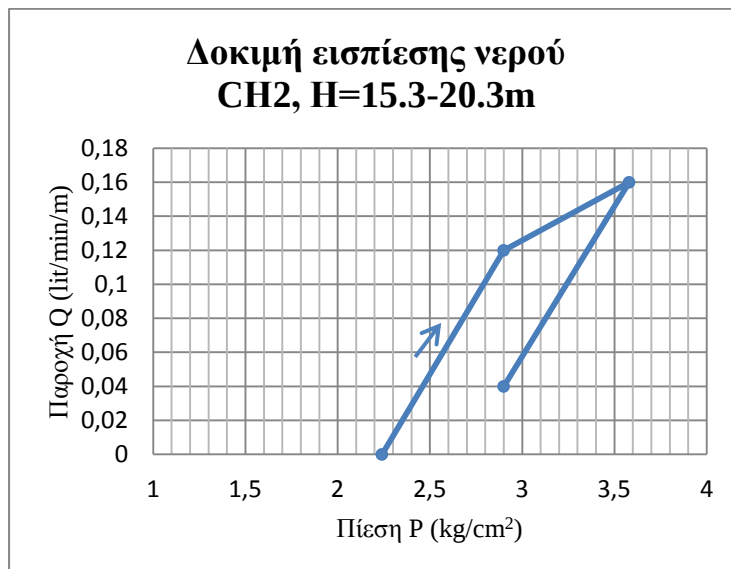
Η ξαφνική αύξηση της παροχής νερού με αύξηση της πίεσης οφείλεται σε διάβρωση των ασυνεχειών. Στη συνέχεια, η απότομη μείωση της παροχής με ταυτόχρονη μείωση της πίεσης δείχνει ότι προκαλείται απόθεση υλικού στις ασυνέχειες από μεταφορά.

 Γεώτρηση ελέγχου CH-1: Η βραχώμαζα είναι ελαφρά αποσαθρωμένη στα πρώτα 0,50cm, ενώ στη συνέχεια είναι υγιής και σχεδόν άρρηκτη. Παρουσία ενέματος παρατηρείται σε βάθος 0 – 0,15m.



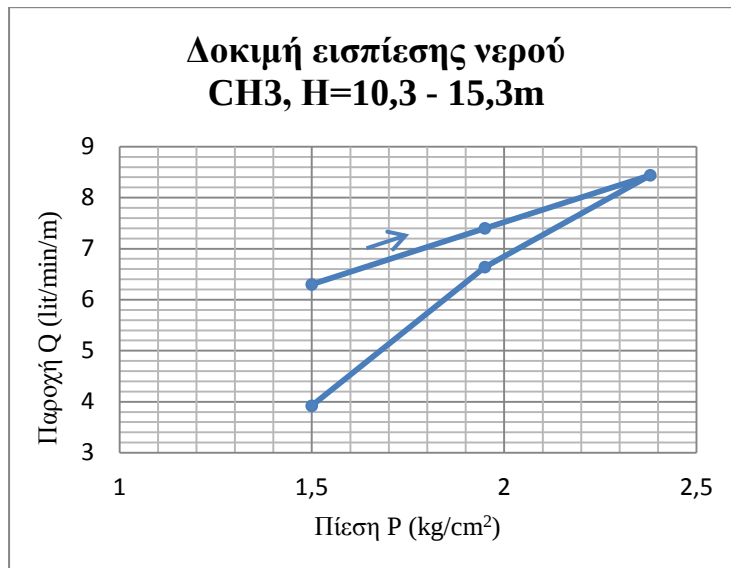
Κατά τη διάρκεια της δοκιμής δεν παρουσιάζεται καμιά μεταβολή στη βραχύμαζα.

**Γεώτρηση ελέγχου CH-2:** Η βραχύμαζα μέχρι τα 7,3m είναι υγιής και σχεδόν άρρηκτη, με ελαφρύ θρυμματισμό. Από 7,3 - 15,3m είναι έντονα διαρρηγμένη και παρατηρείται παρουσία ενέματος σε βάθος 12,50 - 12,70m. Μέχρι τα 19,8m η βραχύμαζα εμφανίζεται εκ νέου υγιής με ελαφρύ κερματισμό και ποσότητα ενέματος σε βάθος 16m.



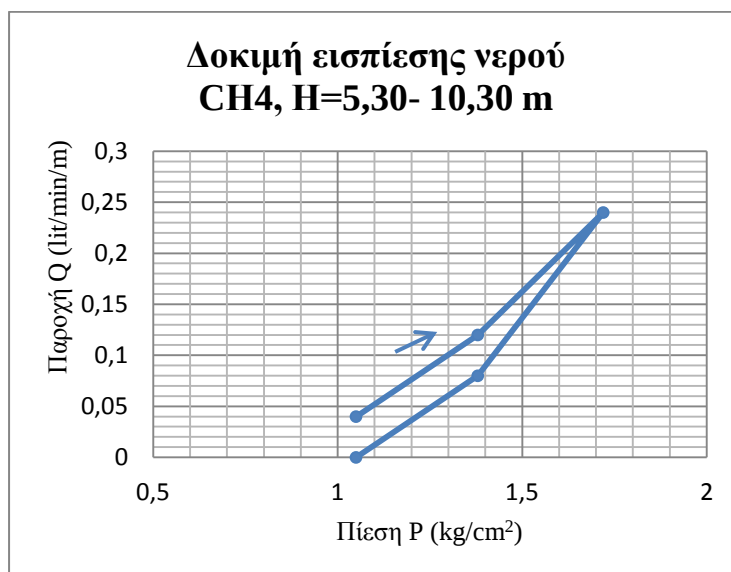
Η μειωμένη προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού παράλληλα με την ελάττωση της πίεσης οφείλεται στην επούλωση των ασυνεχειών, πιθανόν λόγω του ενέματος.

**Γεώτρηση ελέγχου CH-3:** Η βραχύμαζα εμφανίζεται σχετικά υγιής, κατά τόπους κερματισμένη. Οι ασυνέχειες είναι κυρίως κλειστές με τραχείες επιφάνειες. Στα βάθη 0,0 - 0,10m και 6,70 - 6,80m οι ασυνέχειες είναι ανοικτές με υλικό πλήρωσης λευκή ασβεστίτη ιλύ. Σε κανένα σημείο της γεώτρησης δεν εντοπίζεται ένεμα.



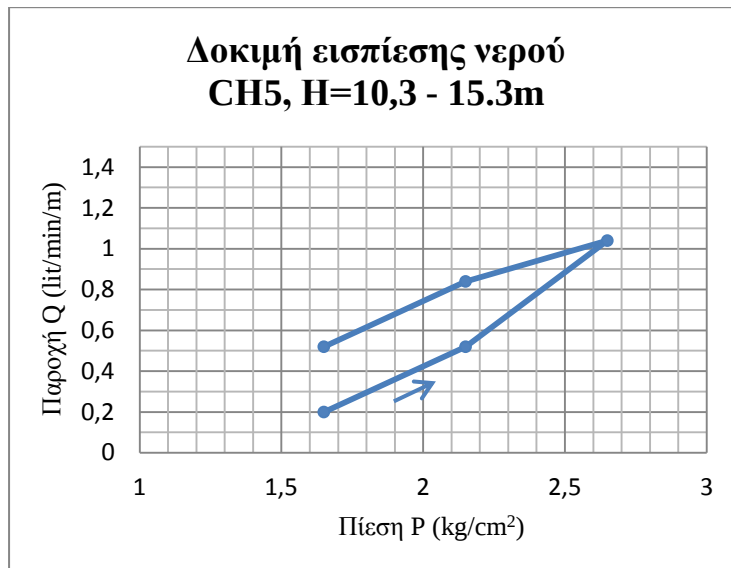
Η μορφή του διαγράμματος καταδεικνύει ότι πραγματοποιήθηκε επούλωση των ασυνεχειών.

**Γεώτρηση ελέγχου CH-4:** Η βραχώμαζα είναι γενικά υγιής και έντονα κερματισμένη σχεδόν σε όλο το βάθος. Ρωγμές εμφανίζονται σε βάθος 15,0 - 17,70m και είναι κυρίως κλειστές. Επίσης, συναντάται μεταλλοφορία σιδηροπυρίτη σε βάθος 17,50 - 18,50m. Πουθενά στη γεώτρηση δεν εντοπίστηκε ποσότητα ενέματος.



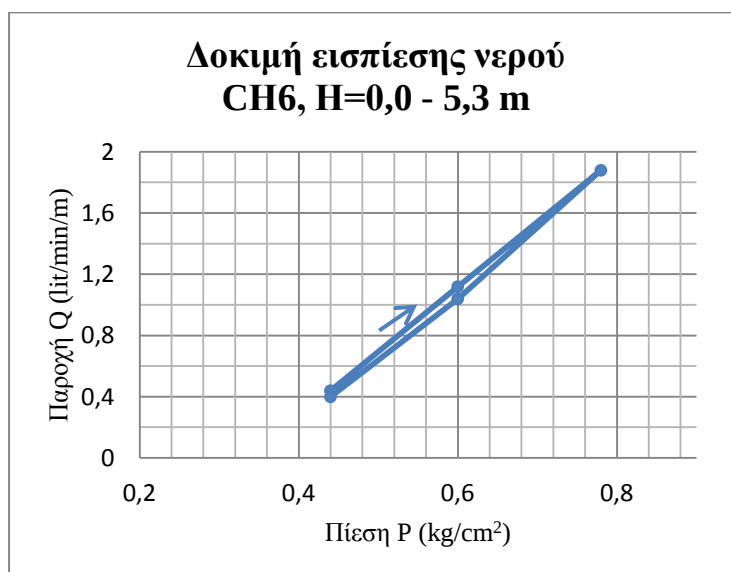
Κατά τη δοκιμή εισπίεσης νερού πραγματοποιείται επούλωση των ασυνεχειών και συνεπώς μείωση της προσλαμβανόμενης ποσότητας νερού με την ελάττωση της πίεσης. Το φαινόμενο είναι αντιστρεπτό.

**Γεώτρηση ελέγχου CH-5:** Η βραχώμαζα μέχρι τα 11,2m είναι ελαφρά αποσπασμένη με έντονο κερματισμό, ενώ στη συνέχεια είναι υγιής και κατά τόπους κερματισμένη. Στα βάθη 13,30m και 13,40m εντοπίζεται ένεμα. Η πρόσληψη νερού είναι μηδενική από 0,0 - 10,30m και 20,30 - 25,30m. Στο ενδιάμεσο τμήμα η συμπεριφορά της βραχώμαζας είναι πανομοιότυπη.



Κατά τη δοκιμή εισπίεσης προκαλείται μια παραμόρφωση στη βραχώμαζα με διεύρυνση ή διάβρωση των ασυνεχειών και επομένως η παροχή νερού είναι μεγαλύτερη στα στάδια ελάττωσης της πίεσης. Το φαινόμενο δεν είναι αντιστρεπτό.

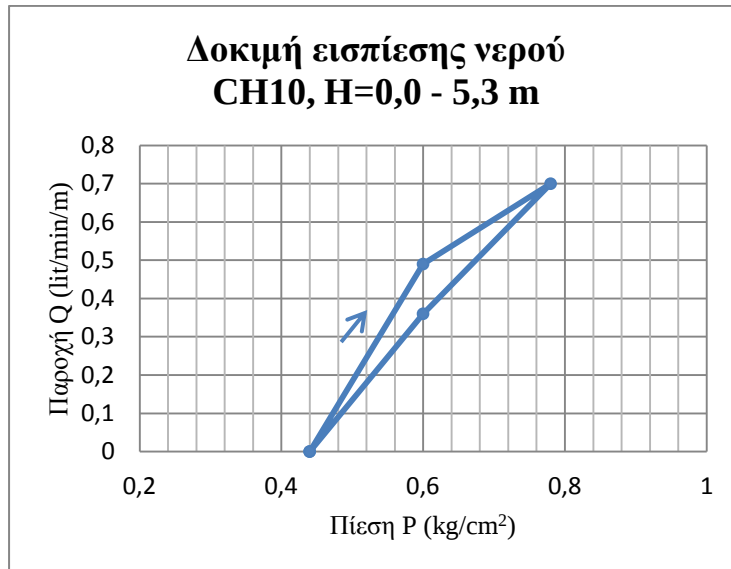
 **Γεώτρηση ελέγχου CH-6:** Η βραχώμαζα μέχρι τα 4,50m είναι μέτρια αποσαθρωμένη με έντονο κερματισμό. Αντίθετα, από 4,50 - 20,30m είναι σχετικά υγιής και κατά τόπους κερματισμένη, με τις ασυνέχειες να χαρακτηρίζονται από τραχείες επιφάνειες. Η απορρόφηση νερού από τα 5,30m και μετά είναι μηδενική. Ενδείξεις ενέματος έχουμε σε βάθος 3,50 - 4,0m.



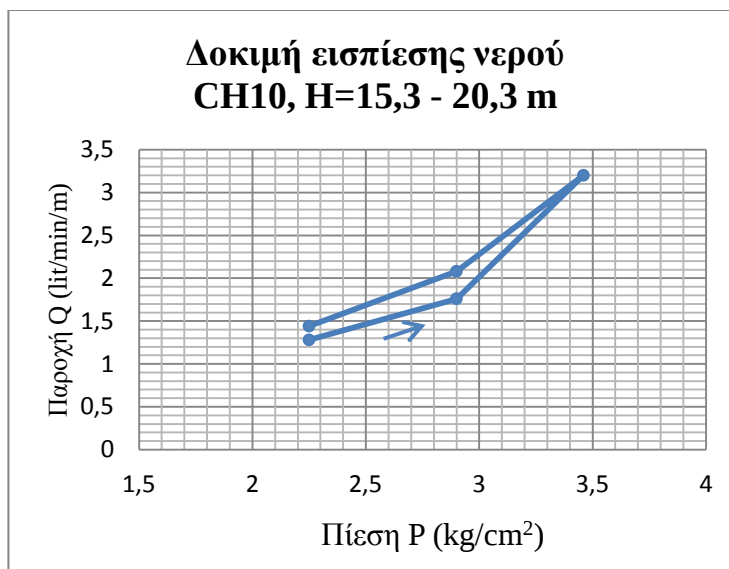
Κατά τη διάρκεια της δοκιμής εισπίεσης η μεταβολή που παρουσιάζει η βραχώμαζα είναι αμελητέα.

 **Γεώτρηση ελέγχου CH-10:** Αυτή η γεώτρηση ελέγχου μπορεί γενικά να χωριστεί σε τρία τμήματα. Στο πρώτο τμήμα μέχρι τα 17,5m, η βραχώμαζα είναι μέτρια έως ελαφρά αποσαθρωμένη, μέτρια έως πολύ κερματισμένη με κατά τόπους οξειδωμένες επιφάνειες ασυνέχειας, κυρίως κλειστές και κυματοειδείς. Η συμπεριφορά της κατά τις δοκιμές Lugeon είναι πανομοιότυπη μέχρι το βάθος αυτό. Στο δεύτερο τμήμα από 17,5 - 25,0m, η βραχώμαζα είναι ελαφρά αποσαθρωμένη έως υγιής, πολύ κερματισμένη και κατά τόπους οξειδωμένη.

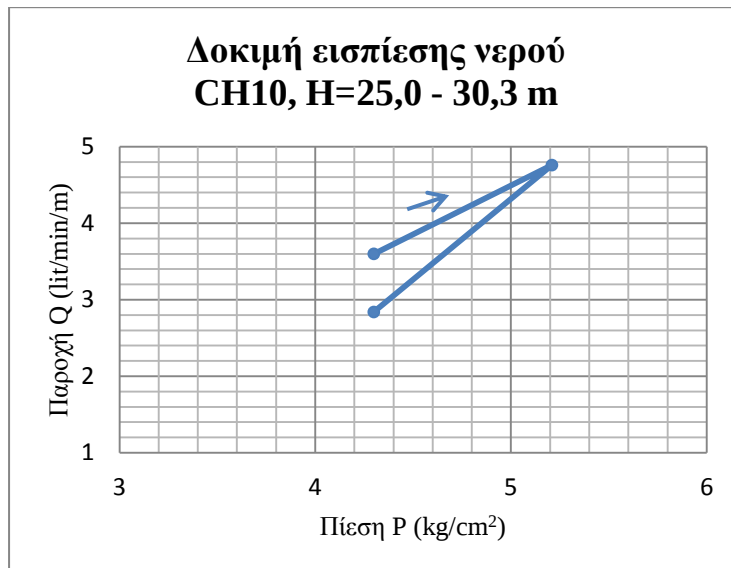
Όπως και στο πρώτο τμήμα, οι ασυνέχειες είναι κυρίως κλειστές με ανώμαλες επιφάνειες. Η συμπεριφορά της βραχώμαζας εδώ είναι διαφορετική συγκριτικά με τα πρώτα 17,50m. Τέλος, στο τρίτο τμήμα από 25,0 - 35,3m, η βραχώμαζα είναι ελαφρά αποσαθρωμένη έως υγιής και πολύ κερματισμένη, με πολύ έντονη παρουσία οξείδωσης. Η μαονμετρική πίεση που εφαρμόστηκε στα δοκιμαζόμενα τμήματα 25,0 - 30,30m και 30,3 - 35,30m είναι 2,0 - 2,0 - 3,0 - 2,0 - 2,0 bars.



Το σχετικό διάγραμμα δείχνει επούλωση των ασυνεχειών της βραχώμαζας και το φαινόμενο είναι αντιστρεπτό.

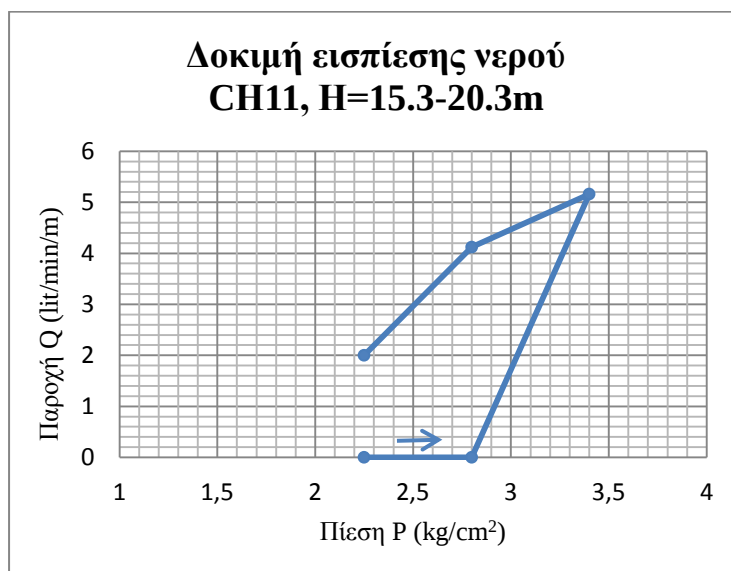


Κατά την εισπίεση παρουσιάζεται μια παραμόρφωση της βραχώμαζας, η οποία είναι αντιστρεπτή.

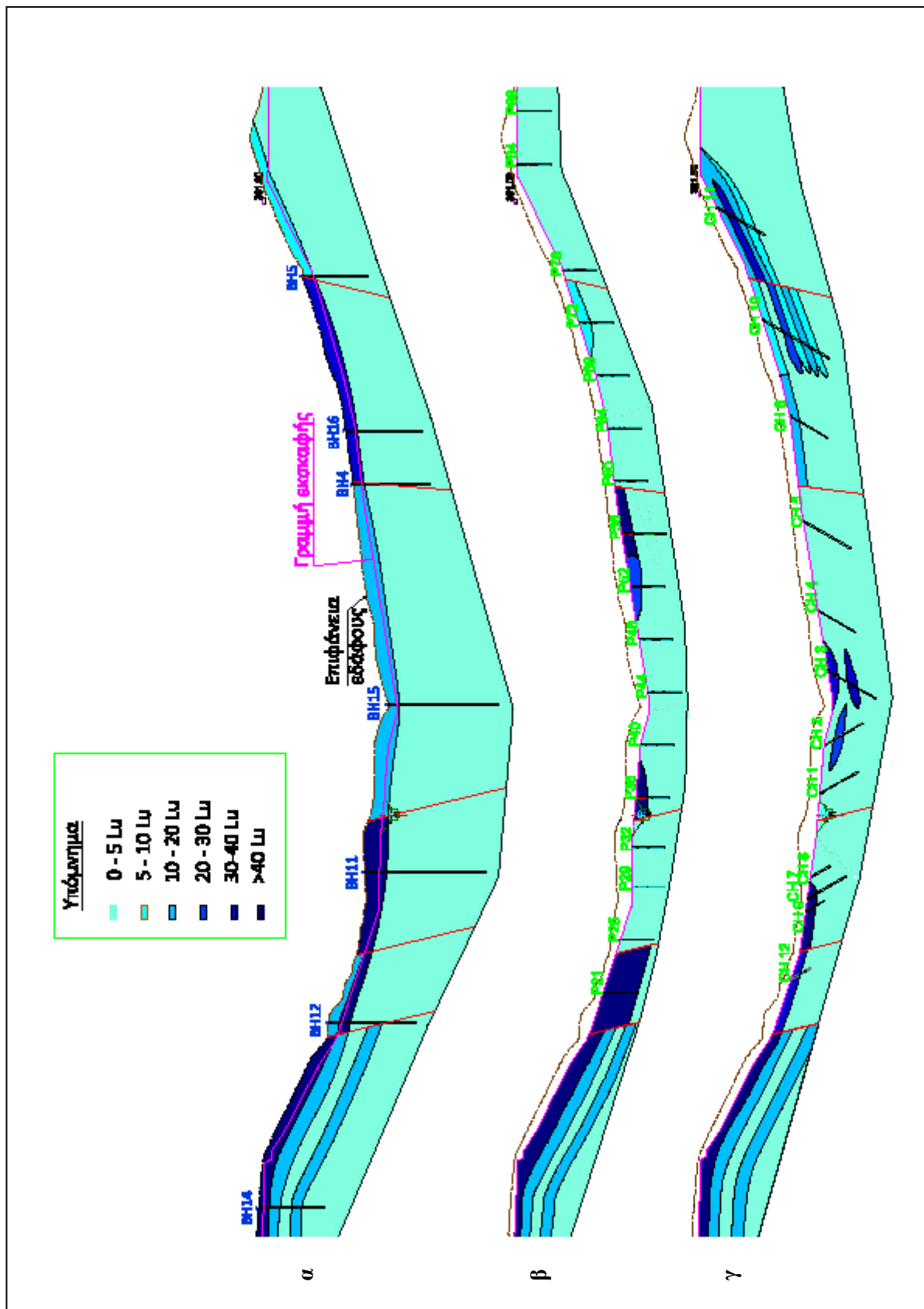


Κατά τη δοκιμή φαίνεται να επέρχεται πλήρωση των ασυνεχειών ή δεν υπάρχει υδραυλική επικοινωνία μεταξύ αυτών.

 Γεώτρηση ελέγχου CH-11: Αυτή η γεώτρηση διάτρησε το σχηματισμό της οριζόντιας βάσης που είναι ο υποκείμενος σχηματισμός της σειράς των κατώτερων μαξιλαροειδών λαβών. Αυτός ο σχηματισμός αποτελείται κυρίως από διαβασικές φλέβες, ενώ μόνο ένα μικρό μέρος του αποτελείται από λεπτές ζώνες λαβών. Μέχρι τα 15m η βραχώμαζα είναι μέτριας έως ελαφριάς αποσάθρωσης με κλειστές κυρίως ασυνέχειες και τραχείες επιφάνειες. Από τα 15,0 – 25,80m η βραχώμαζα είναι σχετικά υγής με έντονη παρουσία ασβεστιτικών συγκριμάτων.



Η ξαφνική αύξηση της προσλαμβανόμενης ποσότητας νερού με αυξανόμενη πίεση δείχνει φαινόμενα θραύσης. Το φαινόμενο είναι μη αντιστρεπτό.



Σχ. 48: Ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων από τις δοκιμές Lugeon. α) Ερευνητικές γεωτρήσεις, β) Πρωτεύουσες σπές τσιμεντένεσων, γ) Γεωτρήσεις ελέγχου. Κλίμακα 1:2000

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα στοιχεία των ερευνητικών γεωτρήσεων που διανοίχθηκαν κατά μήκος του άξονα του φράγματος, διαπιστώθηκε ότι η υψηλή διαπερατότητα περιορίζεται κυρίως στα πρώτα 5m από την επιφάνεια, με εξαίρεση το αριστερό αντέρεισμα, που φτάνει μέχρι και τα 20m. Αρχικά η βραχώμαζα θεωρήθηκε ως έντονα διαρρηγμένη και ειδικότερα στο αριστερό αντέρεισμα, όπου οι χαμηλές τιμές RQD σε συνδυασμό με τη μέτρια έως έντονη αποσάθρωση μέχρι το βάθος των 21m, είχαν σαν αποτέλεσμα υψηλή διαπερατότητα. Επομένως κρίθηκε αναγκαίο να προηγηθούν οι απαραίτητες επεμβάσεις πριν την κατασκευή του φράγματος, ώστε η βραχώμαζα να αποκτήσει κατά το δυνατό μικρότερη διαπερατότητα. Η εκσκαφή της ζώνης θεμελίωσης του φράγματος, με μέσο πάχος 4 – 6m, ήταν απαραίτητη για την απομάκρυνση των πολύ διαπερατών και αποσαθρωμένων σχηματισμών.

Ο αρχικός συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας της βραχώμαζας κυμαίνεται από  $10^{-6}$  -  $10^{-7}$  m/sec, όπως υπολογίστηκε από τις δοκιμές εισπίεσης νερού που έγιναν στις ερευνητικές γεωτρήσεις. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε μέτρια υδροπερατή βραχώμαζα. Η πλειοψηφία των διαγραμμάτων  $Q=f(P)$  δείχνουν ότι με τις εισπίεσεις νερού που γίνονται κατά τις δοκιμές Lugeon, η προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού αυξάνεται στο στάδιο της φθίνουσας ασκούμενης πίεσης. Αυτό οφείλεται είτε σε διεύρυνση, είτε σε διάβρωση ή ξέπλυμα των ασυνεχειών από το υλικό πλήρωσής τους. Η ροή του νερού μέσα από τη βραχώμαζα γίνεται μέσω των ανοικτών ασυνεχειών που δημιουργήθηκαν από την έντονη τεκτονική της καταπόνηση.

Για την περαιτέρω μείωση του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας, εκτελέστηκαν τσιμεντενέσεις στεγανοποίησης μέσα σε οπές γεωτρήσεων, με σκοπό να κλείσουν τις ανοικτές ασυνέχειες και διαρρήξεις που παρουσιάζονται στη βραχώμαζα, και να μειώσουν έτσι τη διαπερατότητά της. Μετά την ολοκλήρωση των τσιμεντενέσεων και την κατασκευή της διαφραγματικής κουρτίνας, πραγματοποιήθηκαν γεωτρήσεις ελέγχου για να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα των τσιμεντενέσεων και το κατά πόσο αυτές βελτίωσαν τη διαπερατότητα της βραχώμαζας. Μέσα σε αυτές εκτελέστηκαν εκ νέου τσιμεντενέσεις και δοκιμές εισπίεσης νερού. Η πλειοψηφία των διαγραμμάτων κατά τη διάρκεια των δοκιμών δείχνουν ότι η προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού μειώνεται στα αντίστοιχα στάδια της φθίνουσας πίεσης, πράγμα θετικό αφού δηλώνει ότι οι ασυνέχειες στεγανοποιήθηκαν. Οι δοκιμές έδωσαν συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας της τάξης του  $10^{-7}$  -  $10^{-8}$  m/sec, επομένως παρατηρείται βελτίωση της διαπερατότητας της βραχώμαζας.

Η κατά τόπους αυξημένη διαπερατότητα στα πρώτα 5m της κουρτίνας των τσιμεντενέσεων, αντιμετωπίζεται από τον τάπητα τσιμεντενέσεων κάτω από τον πυρήνα του φράγματος. Επομένως, και σε αυτή την περίπτωση η υδραυλική αγωγιμότητα αναμένεται να ελαττωθεί σημαντικά.

Οι υπολογισμένες διαφυγές νερού μετά τη στεγανοποίηση σε σύγκριση με αυτές πριν από αυτή, κρίνονται ανεκτές και αναμένεται να είναι μικρότερες αν ληφθεί υπόψη και η παρουσία του τάπητα.

Η αξιολόγηση των στοιχείων των γεωερευνητικών εργασιών έδειξε ότι η μεταβολή της αποσάθρωσης και του βαθμού διάρρηξης σχετίζεται με την παρουσία ρηγμάτων και γενικότερα με τη γεωλογία και την τεκτονική της θέσης του φράγματος.

Η αξιολόγηση της διαπερατότητας πριν από την εφαρμογή των μέτρων στεγανοποίησης έδειξε πολύ καλή συσχέτισή της με τη μεταβολή του βαθμού αποσάθρωσης και της ρωγμάτωσης των σχηματισμών.

Ο προγραμματισμός, η μεθοδολογία και η εκτέλεση των μέτρων στεγανοποίησης επέφεραν τα αναμενόμενα αποτελέσματα για την ασφαλή λειτουργία του εξωποτάμιου φράγματος Σολέας.

Τέλος, προκύπτει ότι τόσο η γεωλογική έρευνα όσο και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων των γεωερευνητικών εργασιών είναι καθοριστικές για την αξιολόγηση της ανάγκης στεγανοποίησης της θέσης του φράγματος αλλά και για την έκταση και την αποτελεσματικότητα των μέτρων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. BOYΔΟΥΡΗΣ Κ. (2009): Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος - Υπόγεια Νερά & Περιβάλλον. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σελ. 460.
2. CAMILO QUIÑONES-ROZO, P.E. (2010): Lugeon Test Interpretation, Revisited. Collaborative Management of Integrated Watersheds Proc. 30th Annual USSD Conference, pp 405 – 414.
3. CLAYTON C.R.I., MATTHEWS M.C. & SIMONS N.E. (1995): Site Investigation. 2<sup>nd</sup> Ed. Department of Civil Engineering, University of Surrey, pp 467.
4. CREAGER W., JUSTIN J., HINDS J. (1945): Engineering for Dams. Volume III: Earth Rock-fill, Steel and Timber Dams. John Willey & Sons, INC. New York London Sydney, pp 619-929.
5. ΔΗΜΟΠΟΥΛΟΣ Γ. (2008) : Τεχνική Γεωλογία. Εκδοτικός Οίκος Αδελφών Κυριακίδη Α.Ε., Θεσσαλονίκη, σελ. 423.
6. ΔΗΜΟΠΟΥΛΟΣ Γ. (2007): Γεωλογικές Μελέτες Τεχνικών Έργων - Υδρογεωλογικές Μελέτες. Εκδοτικός Οίκος Αδελφών Κυριακίδη Α.Ε., Θεσσαλονίκη σελ. 319.
7. HOULSBY A.C. (1976): Routine interpretation of the Lugeon water-test. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 1976, vol.9, pp 303 – 313. Water Resources Commission, Box 952 North Sydney, N.S.W. Australia.
8. ΚΑΛΛΕΡΓΗΣ Γ. (1999): Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. Εκδόσεις Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος. Τόμος Α΄, σελ. 331.
9. ΚΟΥΚΗΣ Γ., ΣΑΜΠΑΤΑΚΑΚΗΣ Ν. (2002): Τεχνική Γεωλογία. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, σελ. 514.
10. ΚΟΥΜΑΝΤΑΚΗΣ Ι. (2007): Πραγματική Διαπερατότητα – Υδραυλική Αγωγιμότητα. Ηλεκτρ. Σημειώσεις, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας Ε.Μ.Π – Μ.Μ.Μ.
11. ΜΑΡΑΓΚΟΣ Χ. (1997) : Τεχνικά Έργα Υποδομής. Κατασκευές στην επιφάνεια του βράχου, Υπόγειες κατασκευές, Φράγματα. Εκδότης Χρήστος Ν. Μαραγκός. Επανέκδοση 2003, σελ. 568.
12. ΜΑΡΙΝΟΣ Π. (1994) : Γεωλογία και Φράγματα. Εμπειρίες από τον Ελληνικό χώρο. Πρακτικά Ημερίδας Ελληνικής Επιτροπής Τεχνικής Γεωλογίας της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, σελ. 281.
13. ΜΟΥΝΤΡΑΚΗΣ Δ. (2010): Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη, σελ. 373.

14. PANTZARTZIS P., EMMANUELIDIS G., KRAPP L., MILANOVIC P. (1993): Karst phenomena and dam construction in Greece, Hydrogeological Processes in Karst Terrains, IAHS Publ. no. 207, 1993.
15. SIVAKUGAN N. (2005): Permeability and Seepage.
16. ΣΟΥΛΙΟΣ Γ. (2010): Γενική Υδρογεωλογία. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη. Τόμος Α΄, δεύτερη έκδοση, σελ. 373.
17. Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων. Επίσημη ιστοσελίδα.  
[<http://www.moa.gov.cy/moa/wdd/Wdd.nsf/>]
18. Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης. Επίσημη ιστοσελίδα.  
[<http://www.moa.gov.cy/moa/gsd/gsd.nsf/>]
19. ΧΡΗΣΤΑΡΑΣ Β. & ΜΑΡΙΝΟΣ Β. (2012): Τεχνική Γεωλογία. Ηλεκτρ. Σημειώσεις, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας Α.Π.Θ