

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ :**

# **ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

## **ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΑΦΥΓΗΣ Τ8 ΔΕΡΒΕΝΙΟΥ**

**ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΥ Φ. ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ**

**ΤΣΑΡΟΥΧΑΣ Ι. ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ : Δρ.Βγενοπούλου**



**ΠΑΤΡΑ 2015**



## Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος :	6
Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή	7
1.1 Ορισμός : Μία σήραγγα είναι ένα υπόγειο πέρασμα. Ο ορισμός του τι αποτελεί μία σήραγγα δεν είναι καθολικά αποδεκτός. Παρ' όλα αυτά, γενικά, οι σήραγγες έχουν τουλάχιστον δύο φορές μεγαλύτερο μήκος από το πλάτος τους. Επιπλέον, πρέπει να είναι πλήρως κλεισμένες από όλες τις πλευρές, εκτός από τα ανοίγματα σε κάθε πλευρά.	7
1.2 Χρησιμότητα	7
1.3 Μια σταγόνα ιστορία	7
1.4 Παραδείγματα υπόγειων έργων	10
1.5 Συγκριτικά με τις γέφυρες	14
Κεφάλαιο 2	15
2.1 Γενικά	15
2.2 Επίδραση της στρωματογραφίας στην κατανομή των τάσεων κατά μήκος του άξονα των σηράγγων	16
2.3 Υπόγεια νερά σε σήραγγες	18
2.4 Συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας	19
2.4.1 Ταξινόμηση Terzaghi, 1946	20
2.4.2 Ταξινόμηση Lauffer, 1958	20
2.4.3 Ταξινόμηση κατά Bieniawski, 1974, τροποποίηση 1979	22
2.4.4 Ταξινόμηση κατά Barton et al (N.G.I. – Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο)	25
2.5 Τεχνικογεωλογικές παράμετροι κατασκευής σηράγγων	33
2.6 Τρόποι διάνοιξης σηράγγων	35
2.6.1 Διάνοιξη σήραγγας με συμβατικές μεθόδους: Η νέα Αυστριακή μέθοδος διάνοιξης σηράγγων (NATM)	35
2.6.2 Διάνοιξη σήραγγας με μηχανικά μέσα	43
2.6.3 Εκσκαφή και Επανεπίχωση (Cut-and-Cover)	48
2.7 Εκτίμηση συγκλίσεων σε σήραγγες	48
2.8 Γεωτεχνικά Όργανα Παρακολούθησης	53
2.8.1 Γενικά στοιχεία	53
2.8.2 Καθοριστικοί παράγοντες στην επιλογή των οργάνων	53
2.8.3 Συμπεριφορά οργάνων μέτρησης	53
2.8.4 Εγκατάσταση των γεωτεχνικών οργάνων	55

2.8.5 Όργανα μέτρησης ολικών τάσεων	58
2.8.6 Όργανα μέτρησης παραμόρφωσης	65
2.8.6 .1 Κλισιόμετρα	69
2.9 Όργανα μέτρησης παραμορφώσεων σε διάφορες κατευθύνσεις	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	83
ΚΥΡΙΑ ΣΗΡΑΓΓΑ Τ8	83
3.1 Γενικές πληροφορίες :	83
3.2 Περιγραφή του έργου :	85
3.3 Βασικά χαρακτηριστικά:	87
3.3.1 Τυπική διατομή	87
3.3.2 Εσοχές θέσεων :	90
3.4 Άλλες Απαιτήσεις του Έργου :	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΣΗΡΑΓΓΑ ΔΙΑΦΥΓΗΣ Τ8	97
4.1 Γενικά χαρακτηριστικά :	97
4.2 Μια σύντομη περιγραφή του έργου :	99
4.3 Βασικά χαρακτηριστικά :	102
4.3.1 Τυπική διατομή	102
4.3.2 Το μήκος της σήραγγας διαφυγής χωρίζεται σε τρία κύρια τμήματα :	102
4.4 Γεωλογικά – γεωτεχνικά δεδομένα :	107
4.5 Περιγραφή των συνθηκών – τάξεων υποστήριξης και αναγνώριση κριτηρίων – έννοια σχεδιασμού	109
4.6 Παραδοχές και έννοια σχεδιασμού :	109
4.7 Περιγραφή του συστήματος υποστήριξης και της κατασκευαστικής ακολουθίας :	112
4.8 Μεθοδολογία ανάλυσης και υπολογισμών :	112
4.9 Μοντέλα :	115
4.10 Υπολογισμοί τοίχων αντιστήριξης :	116
4.11 Ανάλυση και μεθοδολογία υπολογισμών :	116
4.11.1 AQUA – Υλικά και διατομές	116
4.11.2 SOFIMSHA – Εισαγωγή και εξαγωγή των πεπερασμένων στοιχείων και κατασκευή δοκών.	117
4.11.3 SOFILOAD – Γεννήτρια φορτίων για πεπερασμένα στοιχεία και έργα πλαισίου.	118

4.11.4 ASE – Γενική στατική ανάλυση της δομής των πεπερασμένων στοιχείων	118
4.11.5 AQB – Σχεδιασμός διατομών και από προεντεταμένο σκυρόδεμα και συνθετών διατομών	119
4.12 Κάθετες πιέσεις εδάφους :	120

### **Πρόλογος :**

Η παρακάτω εργασία εκπονήθηκε κατά την διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2014-2015 και πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε. του ΤΕΙ Πατρών.

Αποτελεί τη πτυχιακή εργασία του Τσαρουχά Ι.Ιωάννη και της Αλεξοπούλου Φ.Παναγιώτας και εκπονήθηκε υπο την επίβλεψη της κ.Δρ.Βγενοπούλου του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε. Πατρών.

Ως θέμα της πραγματεύεται 1) τα γεωτεχνικά όργανα παρακολούθησης συγκλίσεων στις σήραγγες τόσο πριν όσο και μετά απο την ολοκλήρωση του έργου και 2)τη γενική παρουσίαση του έργου και των τεχνικογεωλογικών συνθηκών κατά την διάνοιξη της σήραγγας Δερβενίου Τ8 και της σήραγγας διαφυγής της την Χ.Θ.52+225 έως 52+895 που εκτείνεται στον αριστερό κλάδο του αυτοκινητόδρομου και εξυπηρετεί την κίνηση με κατεύθυνση από Πάτρα προς Κόρινθο.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια μας για την καθοδήγηση, την ουσιαστική υποστήριξη και το ενδιαφέρον τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

## Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

**1.1 Ορισμός :** Μία σήραγγα είναι ένα υπόγειο πέρασμα. Ο ορισμός του τι αποτελεί μία σήραγγα δεν είναι καθολικά αποδεκτός. Παρ' όλα αυτά, γενικά, οι σήραγγες έχουν τουλάχιστον δύο φορές μεγαλύτερο μήκος από το πλάτος τους. Επιπλέον, πρέπει να είναι πλήρως κλεισμένες από όλες τις πλευρές, εκτός από τα ανοίγματα σε κάθε πλευρά.

**1.2 Χρησιμότητα :** Μια σήραγγα μπορεί να αποτελεί δίοδο για πεζούς , ποδηλάτες μηχανοκίνητα οχήματα , για μεταφορικά μέσα σταθερής τροχιάς ( τραίνα) ή πλοία. Μερικές από αυτές χρησιμοποιούνται ως υδραγωγεία (κατασκευασμένες αποκλειστικά για τη μεταφορά νερού), ως αποχετευτικοί αγωγοί ενώ άλλες φιλοξενούν τηλεπικοινωνιακά καλώδια.

Από περιβαλλοντολογικής πλευράς υπάρχουν ακόμα και σήραγγες για τη διέλευση , από ορισμένα σημεία , ειδών ζώων που είναι υπό εξαφάνιση.

Τέλος , κυρίως , σε σκοτεινούς σταθμούς στην ανθρώπινη ιστορία -περιόδους πολέμου - έχουν κατασκευαστεί σήραγγες ως μέσο για την είσοδο ή διαφυγή από μια περιοχή.

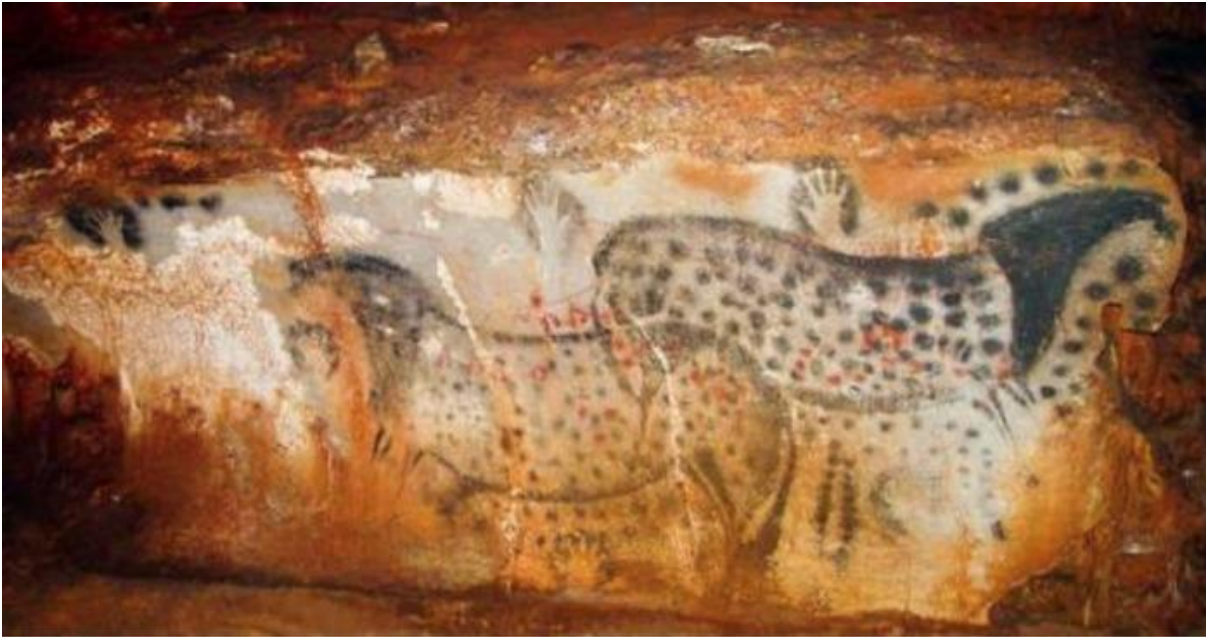
### 1.3 Μια σταγόνα ιστορία....





Παρότι ιστορικά το πρώτο υπόγειο έργο εκσκαφής χρονολογείται γύρω στο 2180 – 2160 π.Χ και είναι η σήραγγα των Βαβυλωνίων κάτω από τον Ευφράτη ποταμό μήκους 914,4 μέτρων εμείς θα τολμούσαμε να πούμε ότι η ηλικία των σηράγγων είναι σχεδόν ίση με αυτή της ύπαρξης της ανθρώπινης ζωής στον πλανήτη Γη.

Ήδη από τους παλαιολιθικούς χρόνους συναντούμε μια πρώιμη , αν θέλετε μορφή υπόγειων έργων καθώς οι σπηλιές ήταν τα πρώτα οικήματα των ανθρώπων. Όσο ο πληθυσμός μεγάλωνε η ανάγκη για περισσότερο χώρο ήταν κάτι το οποίο ώθησε τους πρωτόγονους τόσο στην πρώτη μορφή εκσκαφής και υποστύλωσης με απλά μέσα όσο και στο "στολισμό" των σπηλαίων αυτών με λιθογραφίες.





Με την πάροδο των αιώνων και αφού ο άνθρωπος κατανόησε την αξία των πολυτίμων λίθων η τεχνογνωσία πάνω σε θέματα εκσκαφής και υποστύλωσης γνώρισε μεγάλη άνθιση. Αυτό που όμως αποτέλεσε σταθμό για την εξέλιξη των υπόγειων έργων ήταν δυστυχώς ο πόλεμος.

Περίπου 3000 χρόνια πριν , όταν οι πρόγονοί μας άρχισαν να ανακαλύπτουν τεχνικές της δημιουργίας σταθερών και ισχυρών γεφυρών , ανακάλυψαν επίσης νέο τρόπο σύνδεσης δύο σημείων της γης - σήραγγες !

Αυτή η ανακάλυψη αρχικά δεν έγινε για τη μεταφορά αγαθών και ανθρώπων σε δυσπρόσιτα μέρη , αλλά και για αμυντικούς σκοπούς στις περιοχές στρατιωτικής σημασίας ή βασιλικές θέσεις ( σήραγγες κάτω από τα κάστρα ) .

Βαβυλώνιοι και Πέρσες αρχιτέκτονες ήταν οι πρώτοι που είδαν το τεράστιο δυναμικό που διάθεταν τα υπόγεια δίκτυα των σηράγγων .

Αυτές οι σήραγγες άρδευσης χρησιμοποιούνται για την μεταφορά του νερού κάτω από τις ερήμους , επιτρέποντας έτσι τη ζωή σε ορισμένα από τα πιο εχθρικά εδάφη στον πλανήτη Γη ( Η Ιρανική πόλη Gonabad εξακολουθεί να έχει ένα ενεργό δίκτυο των σηράγγων 2700 ετών ) . Στη Βαβυλωνία , βασιλικές οικογένειες απολάμβαναν φρέσκο νερό από τον Ευφράτη , που έφτανε σε αυτές μέσω ενός , επενδυμένου με τούβλα , υπόγειου έργου 900 μέτρων.

Οι Έλληνες και οι Ρωμαίοι πήραν όλη αυτή τη γνώση της Βαβυλώνας και της Αρχαίας Αιγύπτου , και την εξέλιξαν . Μέσω αυτής της εξέλιξης ήταν σε θέση να δημιουργήσουν σήραγγες που να επιτρέπουν την παρέλαση των στρατευμάτων , να μεταφέρουν το νερό μέσα από τα βουνά , και να επιτρέπουν την διέλευση πεζών σε πολύ σκληρά εδάφη . Ακόμη και σήμερα οι ιστορικοί αναρωτούνται πόσο εργατικό δυναμικό χρειάστηκε για την κατασκευή της σήραγγας μεταξύ Νάπολης και του Pozzuoli που δημιουργήθηκε περίπου 36 π.Χ. . Αυτό το απίστευτο έργο ήταν μήκους 1463 μέτρων , πλάτους 7 μέτρων και ύψους 9 μέτρων ενώ είχε ακόμη και φρέατα εξαερισμού . Λιγότερο από 100 χρόνια αργότερα, το 41 μ.Χ. , οι Ρωμαίοι χρησιμοποίησαν , μέσα σε 11 χρόνια , περίπου 30.000 εργάτες για να αποκτήσουν ακόμη μια μεγαλύτερη σήραγγα που ήταν 5,6 χιλιομέτρων .

Κατά τη διάρκεια του Μεσαίωνα , οι σήραγγες χρησιμοποιούνταν σχεδόν αποκλειστικά για την εξόρυξη λίθων ή για στρατιωτικούς σκοπούς . Με την επίδραση της Αναγέννησης για τα μέσα μαζικής μεταφοράς , άρχισαν να αναπτύσσονται συναλλαγές με άλλες μακρινές χώρες .

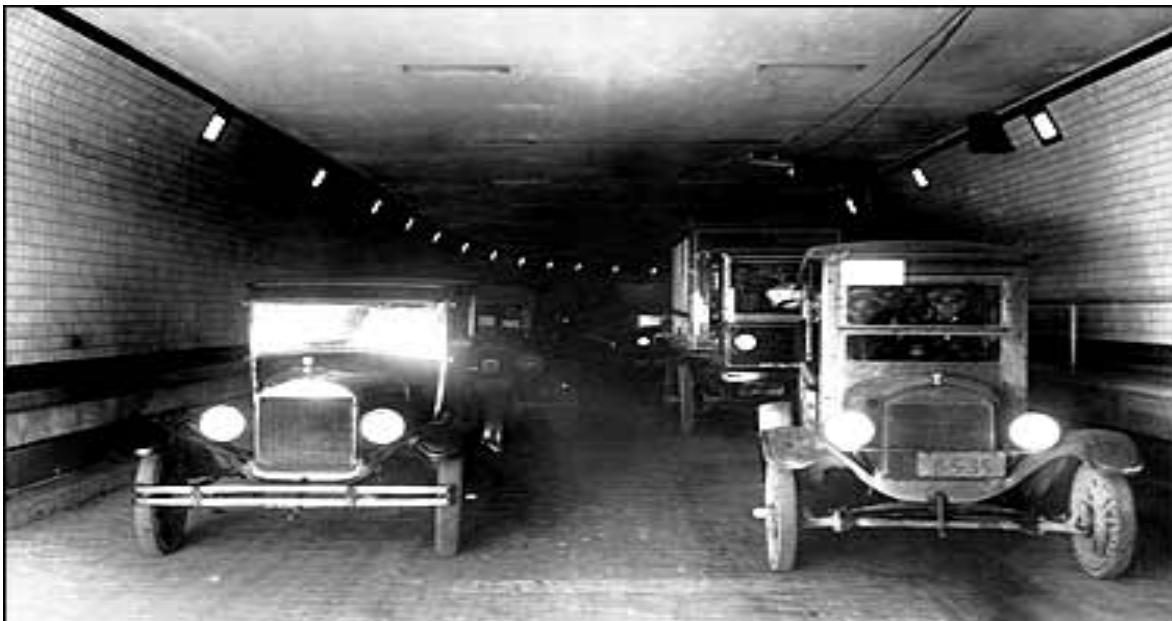
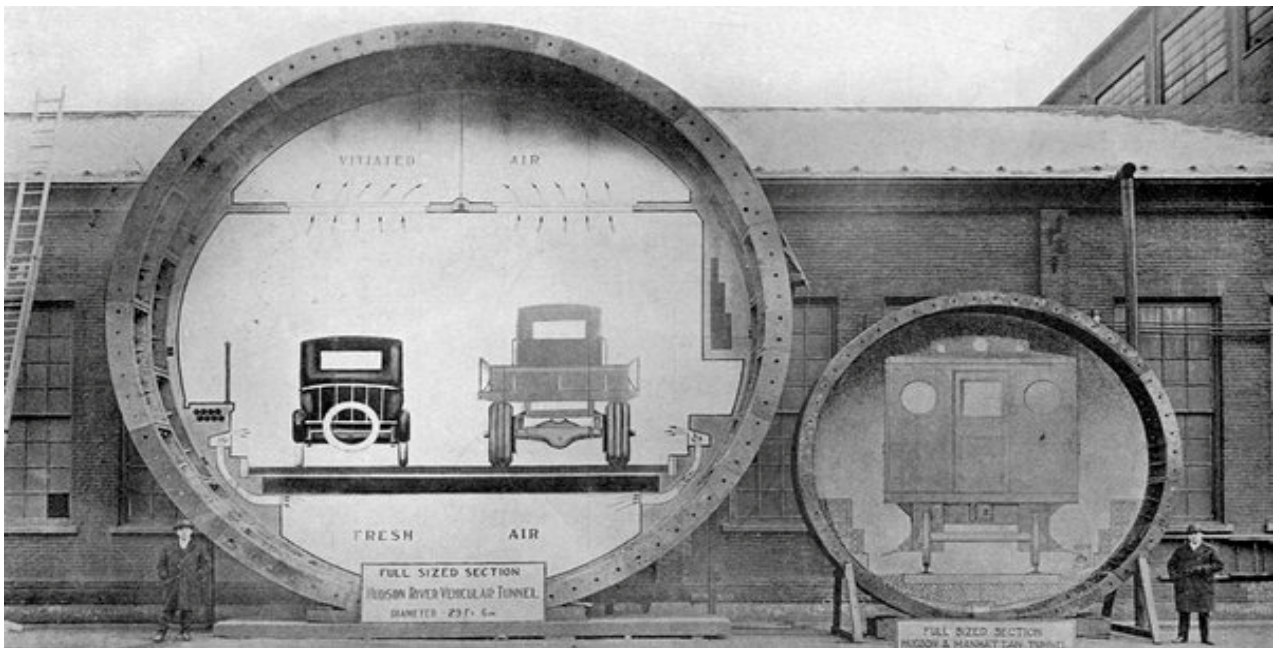
Εκατοντάδες μικρότερες σήραγγες δημιουργήθηκαν από τα μέσα του 1600 και του 19ου αιώνα , αλλά από τότε ήρθε η νέα κινητήρια δύναμη της κατασκευής σηράγγων - σιδηρόδρομοι . Αυτή η νέα μορφή της μεταφοράς σύντομα ενεργοποίησε τη διάδοση των σηράγγων σε ολόκληρο τον κόσμο .

#### 1.4 Παραδείγματα υπόγειων έργων :

- κατακόμβες = αποτέλεσαν αρχικά υπόγειους τάφους των κατωτέρων τάξεων που δεν ήταν σε θέση να αγοράσουν γη για το σκοπό αυτό και μετέπειτα εξελίχθηκαν σε χώρους διαφυγής και λατρείας του θεού κατά τις περιόδους δίωξης των χριστιανών από τους ειδωλολάτρες (εξ ου και οι συμβολικές νωπογραφίες όπως ο ιχθύς , το πτηνό φοίνικας , η άγκυρα κ.α.)



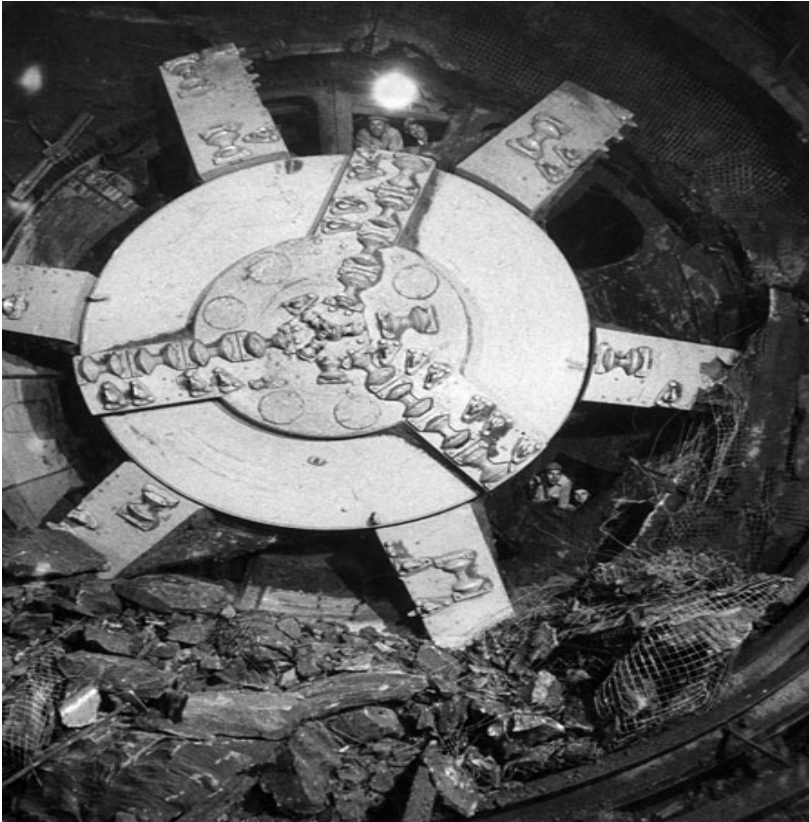
- Κατά την διάρκεια της Βικτωριανής εποχής(19ος-20ος αιώνας) κατασκευάστηκαν τα πρώτα υπόγεια συστήματα αποχέτευσης τα οποία στην διάρκεια των Α και Β παγκόσμιων πολέμων αφού επεκταθήκαν χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη στρατιωτικών επιχειρήσεων κάτω από τις γραμμές της Γερμανικής Αυτοκρατορίας. Η μέθοδος αυτή ήταν αθόρυβη και δύσκολη να ανιχνευτεί.
- Το 1927 κατασκευάστηκε η σήραγγα αυτοκινητόδρομου που συνδέει το νησί Μανχάταν με την Νέα Υόρκη. Είναι η πρώτη υπόγεια σήραγγα παγκοσμίως που βρίσκεται κάτω τον ποταμό Hudson River. Η σήραγγα Holland χρησιμοποιεί ένα σύστημα εξαερισμού για την απομάκρυνση των καυσαερίων όπου και στις δύο πλευρές του ποταμού Hudson, 84 ανεμιστήρες σε τέσσερα κτίρια αλλάζουν τον αέρα της σήραγγας κάθε 90 δευτερόλεπτα.



- Το γνωστό σχέδιο του σμηναγού Roger Busheld : Στην διάρκεια της ναζιστικής Γερμανίας 76 αιχμάλωτοι επιχειρήσαν να δραπετεύσουν από το στρατόπεδο συγκέντρωσης Stalag Luft III μέσω της κατασκευής σήραγγας 9 μέτρων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους με πλάτος μόλις 60 εκατοστών. Η κατασκευή έγινε με απλά μέσα (κουτάλια και γυμνά χέρια ) και η υποστήριξη των αμμώδη τοίχων γινόταν με ξύλινα κομμάτια παρμένα από τα κρεβάτια των κρατούμενων.







- Το 1952 κατασκευάστηκε από τον James S. Robbins το πρώτο μηχάνημα διάνοιξης σηράγγων TBM.
- Το 1962 τρεις κρατούμενοι στην φυλακή του Αλκατράζ δραπέτευσαν μέσω εκσκαφής μια υπόγειας σήραγγας , με κλεμμένα κουτάλια , από την οποία οδηγηθήκαν στο Σαν Φρανσίσκο και από τότε δεν θεαθήκαν ξανά.
- Το 1988 στην Ιαπωνία το πιο μακρύ και πιο βαθύ υπόγειο έργο για την διέλευση τρένων που συνδέει τα νησιά Honshu και Hokkaido ήρθε σε πέρας 239.8776 μέτρα κάτω από την στάθμη της θάλασσας.
- Γνωστή και μη εξαιρετέα η σήραγγα της Μάγλης από το 1994 αποτελεί ένα πρωτόπορο έργο το οποίο μετά από 192 σχεδιασμούς και 6 χρόνια κατασκευής τελείωσε με κόστος ανερχόμενο στα 21 δις δολάρια γεγονός το οποίο το καθιστά το πιο ακριβό έργο μέχρι σήμερα.



### 1.5 Συγκριτικά με τις γέφυρες

- Ένα πλεονέκτημα είναι ότι η σήραγγα επιτρέπει την διέλευση πλοίων, ενώ μία χαμηλή γέφυρα δεν μπορεί. Ειδικά σε σχετικά μικρές αποστάσεις και σε επίπεδο έδαφος στα δύο άκρα της γέφυρας είναι δύσκολη η κατασκευή μίας υψηλής γέφυρας. Μία χαμηλή γέφυρα θα πρέπει να είναι κινητή ώστε να επιτρέπεται η διέλευση πλοίων και αυτό μπορεί να δημιουργήσει καθυστερήσεις και μπουτιλιάρισμα στην κυκλοφορία που περνά πάνω στην γέφυρα. Οι υποθαλάσσιες σήραγγες, παρόλο που μπορεί να χρειάζεται να κατέλθουν βαθιά κάτω από το έδαφος ώστε να φτάσουν σε βάθος μεγαλύτερο του πυθμένα , μπορούν να εκκινήσουν την κάθοδο στην στεριά , χωρίς να προκαλούν μεγάλη ζημιά στον περιβάλλοντα χώρο, διότι είναι υπόγειες.
- Επιπλέον, οι γέφυρες μπορεί να κλείσουν σε περίοδο σφοδρών ανεμών για λόγους ασφαλείας, ενώ κάτι τέτοιο δεν ισχύει για τις σήραγγες.
- Επίσης, η εκσκαφή παράγει χώμα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εκχερσώσεις (δημιουργία στέρεου εδάφους σε περιοχή όπου υπήρχε νερό), όπως έγινε με στην κατασκευή της σήραγγας της Μάγχης(*Channel Tunnel*).
- Το πιο προφανές πλεονέκτημα είναι ότι οι γέφυρες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θαλάσσια περάσματα πολύ μεγάλου πλάτους, όπως την διώρυγα της Μάγχης, για την οποία και προτιμήθηκε η λύση της υποθαλάσσιας σήραγγας.

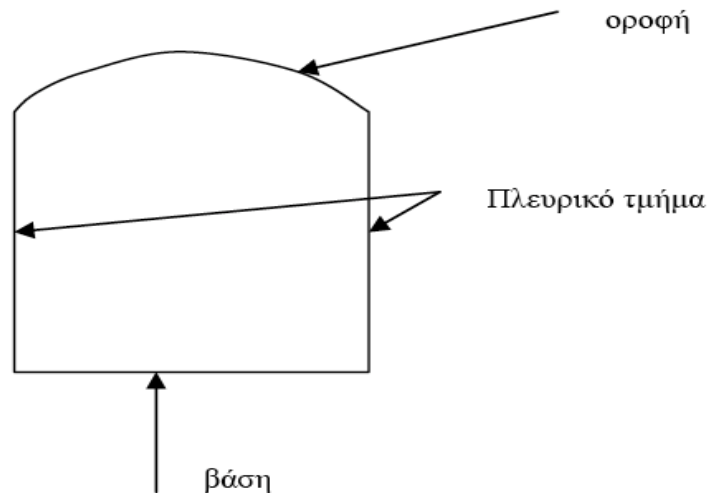
Ενώ τα έμμεσα πλεονεκτήματα πηγάζουν από τις ιδιαιτερότητες μιας συγκεκριμένης χρήσης, ανεξάρτητα της επιφανειακής ή της υπόγειας τοποθέτησής της, τα άμεσα απορρέουν από ορισμένα εν γένει χαρακτηριστικά του υπογείου χώρου (underground space), όπως:

- η υψηλή «διαθεσιμότητα» και οι μειωμένες ανάγκες για επιφανειακούς χώρους
- η ιδιότητα της απομόνωσης – απόκρυψης που εμφανίζουν, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένο βαθμό προστασίας,
- η υψηλή περιβαλλοντική προστασία που προσφέρουν
- η μειωμένη επίδραση σε αυτά των ενεργών γεωλογικών φαινομένων (σεισμοί-διάβρωση – αποσάθρωση – απόθεση)
- ψηλότερη κατανάλωση καυσίμου λόγω της διακύμανσης κλίσεων εδάφους σε μια γέφυρα.

## Κεφάλαιο 2

### 2.1 Γενικά

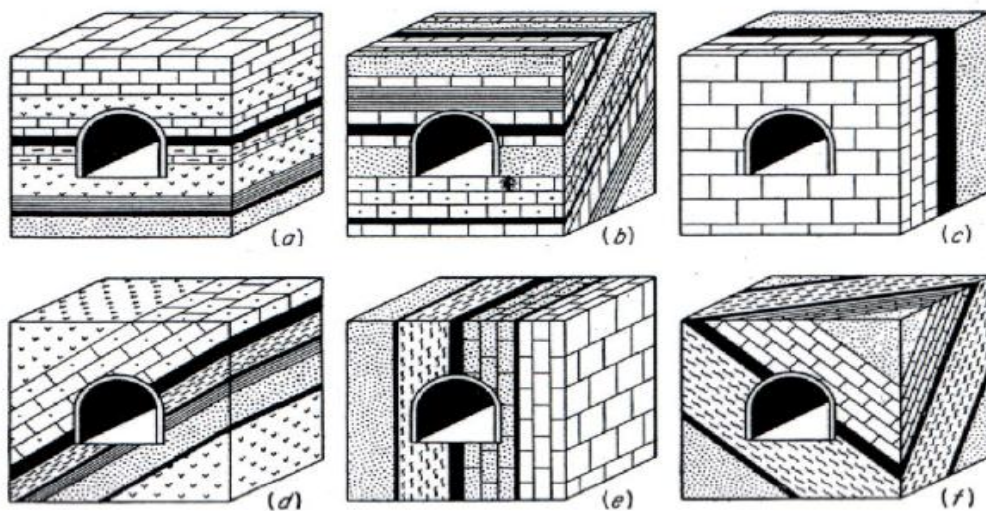
Οι σήραγγες είναι μια οριζόντια ή περίπου οριζόντια εκσκαφή μέσα στο έδαφος, ενώ όταν η εκσκαφή γίνεται κατακόρυφα τότε ονομάζεται φρέαρ. Η διατομή μιας σήραγγας αποτελείται κυρίως από τα ακόλουθα μέρη:



Η διάνοιξη σήραγγων μέσα σε άρρηκτο βράχο γίνεται συνήθως χωρίς υποστήριξη. Αντιθέτως όταν η διάνοιξη γίνεται μέσα σε βραχώμαζα τότε γίνεται χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, αγκυρίων βράχου οροφής, μεταλλικών πλαισίων ή και συνδυασμός κάποιων από τα παραπάνω. Είναι αυτονόητο ότι βαθιά μέσα σε έναν ορεινό όγκο αναπτύσσονται τάσεις που οφείλονται στο βάρος των υπερκειμένων «γαιών». Οι αναπτυσσόμενες τάσεις προκαλούν μετακινήσεις και αν υπάρχει η δυνατότητα το μεμονωμένο βραχώδες τεμάχιο θα κινηθεί. Συνεπώς κατά τη διάνοιξη της σήραγγας σε υψηλής αντοχής άρρηκτο βράχο με ψαθυρή θραύση είναι δυνατό να εμφανισθεί το φαινόμενο «εκτίναξης τεμαχών βράχου», ενώ αν το πέτρωμα παρουσιάζει πιο πλαστική συμπεριφορά θα υπάρξει πιο αργή μετατόπιση βραχωδών τεμαχών που τελικά θα καταπέσουν μέσα στη σήραγγα. Σε κάθε περίπτωση η διάνοιξη σήραγγας προκαλεί μετακινήσεις στο περιβάλλον πέτρωμα τείνουν να μειώσουν τη διατομή του ανοίγματος, ενώ οι τάσεις που επικρατούν στη γειτονική μορφή είναι κυρίως εφελκυστικές. Η χρήση ικανής υποστήριξης (τόσο σε άμεση εφαρμογή αμέσως μετά τη διάτρηση που ονομάζεται προσωρινή υποστήριξη, όσο και με την εφαρμογή της τελικής υποστήριξης που καλείται τελική επένδυση γύρω από το άνοιγμα μειώνει και τελικά ελαχιστοποιεί τις αναμενόμενες μετακινήσεις. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατό η εκσκαφή να παραμείνει ανυποστήρικτη για ορισμένο χρονικό διάστημα.

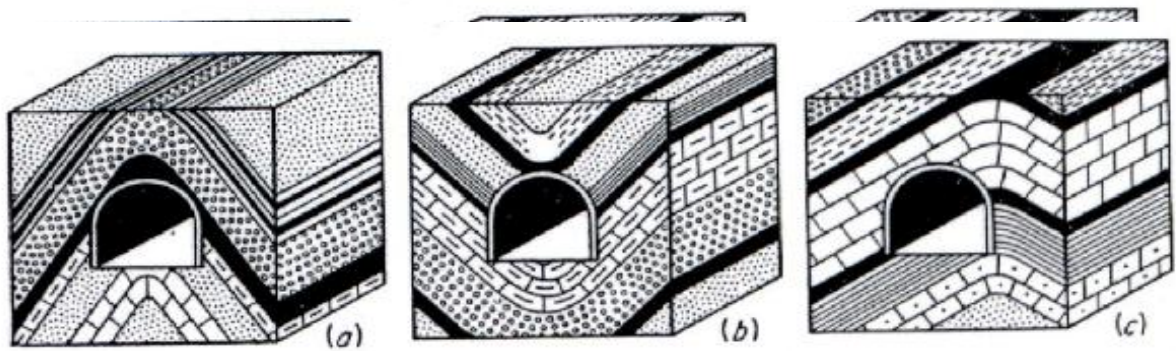
## 2.2 Επίδραση της στρωματογραφίας στην κατανομή των τάσεων κατά μήκος του άξονα των σηράγγων

Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας αναπτύσσονται από στατικής άποψης συνήθως διατμητικές τάσεις γύρω από αυτή με τη μορφή ενός τόξου (φαινόμενα θόλου). Έτσι οι σήραγγες επενδύονται προκειμένου οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις να παραλαμβάνονται από τη διατμητική αντοχή των πετρωμάτων αλλά και από την επένδυση. Όταν το πέτρωμα είναι πυριγενές και μάλιστα άρρηκτο τότε η μεταβίβαση των τάσεων γίνεται μέσω φαινομένων θόλου, ενώ η περίπτωση αυτή μπορεί να συναντηθεί και στην περίπτωση (a) και (c) της επόμενης εικόνας, όπου τα γεωλογικά στρώματα είτε παρουσιάζονται οριζόντια ή έχουν μικρή κλίση παράλληλα με τον άξονα της σήραγγας (περίπτωση a) ή είναι κάθετα προς τον άξονα της σήραγγας. Οι περιπτώσεις (d) και (f) της επόμενης εικόνας παρουσιάζουν συγκέντρωση τάσεων στη μια πλευρά της σήραγγας, ενώ η περίπτωση (e) παρουσιάζει υψηλή συγκέντρωση τάσεων στην κορυφή της αψίδας.

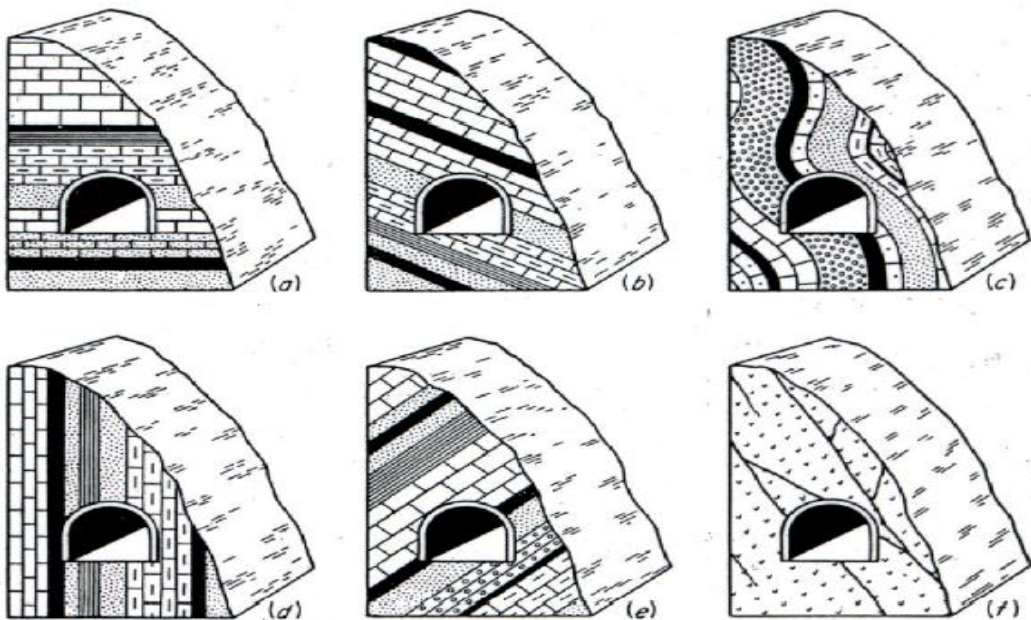


Εικόνα. Επίδραση προσανατολισμού στρωματογραφίας σε σχέση με τον άξονα της σήραγγας στην ανάπτυξη διατμητικών τάσεων (από Desio, “Geologia applicata all’ Ingegneria”, Hoepli, Milan, Italy).

Στην περίπτωση κατασκευής σηράγγων σε πτυχωμένα στρώματα και συγκεκριμένα σε αντίκλινο η υποστήριξη της σήραγγας δέχεται μειωμένες κατακόρυφες τάσεις, ενώ αντίθετα στην περίπτωση σύγκλινου οι κατακόρυφες τάσεις είναι αυξημένες, όπως φαίνεται και από την επόμενη εικόνα.



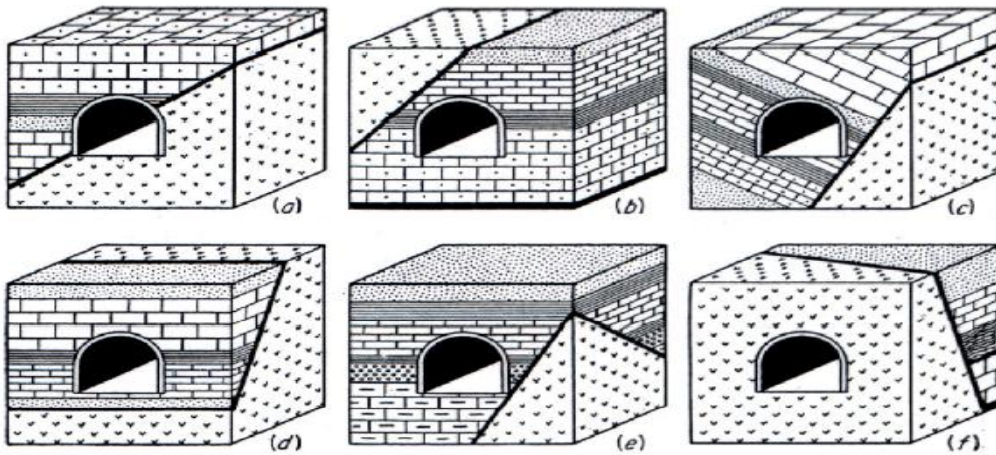
Εικόνα. Επίδραση πτύχωσης γεωλογικών στρωμάτων σε σχέση με τον άξονα της σήραγγας (από Desio, “Geologia applicata all’ Ingegneria”, Hoepli, Milan, Italy).



Εικόνα. Επικρατούσες συνθήκες διάνοιξης σήραγγων δίπλα σε απότομα πρανή (από Desio, “Geologia applicata all’ Ingegneria”, Hoepli, Milan, Italy).

Τέλος η διέλευση σήραγγας μέσα από ζώνες διάρρηξης απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, αφού οι ζώνες αυτές χαρακτηρίζονται ως ζώνες μικρής αντοχής σε διάτμηση. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε βαριάς μορφής υποστήριξη της διατομής της σήραγγας στις θέσεις αυτές, ενώ αν οι ζώνες παρουσιάζονται πληρωμένες με αργιλικά υλικά ενδεχομένως υπάρχουν πιθανά προβλήματα διογκώσεων. Ο γεωλόγος οφείλει να βρει στοιχεία που θα οδηγήσουν στο χαρακτηρισμό των ρηγμάτων αυτών ως «ενεργά» ή «μη ενεργά» γιατί και ο τρόπος υποστήριξης είναι διαφορετικός (εύκαμπτη ή δύσκαμπτη αντίστοιχα). Επιπλέον αν η ζώνη διάτμησης δεν έχει αργιλικό υλικό είναι ζώνη με έντονη κυκλοφορία υπόγειου νερού. Σε περιπτώσεις που συναντάται ρήγμα κατά τη χάραξη του άξονα της σήραγγας συνήθως γίνεται προσπάθεια να περάσει ο άξονας σχεδόν κάθετα το ρήγμα, γιατί μόνο τότε η επιρροή του στην επένδυση της σήραγγας είναι η ελάχιστη δυνατή.

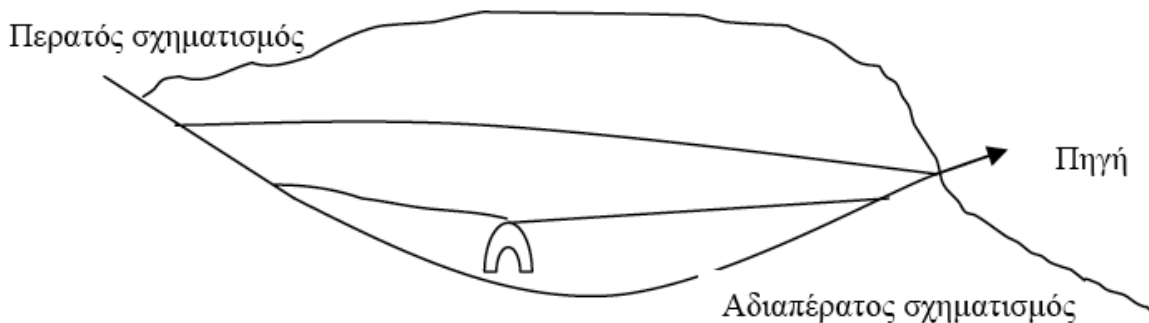




Εικόνα. Επικρατούσες συνθήκες διάνοιξης σήραγγων σε ρηξιγενείς ζώνες (από Desio, “Geologia applicata all’ Ingegneria”, Hoepli, Milan, Italy).

### 2.3 Υπόγεια νερά σε σήραγγες

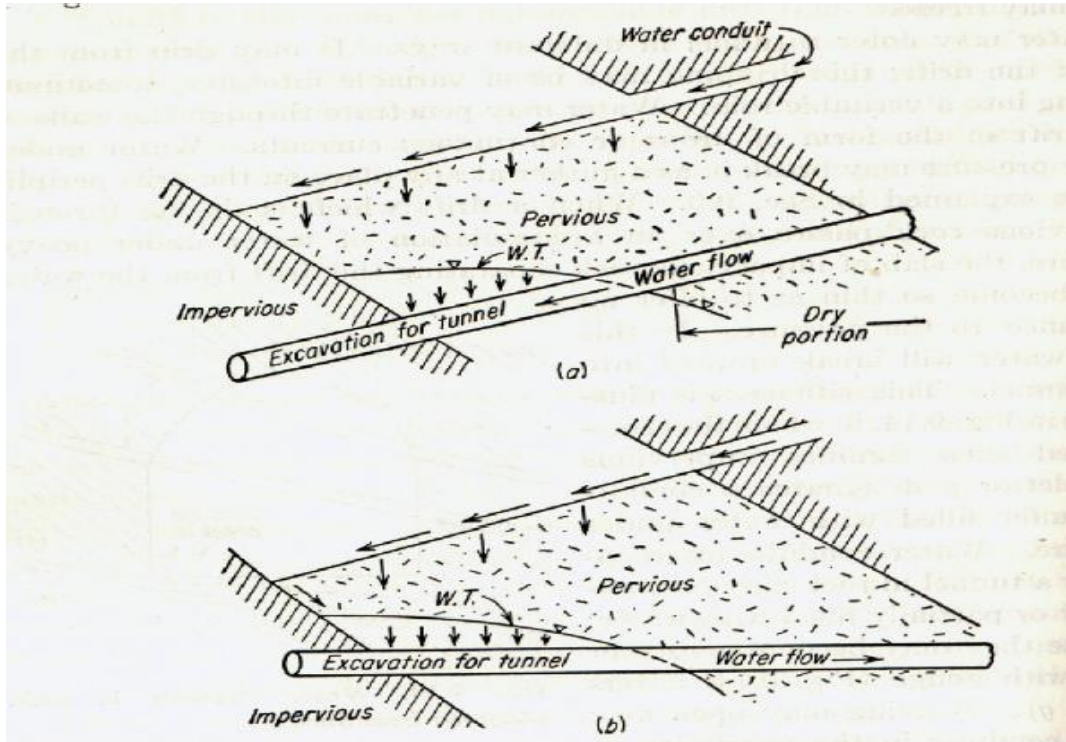
Οι σήραγγες γενικά λειτουργούν ως αποδέκτες των υπόγειων νερών της περιοχής. Το υπόγειο νερό είτε ρέει μέσα στο εσωτερικό της σήραγγας σε μεγάλες ποσότητες και με μεγάλες ταχύτητες, ή στάζει από την οροφή ή τα πλαϊνά τοιχώματα της σήραγγας. Η ροή του νερού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πρωτογενές ή δευτερογενές πορώδες που παρουσιάζει το κάθε πέτρωμα. Επίσης οι σήραγγες οδηγούν και στην ταπείνωση της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα:



Επιπλέον στα ανθρακικά πετρώματα αν υπάρχει εκτεταμένο καρστικό σύστημα τα νερά θα διακινούνται μέσω αυτού και αν η σήραγγα βρίσκεται πάνω από τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, τότε οι εισροές των υδάτων θα είναι αιφνίδιες, ενώ τα νερά θα είναι κυρίως όμβρια και θεωρείται ότι η σήραγγα βρίσκεται στη ζώνη μετάβασης αυτών. Αντιθέτως αν η



σήραγγα βρίσκεται κάτω από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, τότε θα υπάρχει έντονη εισροή υδάτων και η σήραγγα θα βρίσκεται στη ζώνη κορεσμού. Στα πυριγενή πετρώματα δε θα υπάρχει τόσο έντονα αναπτυγμένο υπόγειο δίκτυο και το νερό κινείται μόνο μέσα από τις διακλάσεις και τις ρωγμές.



## 2.4 Συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας

Προκειμένου να γίνει η κατασκευή μιας σήραγγας δεν αρκεί μόνο λεπτομερής γεωλογική χαρτογράφηση και ερευνητικές γεωτρήσεις που θα οδηγήσουν στη σύνταξη της γεωλογικής τομής πρόβλεψης. Απαιτείται η εξέταση όλων εκείνων των παραμέτρων που επηρεάζουν την τεχνική συμπεριφορά της βραχώμαζας, όπως (βαθμός αποσάθρωσης, ποσοστό διακλάσεων και ρωγμών, πλήρωσή τους ή όχι με κάποιο υλικό κλπ) που ενδεχομένως να τη μεταβάλλουν αρκετά. Απαιτείται συνεπώς μια ειδική ταξινόμηση της βραχώμαζας που να αντανakλά τη συμπεριφορά της κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας. Έτσι από διάφορους ερευνητές έχουν προταθεί συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας που τη συσχετίζουν με ποσοτικές εκφράσεις. Στη συνέχεια περιγράφονται οι καθιερωμένες στην πράξη ταξινομήσεις για σήραγγες και η συσχέτισή τους με τις αναγκαίες υποστηρίξεις.

### 2.4.1 Ταξινόμηση Terzaghi, 1946

Ο Terzaghi ταξινόμησε τα πετρώματα σε έξι (6) κατηγορίες ανάλογα με την αντοχή τους και τις διακλάσεις τους. Με τη συγκεκριμένη ταξινόμηση εκτιμάται το μέγιστο ύψος της ζώνης που επηρεάζεται και φορτίζει την υποστήριξη της οροφή της ορθογωνικής σήραγγας σε συνάρτηση με το πλάτος της  $b$  και το ύψος της  $h$ , η οποία έχει πάχος υπερκευμένων γαιών ίσο με:  $1.5*(b+h)$ .

A/A	Κατηγορία πετρώματος	Υψος φορτίου
1	Συμπαγές σκληρό	0
2	Σκληρό σε στρώσεις ή σχιστολιθικό	$0 \div 0.5*b$
3	Συμπαγές μέτρια διακλασμένο	$0 \div 0.25*b$
4	Μέτρια διακλασμένο	$0.25*b \div 0.35*(b+h)$
5	Πολύ διακλασμένο	$0.35*(b+h) \div 1.1*(b+h)$
6	Ενετελώς θρασυμένο	$1.1*(b+h)$
7	Συμπιεστό σε μέσο βάθος	$1.1*(b+h) \div 2.1*(b+h)$
8	Συμπιεστό σε μεγάλο βάθος	$2.1*(b+h) \div 4.50*(b+h)$
9	Διογκούμενο	μέχρι 80m ανεξάρτητα από το ύψος και πλάτος της σήραγγας

Στις προαναφερθείσες τιμές θεωρείται ότι η σήραγγα βρίσκεται κάτω από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, αν βρίσκεται συνεχώς πάνω από αυτόν οι τιμές στις κατηγορίες 4-6 μπορούν να μειωθούν κατά 50%.

### 2.4.2 Ταξινόμηση Lauffer, 1958

Ο Lauffer ταξινόμησε τα πετρώματα ανάλογα με την πετρογραφική τους σύσταση, τις διακλάσεις τους και δίνει και στοιχεία για διάνοιξη σήραγγας σε εδάφη.

A/A	Τύπος πετρωμάτων	Διάρκεια ευστάθειας χωρίς υποστήριξη	Μέγιστη απόσταση υποστηριγμάτων
A	Συμπαγή (πυριγενή, παχυστρωματώδη ιζηματογενή, γνεύσιος χωρίς χαρακτηριστική σχιστότητα)	20 έτη	4m
B	Διακλασμένα (διακλασμένα πυριγενή, λεπτοστρωματώδη ιζηματογενή, μεταμορφωμένα με χαρακτηριστική σχιστότητα	6 μήνες	4m
C	Έντονα διακλασμένα (έντονα διακλασμένα πυριγενή, αργιλικόι σχιστόλιθοι και μικρότερης αντοχής μεταμορφωμένα πετρώματα)	1 εβδομάδα	3m
D	Μαλακά πετρώματα, αργιλικόι σχιστόλιθοι, μερικά αποσθρωμένα και διαταραγμένοι σκληρά πετρώματα	5 ώρες	1.5m
E	Πιο μαλακά πετρώματα, έντονα αποσθρωμένα και διαταραγμένοι σκληρά πετρώματα	20 λεπτά	0.8m
F	Αποσθρωμένοι και διαταραγμένοι αργιλικόι σχιστόλιθοι, καλής συνεκτικότητας εδάφη, άμμοι και κροκάλες με φυσική υγρασία	2 λεπτά	0.4m
G	Συνεκτικόι εδάφη μικρής έως μέσης συνεκτικότητας, κορεσμένοι άμμοι, κροκάλες και οργανικόι εδάφη	10 δευτερόλεπτα	0.15m

### 2.4.3 Ταξινόμηση κατά Bieniawski, 1974, τροποποίηση 1979

Ο Bieniawski παρατήρησε ότι για μια αντιπροσωπευτική ταξινόμηση μιας βραχώμαζας δε μπορεί να ληφθεί υπόψη μια παράμετρος, αλλά η συμπεριφορά της κατά τη διάνοιξη σηράγγων είναι συνδυασμός περισσότερων παραμέτρων, εύκολα μετρούμενων στο ύπαιθρο, που την ποσοτικοποιούν. Συγκεκριμένα η ταξινόμηση αυτή λαμβάνει υπόψη της τις ακόλουθες παραμέτρους:

1. Την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη ή την αντοχή σημειακής φόρτισης
2. Το δείκτη RQD (Rock Quality Destignation): που ορίζεται το επί τοις εκατό άθροισμα τεμαχών βράχου με μήκος μεγαλύτερο από 10cm μεταξύ δύο ασυνεχειών προς το συνολικό μήκος διάτρησης
3. Τη συχνότητα και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών
4. Την κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών
5. Το υπόγειο νερό

Η βραχώμαζα σύμφωνα με τον Bieniawski ταξινομείται σε πέντε κατηγορίες σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα.

Α. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥΣ									
1	Αντοχή συμπαγούς πετρώματος	Δείκτης αντοχής σημειακής φέρουσας (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Προσμάται η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη		
		Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
Βαθμός			15	12	7	4	2	1	0
2 Ποσότητα πυρίνη (RCO%)			90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
Βαθμός			20	17	13	8	3		
3 Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών (m)			>2	0,6-2	0,2-0,6	0,06-0,2	<0,06		
Βαθμός			20	15	10	8	5		
4	Κατάσταση διακλάσεων		Πολύ τραχείες επιφάνειες. Ασυνεχείς. Σκληρά τοιχώματα	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός <1mm. Σκληρά τοιχώματα	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός <1mm. Μαλακά τοιχώματα	Εμφάνεια αλλοθίωσης ή υλικό πλήρωσης <5mm ή διακλάσεις ανοικτές 1 - 5mm. Συνεχείς διακλάσεις	Μαλακό υλικό πλήρωσης πάχους > 5mm ή διακλάσεις ανοικτές > 5mm. Συνεχείς διακλάσεις		
	Βαθμός			30	25	20	10	0	
5	Υπόγειο νερό	Εισροή για 10m μήκους της σήραγγας	Καμιά	< 10lt/min	10-25lt/min	25-125lt/min	>125lt/min		
		Τμή κλάσματος πίεσης νερού διακλάσεων δια της μέγιστης κύριας τάσης	0	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
	Γενικές συνθήκες		Εντελώς στεγνό	Λίγο υγρό	Υγρό	Νερό υπό πίεση	Σοβαρά προβλήματα νερού		
	Βαθμός			15	10	7	4	0	
Β. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ									
Διεύθυνση και κλίση διακλάσεων			Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής		
Βαθμός	Σήραγγες		0	-2	-5	-10	-12		
	Θεμελιώσεις		0	-2	-7	-15	-25		
	Προνή		0	-5	-25	-50	-60		
Γ. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ									
Κατηγορία			I	II	III	IV	V		
Χαρακτηρισμός			Πολύ καλή	Καλή	Μέτρια	Γνωχή	Πολύ πτωχή		
Βαθμολογία			100-81	80-61	60-41	40-21	<20		
Δ. ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ									
Κατηγορία			I	II	III	IV	V		
Μέσος χρόνος διατηρήσεως τομής			10 έτη για ανοίγμα 15m	6 μήνες για ανοίγμα 8m	1 εβδομάδα για ανοίγμα 5m	10 ώρες για ανοίγμα 2,5m	30 λεπτά για ανοίγμα 1m		
Συνολή βραχώμαζας			>400	300-400	200-300	100-200	<100		
Γωνία τριβής βραχώμαζας			>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	<15°		

Ο χαρακτηρισμός του προσανατολισμού των ασυνεχειών δίνεται σε σχέση με τον προσανατολισμό του έργου από τον επόμενο πίνακα (Wickham et al. 1972).



Διεύθυνση κάθετη στον άξονα της σήραγγας				Διεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα της σήραγγας	
Προχώρηση σύμφωνα με την κλίση		Προχώρηση κάθετα προς την κλίση			
Κλίση 45 <sup>ο</sup> -90 <sup>ο</sup>	Κλίση 20 <sup>ο</sup> -45 <sup>ο</sup>	Κλίση 45 <sup>ο</sup> -90 <sup>ο</sup>	Κλίση 20 <sup>ο</sup> -45 <sup>ο</sup>	Κλίση 45 <sup>ο</sup> -90 <sup>ο</sup>	Κλίση 20 <sup>ο</sup> -45 <sup>ο</sup>
Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής	Μέτρια
Κλίση 0 <sup>ο</sup> -20 <sup>ο</sup> : Δυσμενής ανεξάρτητα από την κατεύθυνση					

Στον επόμενο πίνακα ο Bieniawski συσχετίζει την κατηγορία της βραχώμαζας που έχει προκύψει από την ταξινόμησή του με τα μέτρα υποστήριξης για σήραγγα μικρού βάθους και διαμέτρου 10m που διανοίγεται με συμβατικές μεθόδους και με πεταλοειδή διατομή. Ο Bieniawski αναφέρει ότι ο πίνακας έχει δημιουργηθεί από εμπειρίες που αντιπροσωπεύουν τις τότε τεχνολογικές εφαρμογές. Συνεπώς θα πρέπει να υπάρχει συνεχής έλεγχος κατά τη διάρκεια της κατασκευής μια σήραγγας, αφού υπάρχει πιθανότητα η προτεινόμενη αξιολόγηση να μην είναι εφαρμόσιμη στην περίπτωση αυτή.

Κλάση βραχώμαζας	Εκσκαφή	ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ		
		Κοχλίας (20mm διάμετρος)	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Χαλύβδινα πλαίσια
I (81-100)	Ολομέτωπη προχώρηση 3m.	Κατά κανόνα δεν απαιτείται υποστήριξη εκτός ίσως από κατά θέσεις σημειακές κοχλιώσεις.		
II (61-80)	Όλο το μέτωπο 1-1.5m προχώρηση. Πλήρης υποστήριξη 20m πριν το μέτωπο.	Τοπικές κοχλιώσεις στην οροφή, μήκους 3m, πυκνότητας 2.5m. Κατά θέσεις πλέγμα.	50mm στην οροφή, όπου χρειάζεται.	
III (41-60)	Προχώρηση 1.5-3m στο ανώτερο τμήμα πρώτα. Εναρξη υποστήριξης αμέσως μετά από κάθε ανατίναξη. Πλήρη ζυποστήριξη 10m από το μέτωπο διάνοιξης.	Συστηματική κοχλίωση με κοχλίες μήκους 4m ανά 1.5-2m στην οροφή και στις παρειές. Πλέγμα στην οροφή.	50-100mm στην οροφή και τις παρειές.	Ελαφρά με αραιώση 1.5-2m
IV (21-40)	Προχώρηση 1-1.5m στο ανώτερο τμήμα πρώτα. Υποστήριξη ταυτόχρονα με την εκσκαφή έως 10m από το μέτωπο.	Συστηματική κοχλίωση με κοχλίες μήκους 4-5m ανά 1-1.5m στην οροφή και στις παρειές με πλέγμα.	100-150mm στην οροφή και 100mm στις παρειές.	Ελαφρά έως μέσα πλαίσια ανά 0.75-1.5m όπου χρειάζεται
V (20)	Πολλαπλά τμήματα προχώρησης. Στο ανώτερο τμήμα προχώρηση 0.5-1.0m, εγκατάσταση υποστήριξης συγχρόνως με την εκσκαφή. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αμέσως μετά την έκρηξη.	Συστηματική κοχλίωση με κοχλίες μήκους 5-6m ανά 1-1.5m με πλέγμα.	150-200mm στην οροφή, 150mm στις παρειές και 50mm στο μέτωπο.	Μέσα έως βαριά πλαίσια ανά 0.75m με gunite.

#### 2.4.4 Ταξινόμηση κατά Barton et al (N.G.I. – Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο)

Οι Barton, Lien και Laude πρότειναν ένα σύστημα ταξινόμησης βραχώμαζας δίνοντας όμως περισσότερη σημασία σε παραμέτρους σχετικές με την τραχύτητα των ασυνεχειών, το υλικό πλήρωσης αυτών κλπ. Η μέθοδος που προτείνεται βασίστηκε σε διακόσιες (200) περιπτώσεις κατασκευής σηράγγων, όπου όμως κυριαρχούσε η διάνοιξη σε μεταμορφωμένα και πυριγενή παρά ιζηματογενή πετρώματα, ενώ και οι ασυνέχειές τους συνήθως δεν είχαν υλικό πλήρωσης. Η ποιότητα της βραχώμαζας Q εκτιμάται σύμφωνα με τους ερευνητές αυτούς ως συνδυασμός έξι (6) παραγόντων ως ακολούθως:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

όπου  $J_n$ : είναι ο αριθμός των οικογενειών των ασυνεχειών,

Jr: είναι παράμετρος που εξαρτάται από την τραχύτητα των ασυνεχειών

Ja: είναι παράμετρος που χαρακτηρίζει το βαθμό εξαλλοίωσης των παρειών των ασυνεχειών

Jw: είναι συντελεστής αναγωγής νερού στις επιφάνειες ασυνεχειών

SRF: είναι ο συντελεστής αναγωγής τάσεων

Α. ΑΡΙΘΜΟΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ		Jn	
Συμπαγείς ή λίγες ασυνεχείες		0.5-1.0	
Μία οικογένεια		2.0	
Δύο οικογένειες	Για διασταυρώσεις 3Jn	4.0	
Τρεις οικογένειες	Για εισόδους 2Jn	9.0	
Τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες, πολύ διακλασμένο πέτρωμα		15.0	
Κονιορτοποιημένο πέτρωμα (σαν έδαφος)		20.0	
Σε περίπτωση εμφάνισης και τυχαίων οικογενειών ασυνεχειών γίνεται παρεμβολή			
Β. ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ		Jr	
Ασυνεχείς διακλάσεις		4.0	
Τραχείες, κυματοειδείς, ακανόνιστες		3.0	
Ομαλές, κυματοειδείς		2.0	
Τραχείες επίπεδες / ολισθηρές κυματοειδείς		1.5	
Ομαλές επίπεδες		1.0	
Ολισθηρές επίπεδες		0.5	
Ασυνεχείς με παχύ υλικό πλήρωσης χωρίς όμως να εφάπτονται τα τοιχώματα		0	
Όταν η μέση συχνότητα των κύριων οικογενειών διακλάσεων ξεπερνά τα 3m προστίθεται η τιμή 1			
Γ. ΥΛΙΚΟ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ		Ja	
α	Χωρίς υλικό πλήρωσης	Φ (ενδεικτική τιμή)	
	Επουλωμένες διακλάσεις	25°-30°	0.75
	Λιγη αποσαθρώσεως στις παρείες («κλεισμένες»)	25°-30°	1.0
	Αμμώδης υμένος – ελαφρά αποσαθρωμένες παρείες	20°-25°	2.0
	Ιλυοαργιλικός υμένος («σφιδρός»)	8°-16°	3.0
	Υμένος από ορυκτά αργιλικά ή μικρής γωνίας φ (τάλης, χλωρίτης, γύψος)		4.0
	Υμένος πάχους 1-2mm		
β	Με υλικό πλήρωσης		
	Από άμμο ή κονιορτοποιημένο πέτρωμα	25°-30°	4.0
	Από σφιγρή άργιλο πάχους <5mm (συνεχείς)	16°-24°	6.0
	Από μαλακή άργιλο πάχους <5mm (συνεχείς)	12°-16°	8.0
	Από διογκούμενη άργιλο πάχους <5mm (συνεχείς) (η τιμή εξαρτάται από το ποσοστό του διογκούμενου υλικού)	6°-12°	8.0-12.0
	Ζώνες από αποσυντεθειμένο πέτρωμα και άργιλο (ανάλογα με το είδος του υλικού)		6.0-8.0 ή 8.0-12.0
	Ζώνες από ιλυώδη ή αμμώδη άργιλο, λίγη μη μαλακή άργιλος		5.0
	Από σφιγρή άργιλο >5mm πάχους		10.0
	Από μαλακή άργιλο >5mm		13.0
	Από διογκούμενη άργιλο >5mm		13.0-20.0
Δ. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ		Jw	
Στεγνό πέτρωμα ή λίγο νερό (τοπικά 5l/min)		1.0	
Μέτρια εισροή νερού / μέση πίεση 1-2.5kg/cm <sup>2</sup>		0.66	
Μεγάλη παροχή ή πίεση (ρωγμές χωρίς υλικό πλήρωσης)		0.5	
Μεγάλη παροχή ή πίεση (ρωγμές με υλικό πλήρωσης που αποπλένεται)		0.33	
Υψηλή παροχή ή πίεση (10atm) με προοδευτική μείωση υψηλή συνεχής παροχή		0.2-0.1	
Αύξηση του συντελεστή Jw εφόσον υπάρχει αποστράγγιση			

Η ποσοτική εκτίμηση των παραπάνω συντελεστών δίνεται στον επόμενο πίνακα, ενώ έπειτα ακολουθεί και η ποιοτική ταξινόμηση της βραχώμαζας με βάση την πρόταση Barton et al.

Ε. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΓΩΓΗΣ ΤΑΣΕΩΝ			SRF	
α	Ασθενείς ζώνες που τέμνουν ή μπορούν να χαλαρώσουν τη βραχώμαζα με την κατασκευή της σήραγγας. Οι τιμές του SRF μειώνονται κατά 25-50% όταν οι κατατμημένες ζώνες δεν τέμνουν το έργο αλλά απλώς το επηρεάζουν			
	Αφθονες ασθενείς ζώνες με αργιλικό υλικό ή αποσπασθωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα για οποιοδήποτε βάθος		10	
	Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες όπως παραπάνω (βάθος σήραγγας <50m)		5.0	
	Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες (βάθος σήραγγας >50m)		2.5	
	Αφθονες κατατμημένες ζώνες σε σκληρό πέτρωμα χωρίς αργιλικό υλικό, χαλαρό περιβάλλον υλικό για οποιοδήποτε βάθος		7.5	
	Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες όπως παραπάνω (βάθος σήραγγας <50m)		5.0	
	Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες (βάθος σήραγγας >50m)		2.5	
	Χαλαρές ανοικτές ασυνέχειες έντονα διακλασμένη μάζα σε οποιοδήποτε βάθος		5.0	
β	Σκληρό πέτρωμα, κατάσταση τάσεων	$\sigma_2/\sigma_1$	$\sigma_1/\sigma_1$	
	Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια	>200	>13	2.5
	Μέσες τάσεις	200-10	13-0.66	1
	Υψηλές τάσεις, πολύ σφικτή δομή	10-5	0.66-0.33	0.5-2.0
	Μαλακή «εκτίναξη» σκληρού πετρώματος	5-2.5	0.33-0.16	5-10
	Έντονη «εκτίναξη» σκληρού πετρώματος	<2.5	<0.16	10-20
γ	Συμπιεστό πέτρωμα, πλαστική ροή όλκιμου πετρώματος κάτω από υψηλές τάσεις			
	Μέτρια πίεση από τη συμπίεστικότητα		5-10	
	Μεγάλη πίεση από τη συμπίεστικότητα		10-20	
δ	Διογκούμενο πέτρωμα, χημική διόγκωση σε συνάρτηση με την πίεση του νερού			
	Μέτρια πίεση		5-10	
	Μεγάλη πίεση		10-15	

$\sigma_2$ : αντοχή σε μονοαξονική θλίψη,  $\sigma_1$ : αντοχή σε εφελκυσμό,  $\sigma_1$ : κύρια τάση

Όταν η σήραγγα έχει ύψος υπερκειμένων μικρότερο από το εύρος της τότε προτείνεται αύξηση του SRF από 2.5 σε 5.

Ταξινόμηση ποιότητας βραχώμαζας με βάση τη μέθοδο Barton et al.

Q	Χαρακτηρισμός ποιότητας βραχώμαζας για σήραγγες
<0.01	Εξαιρετικά πτωχή
0.01-0.1	Πάρα πολύ πτωχή
0.1-1.0	Πολύ πτωχή
1.0-4.0	Πτωχή
4.0-10.0	Μέτρια
10.0-40.0	Καλή
40.0-100.0	Πολύ καλή
100.0-400.0	Πάρα πολύ καλή
>400.0	Εξαιρετικά καλή

Η εμπειρική σχέση που συνδέει τη φόρτιση υποστήριξης P με την ποιότητα της βραχώμαζας Q και την τραχύτητα των ασυνεχειών  $J_r$ , έχει προταθεί από τους

Barton et al σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$P = \frac{2}{J_r} \times Q^{-\frac{1}{3}} \quad P: \text{μόνιμη πίεση υποστήριξης της οροφής σε kg/cm}^2.$$

Οι Barton et al βασίζουν την αντιστοίχιση του τύπου υποστήριξης που δίνουν στις κατηγορίες πετρωμάτων που προκύπτουν από την ταξινόμησή τους σε εμπειρίες πραγματικών καταστάσεων, κυρίως από την Ευρώπη. Δεν ελήφθησαν υπόψη τύποι υποστήριξης με μεταλλικά πλαίσια ή προκατασκευασμένα στοιχεία επενδύσεων, αλλά αντιθέτως δόθηκε προσοχή στις μεθόδους εκτοξευόμενου σκυροδέματος και κοχλιώσεων. Οι πίνακες που ακολουθούν αφορούν συστάσεις των ερευνητών για μόνιμη υποστήριξη οροφής σιηράγγων, ενώ για την προσωρινή υποστήριξη αυξάνεται το ESR (επόμενος πίνακας) σε 1.5ESR και το Q σε 5Q. Τέλος στο σχήμα που ακολουθεί δίνεται υπό μορφή διαγράμματος η ανάγκη ή όχι υποστήριξης και τις κατηγορίες υποστήριξης (1-38).



A/A	ΤΥΠΟΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ	ESR
A	Προσωρινά ανοίγματα μεταλλείου κλπ.	3-5
B	Κατακόρυφα φρέατα κυκλικής διατομής ορθογώνιας/τετραγωνικής διατομής	2.5 2.0
C	Μόνιμα μεταλλευτικά ανοίγματα, σήραγγες νερού για υδροηλεκτρικά έργα (εκτός από υψηλές πιέσεις), διερευνητικές σήραγγες (pilot) κλπ.	1.6
D	Μικρές οδικές-σιδηροδρομικές σήραγγες, στοές προσπελάσεων, αποθηκευτικοί θάλαμοι κλπ.	1.3
E	Μεγάλες οδικές-σιδηροδρομικές σήραγγες, θάλαμοι ενεργειακών σταθμών, καταφύγια πολιτικής άμυνας, διασταυρώσεις, πύλες (αρχικά τμήματα σηράγγων) κλπ.	1.0
F	Σταθμοί σιδηροδρόμων, εργοστάσια, υπόγειοι πυρηνικοί σταθμοί	0.8

Ταξινόμηση βραχομάζας κατά Barton. Μέτρα υποστήριξης για βραχομάζες από «Εξαιρετική καλής» έως «Καλής» ποιότητας (Q=1000-10).

Κατηγορία υποστήριξης	Q	Περιοριστικοί παράγοντες		RQD	P kg/cm <sup>2</sup> (προσέγγιση)	De(m)	Τύπος υποστήριξης	Παρατηρήσεις
		Jn	Ja					
1*	1000-400	-	-	-	<0.01	20-40	sb(utg)	-
2*	1000-400	-	-	-	<0.01	30-60	sb(utg)	-
3*	1000-400	-	-	-	<0.01	46-80	sb(utg)	-
4*	1000-400	-	-	-	<0.01	65-100	sb(utg)	-
5*	400-100	-	-	-	0.05	12-30	sb(utg)	-
6*	400-100	-	-	-	0.05	19-45	sb(utg)	-
7*	400-100	-	-	-	0.05	30-65	sb(utg)	-
8*	400-100	-	-	-	0.05	48-88	sb(utg)	-
9	100-40	≥20	-	-	0.25	8.5-19	sb(utg)	-
		<20	-	-			B(utg) 2.5-3m	-
10	100-40	≥30	-	-	0.25	14-30	B(utg) 2-3m	-
		<30	-	-			B(utg) 1.5-2m	-
							+clm	
11*	100-40	≥30	-	-	0.25	23-48	B(tg) 2-3m	-
		<30	-	-			B(tg) 1.5-2m+clm	-
12*	100-40	≥30	-	-	0.25	40-72	B(tg) 2-3m	-
		<30	-	-			B(tg) 1.5-2+clm	-
13	40-10	≥10	≥1.5	-	0.5	5-14	sb(utg)	I
		≥10	<1.5	-			B(utg) 1.5-2m	I
		<10	≥1.5	-			B(utg) 1.5-2m	I
		<10	<1.5	-			B(utg) 1.5-2m	I
							+ S 2-3cm	
14	40-10	≥10	-	≥15	0.5	9-23	B(tg) 1.5-2m	I, II
		<10	-	≥15			+clm	
							B (tg) 1.5-2m	I, II
							+S (mr) 5-10cm	
				<15			B (utg) 1.5-2m	I, III
							+clm	
15	40-10	>10	-	-	0.5	15-40	B (tg) 1.5-2m	I, II, IV
		≤10	-	-			+clm	
							B (tg) 1.5-2m	I, II, IV
							+S (mr) 5-10cm	
16*	40-10	>15	-	-	0.5	30-65	B (tg) 1.5-2m	I, V, VI
							+clm	
							B (tg) 1.5-2m	I, V, VI
							+S (mr) 10-15cm	
βλέπε XII		≤15	-	-				

Ταξινόμηση βραχομάζας κατά Barton. Μέτρα υποστήριξης για βραχομάζες από «Μέτριας» και «Πτωχής» ποιότητας (Q=10-1).

Κατηγορία υποστήριξης	Q	Περιοριστικοί παράγοντες		P kg/cm <sup>2</sup> (προσέγγιση)	De(m)	Τύπος υποστήριξης	Παρατηρήσεις	
		RQD Jn	Jr Ja					
17	10-4	>30	-	-	1.0	3.5-9	sb(utg)	I
		≠10, ≦30	-	-				
18	10-4	<10	-	≧6m	1.0	7-15	B (utg) 1-1.5m	I, III
		<10	-	<6m				
		>5	-	>10m				
		>5	-	<10m				
19	10-4	≦5	-	≧10m	1.0	12-29	B (tg) 1-1.5m	I, III
		≦5	-	<10m				
		>5	-	<10m				
		>5	-	>10m				
20*	10-4	-	-	≧20m	1.0	24-52	B (tg) 1-2m	I, II, IV
		-	-	<20m				
βλ. XII	10-4	-	-	≧35m	1.0	24-52	B (tg) 1-2m	I, V, VI
		-	-	<35m				
21	4-1	≧12.5	≦0.75	-	1.5	2.1-6.5	B (utg) 1m	I
		<12.5	≦0.75	-				
22	4-1	>10, <30	>1.0	-	1.5	4.5-11.5	B (utg) 1m+clm	I
		≦10	>1.0	-				
23	4-1	<30	≦1.0	-	1.5	8-24	B (utg) 1m	I
		<30	≦1.0	-				
24*	4-1	-	-	≧15m	1.5	8-24	B (tg) 1-1.5m	I, II, IV
		-	-	<15m				
βλ. XII	4-1	-	-	≧30m	1.5	18-46	B (tg) 1-1.5m	I, V, VI
		-	-	<30m				

Ταξινόμηση βραχομάζας κατά Barton. Μέτρα υποστήριξης για βραχομάζες «Πολύ Πτωχής» ποιότητας (Q=1-0.1).

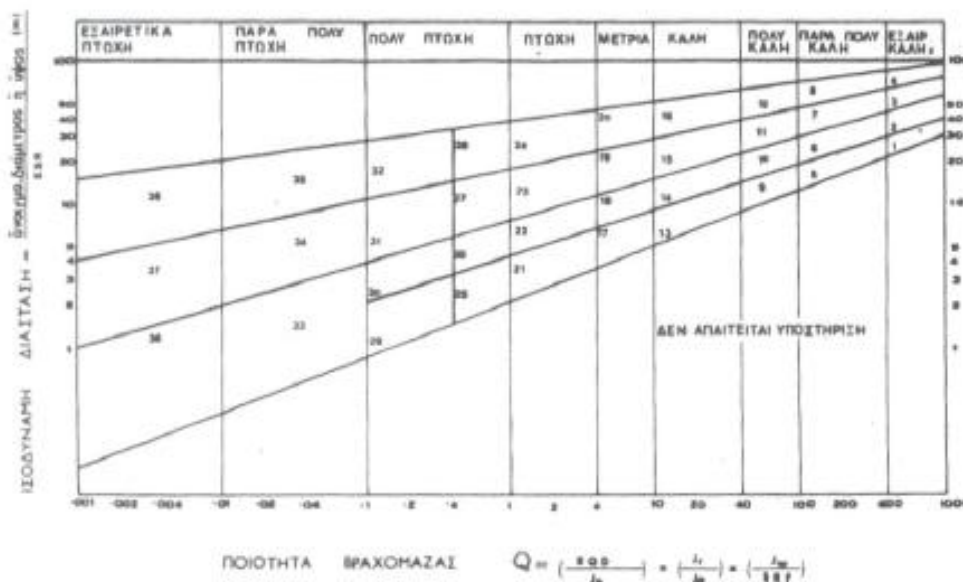
Κατηγορία υποστήριξης	Q	Περιοριστικοί παράγοντες		P kg/cm <sup>2</sup> (προσέγγιση)	De(m)	Τύπος υποστήριξης	Παρατηρήσεις	
		RQD Jn	Jr Ja					
25	1.0-0.4	>10	>0.5	-	2.25	1.5-4.2	B (utg) 1 m+mr ή clm	I
		≦10	≦0.5	-				
26	1.0-0.4	-	-	-	2.25	3.2-7.5	B (utg) 1 m+S (mr) 5 cm	VII, X, XI
		-	-	-				
27	1.0-0.4	-	-	≧12m	2.25	6-18	B (tg) 1 m	I, IX
		-	-	<12m				
		-	-	>12m				
		-	-	<12m				
28*	1.0-0.4	-	-	≧30m	2.25	15-38	B (tg) 1 m	I, IV, V, IX
		-	-	≧20, <30				
βλ. XII	1.0-0.4	-	-	≧20, <30	2.25	15-38	B (tg) 1 m	I, II, IV, IX
		-	-	<20m				
29*	0.4-0.1	>5	>0.25	-	3.0	1.0-3.1	B (utg) 1 m+S 2-3cm	-
		≦5	≦0.25	-				
30	0.4-0.1	>5	>0.25	-	3.0	2.2-6	B (tg) 1 m+S (mr) 5cm	IX
		>5	>0.25	-				
31	0.4-0.1	>4	-	-	3.0	4-14.5	S (mr) 5-7.5cm	IX
		>4	-	-				
32	0.4-0.1	≦4	-	-	3.0	11-34	B (tg) 1m	II, IV, IX, XI
		<1.5	-	-				
βλ. XII	0.4-0.1	-	-	≧20m	3.0	11-34	B (tg) 1m	II, IV, IX, XI
		-	-	<20m				

Ταξινόμηση βραχομάζας κατά Barton. Μέτρα υποστήριξης για βραχομάζες από «Πάρα πολύ πτωχής» έως «Εξαιρετικά Πτωχής» ποιότητας (Q=0.1-000.1).

Κατηγορία υποστηρί- ξεως	Q	Περιοριστικοί παρά- γοντες RQD		P kg/cm <sup>2</sup> (προσέγγιση)	De(m)	Τύπος υποστη- ρίξεως	Παρατηρήσεις	
		I <sub>n</sub>	I <sub>a</sub>					
33*	0.1-0.01	≥2	-	-	6	1.0-3.9	B (tg) 1m +S (mr) 2.5-5cm S (mr) 5-10cm S (mr) 7.5-15cm	IX IX VIII, X IX
34	0.1-0.01	≥2	≥0.25	-	6	2.0-11	B (tg) 1m +S (mr) 5-7.5cm S (mr) 7.5-15cm S (mr) 15-25cm CCA (sr) 20-60cm +B (tg) 1m	IX IX IX VIII, X, XI
35	0.1-0.01	-	-	≥15m	6	6.5-28	B (tg) 1m +S (mr) 30-100cm CCA (sr) 60-200cm +B (tg) 1m	II, IX, XI VIII, X, XI, II
See βλέπε XII				≥15m			B (tg) 1m +S (mr) 20-75cm CCA (sr) 40-150cm +B (tg) 1m	IX, XI, III VIII, X, XI, III
36*	0.01-0.001	-	-	-	12	1.0-2.0	S (mr) 10-20cm S (mr) 10-20cm +B (tg) 0.5-1.0m	IX VIII, X, XI
37	0.01-0.001	-	-	-	12	1.0-6.5	S (mr) 20-60cm S (mr) 20-60cm +B (tg) 0.5-1.0m	IX VIII, X, XI
38	0.01-0.001	-	-	≥10m ≥10m	12	4.0-20	CCA (sr) 100-300cm CCA (sr) 100-300cm +B (tg) 1m	IX VIII, X, II, XI
XIII				<10m <10m			S (mr) 70-200cm S (mr) 70-200cm +B (tg) 1m	IX VIII, X, III, XI

Οπου De το άνοιγμα σε m της σήραγγας, Sb σημειακές κοχλιώσεις, B συστηματικές κοχλιώσεις, (utg) χωρίς τάση, με ένεμα, (tg) με τάση, S εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, (mr) ενίσχυση με πλέγμα, clm αλυσιδωτό πλέγμα, CCA τόξο από έγχυτο οπλισμό, (Sr) ενίσχυση με πλέγμα, ενώ τα λατινικά σύμβολα επεξηγούνται στα επόμενα:

I	Για έντονες εκτινάξεις πετρωμάτων χρησιμοποιούνται κοχλιώσεις με προένταση και διευρυμένες φέρουσες πλάκες σε αποστάσεις 1m περίπου
II	Χρησιμοποίηση διαφορετικού μήκους κοχλιών (3,5,7m)
III	Χρησιμοποίηση διαφορετικού μήκους κοχλιών (2,3,4m)
IV	Αγκύρια με προένταση (καλώδια) ως συμπλήρωση της κοχλίωσης. Απόσταση αραίωσης 2-4m.
V	Όπως η II (πχ. 6,8,10m)
VI	Όπως η IV με αποστάσεις 4-6m
VII	Μόνιμη υποστήριξη με σημειακές κοχλιώσεις και περιοχές αλυσιδωτού πλέγματος και τόξου ελεύθερου ανοίγματος από σκυρόδεμα (25-40cm)
VIII	Διαμόρφωση χώρου εντόνωσης πίσω από την υποστήριξη. Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις διογκούμενων σχηματισμών σε συνδυασμό με την αποστράγγιση
IX	Περιπτώσεις που δεν αφορούν συμπιεστά ή διογκούμενα πετρώματα
X	Συμπιεστά πετρώματα. Χρησιμοποίηση βαριάς και άκαμπτης υποστήριξης
XI	Η υποστήριξη με κοχλιώσεις και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόζεται όταν $(RQD/I_n) > 1.5$ . Σε αντίθετη περίπτωση η υποστήριξη αποτελείται από περισσότερες εφαρμογές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (συστηματική κοχλίωση με προένταση, ένεμα πριν την προένταση και ήλωση)
XII-XIII	Χρησιμοποίηση της μεθόδου υποστήριξης multiple drift



## 2.5 Τεχνικογεωλογικές παράμετροι κατασκευής σήραγγων

Η σήραγγα ως τεχνικό έργο είναι περισσότερο συνδεδεμένη με το γεωλογικό υλικό περισσότερο από κάθε άλλο τεχνικό έργο. Η συμβολή της γεωλογίας δεν αρκείται μόνο στην αναγνώριση μεμονωμένων γεωλογικών κινδύνων, αλλά πρέπει να έχει συνεχή παρουσία στο σχεδιασμό και στην κατασκευή μιας σήραγγας. Η τεχνικογεωλογική έρευνα αφορά τις επικρατούσες γεωλογικές, λιθολογικές τεκτονικές μορφές και τα χαρακτηριστικά (προσανατολισμός, πυκνότητα, τραχύτητα, υλικά πλήρωσης κλπ) των ασυνεχειών, με σκοπό τη σύνταξη της γεωλογικής τομής πρόβλεψης, τις γεωτεχνικές ιδιότητες (αντοχή, παραμορφωσιμότητα, διογκωσιμότητα) των πετρωμάτων που θα διατηρηθούν, την υδρογεωλογία της ζώνης χάραξης της σήραγγας και του περιβάλλοντος χώρου και την ευστάθεια των περιοχών εισόδου-εξόδου. Η γεωλογική τομή πρόβλεψης συνήθως γίνεται πάνω στον άξονα της σήραγγας και πρέπει να περιέχει τους διαφορετικούς βραχώδεις και εδαφικούς λιθολογικούς τύπους, τα όρια (επαφές) των γεωλογικών στρωμάτων καθώς και τα πιθανά ρήγματα, ενώ αν υπάρχουν αξιόπιστα διαθέσιμα δεδομένα από εγκατεστημένα πιεζόμετρα, σε κάποιες από τις γεωτρήσεις, μπορεί να αποτυπωθεί και η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Επιπλέον θα πρέπει να σχεδιασθεί λεπτομερής γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής όπου και θα σημειώνεται η χάραξη της σήραγγας. Η ακρίβεια με την οποία τα γεωλογικά στρώματα μεταφέρονται από ένα οριζόντιο σύστημα προβολής (γεωλογικός χάρτης) σε μία γεωλογική τομή εναπόκειται στην κρίση του γεωλόγου. Στην περίπτωση των ιζηματογενών πετρωμάτων είναι δυνατό να γίνει, καθώς δεν υπάρχει μεγάλη διαταραχή των στρωμάτων από πτυχώσεις και ρήγματα. Αντιθέτως στην περίπτωση των πυριγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων η ακρίβεια δεν είναι μεγάλη λόγω κυρίως των ακανόνιστων επαφών μεταξύ των γεωλογικών σχηματισμών.

Ολες οι παραπάνω πληροφορίες σε μεγάλο βαθμό λαμβάνονται από τη διάνοιξη ερευνητικών στοών και γεωτρήσεων. Οι γεωτρήσεις θα πρέπει να φθάνουν τουλάχιστον στο επίπεδο του κάτω τμήματος της σήραγγας, με εξαίρεση τα τμήματα εισόδων της σήραγγας όπου θα φθάνουν σε ικανοποιητικό βάθος προκειμένου να μελετηθεί σωστά η θεμελίωση των εισόδων.



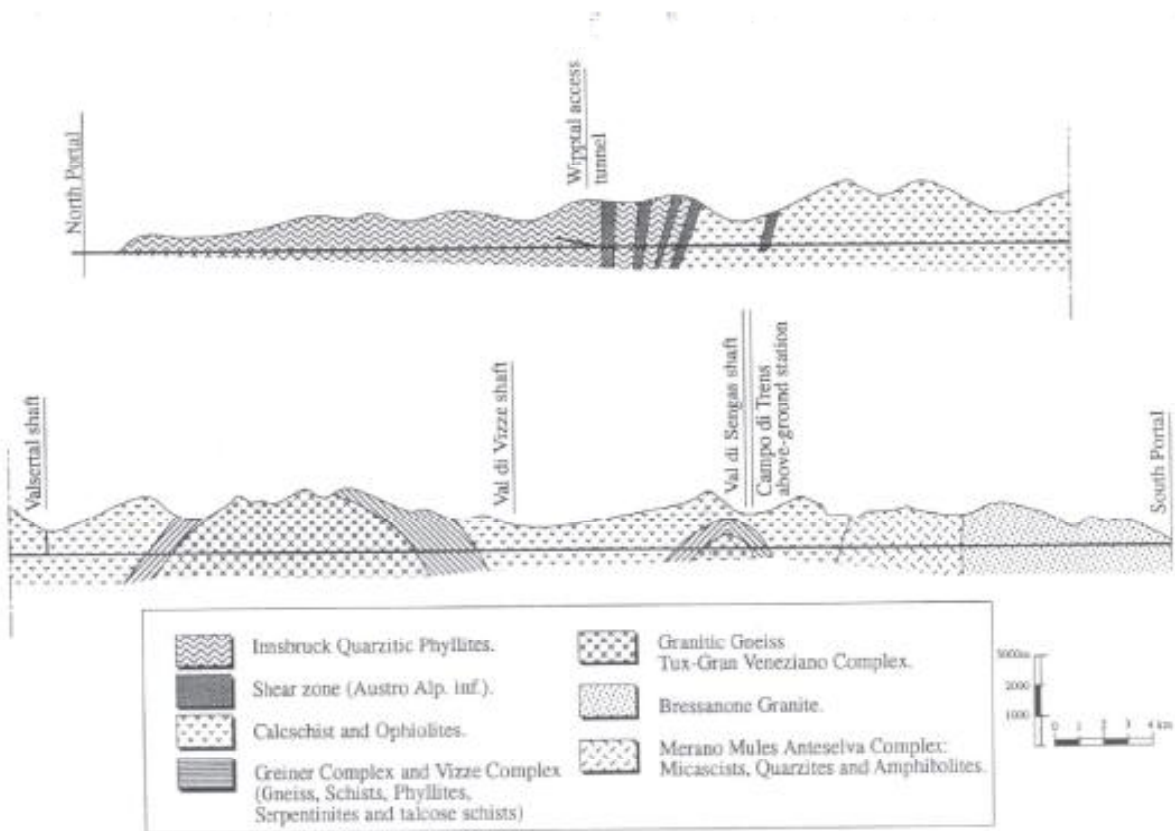


Fig. 7: Brennero tunnel - Geological section of the tunnel between Innsbruck and Fortezza

Γεωλογική τομή πρόβλεψης διάνοιξης σήραγγας στις Άλπεις

## 2.6 Τρόποι διάνοιξης σηράγγων

Οι μέθοδοι κατασκευής σηράγγων είναι οι ακόλουθες:

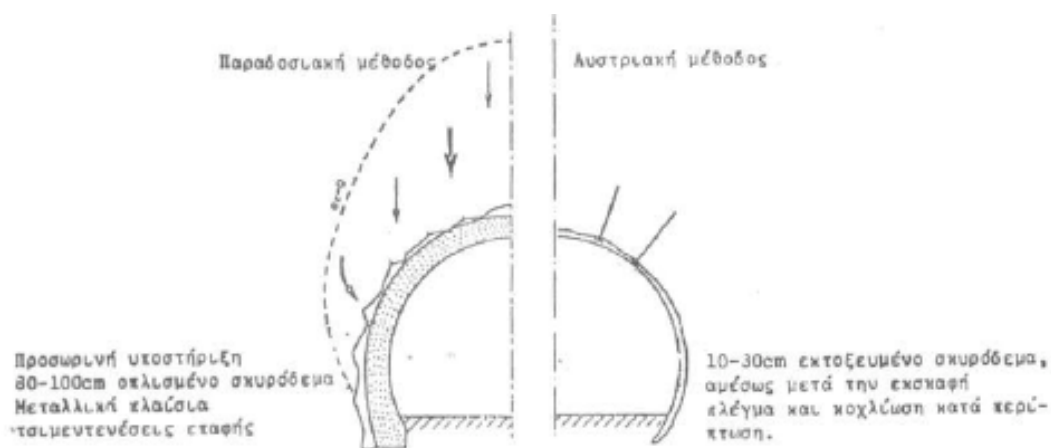
- Αυστριακή μέθοδος διάνοιξης σηράγγων(NATM)
- Διατρήματα εκρηκτικά
- Συρμοί ολομέτωπης κοπής (TBM) με ή χωρίς ασπίδα
- Μηχανήματα σημειακής κοπής (Roadheader)
- Εκσκαφής και επανεπίχωσης (cut and cover)

Η επιλογή της μεθόδου γίνεται ανάλογα με τις διαστάσεις και το μήκος της σήραγγας, ανάλογα με τη διάτρηση σε εδαφικούς ή βραχώδεις σχηματισμούς, ενώ η ύπαρξη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα είναι καθοριστικής σημασίας στην επιλογή λόγω υδραυλικού φορτίου αλλά και λόγω της εμφάνισης υδάτων κατά τη διάτρηση. Σε βραχώδεις σχηματισμούς επιλέγονται τα εκρηκτικά, τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής και τα μηχανήματα σημειακής κοπής. Σε μαλακούς (εδαφικούς) σχηματισμούς ή ημίβραχους επιλέγονται οι ασπίδες, ή ασπίδες με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής, ή ασπίδες «πολτού». Σε ετερογενείς βραχώμαζες επιλέγεται κυρίως η νέα Αυστριακή μέθοδος διάνοιξης σηράγγων.

### 2.6.1 Διάνοιξη σήραγγας με συμβατικές μεθόδους: Η νέα Αυστριακή μέθοδος διάνοιξης σηράγγων (NATM)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στα γερμανόφωνα κράτη από τη δεκαετία του 1960, ονομάζεται «νέα» για να διακρίνεται από την Αυστριακή μέθοδο που χρησιμοποιεί ως μέθοδο υποστήριξης τοξωτά πλαίσια και που χρησιμοποιήθηκε ευρέως από Αυστριακούς μηχανικούς. Η βασική αρχή της μεθόδου είναι η μετατροπή της βραχώμαζας που περικλείει το υπόγειο άνοιγμα από σύστημα επιβολής φορτίου στην τελική υποστήριξη σε σύστημα μεταφοράς φορτίου μαζί με την τελική υποστήριξη. Η μέθοδος δεν επιτρέπει την πλήρη αποσυμπίεση της βραχώμαζας και περιορίζει με τον τρόπο αυτό τη σχετική χαλάρωση. Θεωρεί ότι ο περιβάλλον γεωλογικός σχηματισμός μεταφέρει φορτία, όπως άλλωστε και η υποστήριξη κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, ενώ οι άλλες μέθοδοι θεωρούν ότι η βραχώμαζα μεταφέρει όλα της τα φορτία στην υποστήριξη. Κατά την εφαρμογή της γίνεται χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος για τη σταθεροποίηση των παρειών και της οροφής, αμέσως μετά τη διάνοιξη υπόγειου ανοίγματος, σε συνδυασμό με την τοποθέτηση πλέγματος, κοχλιών ή και μεταλλικών πλαισίων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται τόσο η υποστήριξη της βραχώμαζας και ταυτόχρονα επιτρέπονται και μικρές

παραμορφώσεις(μετακινήσεις) στην περιβάλλουσα βραχώμαζα. Η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου έγινε το 1934 από τον καθηγητή Rabcewicz όπου χρησιμοποίησε για την υποστήριξη σήραγγας κέλυφος μικρού πάχους από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Οι παρατηρήσεις που ακολούθησαν έδειξαν ότι κάτω από υψηλές πλευρικές τάσεις το κέλυφος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα δεν αστόχησε λόγω καμπτικών παραμορφώσεων, αλλά λόγω υπέρβασης της διατμητικής αντοχής της βραχώμαζας. Μια οδική σήραγγα που διανοίχθηκε μεταξύ 1956 και 1958 στη Βενεζουέλα και που σχεδιάστηκε από τον Rabcewicz ήταν η πρώτη ουσιαστική εφαρμογή της νέας αυστριακής μεθόδου, ενώ το 1970 κατά τη διάνοιξη της σήραγγας Tauern-tunnel στις Άλπεις, μήκους 6.4 km μέσα σε φυλλίτες και σχιστόλιθους η μέθοδος τελειοποιήθηκε.



Η νέα Αυστριακή μέθοδος άρχισε σταδιακά να χρησιμοποιείται και για τη διάνοιξη σιδηροδρομικών και οδικών σιδηροδρόμων κάτω από αστικό περιβάλλον, όπου οι όποιες καθιζήσεις, από τη μη έγκαιρη ολοκλήρωση της διατομής, θα μεταφερθούν στην επιφάνεια επηρεάζοντας τη θεμελίωση των κτιρίων καθώς και την ευστάθεια της εκσκαφής. Η νέα Αυστριακή μέθοδος προβλέπει δύο διαφορετικές εσωτερικές επενδύσεις: η πρώτη (εξωτερική επένδυση) που δημιουργείται με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, αγκύρια βράχου και άλλα συμπληρωματικά έργα υποστήριξης τοποθετείται αμέσως μετά την εκσκαφή και αποτελεί τμήμα της τελικής επένδυσης. Η τελική (εσωτερική επένδυση) όπου επίσης χρησιμοποιείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αυξάνει το συντελεστή ασφαλείας και δημιουργεί στην εσωτερική όψη της σήραγγας λεία επιφάνεια, ενώ τοποθετείται αφού η βραχώμαζα έχει ισορροπήσει λόγω της εκσκαφής. Η συμπεριφορά της εξωτερικής επένδυσης(συγκλίσεις) ελέγχεται συνεχώς με τοπογραφικές μετρήσεις, μέσω εγκατεστημένων οργάνων, των παραμορφώσεων και είναι απαραίτητο να γίνει προκειμένου να αποφασισθούν, αν χρειασθεί, επιπρόσθετα μέτρα στην τελική υποστήριξη. Η επένδυση με τις κοχλιώσεις και με τη βραχώμαζα γίνονται πλέον ένα ενιαίο σύνολο και σε συνδυασμό με το φαινόμενο δημιουργίας θόλου επέρχεται η σταθεροποίηση. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται σε όλους τους τύπους των εδαφών και μόνο σε εδάφη χωρίς καθόλου συνοχή ή με μεγάλη πλαστικότητα δε μπορεί να εφαρμοσθεί. Η μέθοδος είναι ιδανική για ετερογενείς βραχώμαζες,

αφού οι τρόποι υποστήριξης παραμένουν οι ίδιοι, αλλά αλλάζει η πυκνότητα των αγκυρίων και το μέγεθος των πλεγμάτων.

Η λεγόμενη "Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων" (New Austrian Tunneling Method - NATM) ουσιαστικώς δεν αποτελεί μια "μέθοδο" αλλά

περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων οι οποίες εφαρμόστηκαν συστηματικά κατά τη διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις στις αρχές της δεκαετίας του 1960 .

Αν και δεν υπάρχει γενικώς αποδεκτός ορισμός της "Μεθόδου NATM", ο όρος συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διάνοιξη σηράγγων με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής (δηλαδή χωρίς την εφαρμογή πίεσης με μηχανικά μέσα) και υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό ή οπλισμένο) ή/και αγκύρια βράχου.

Μεθοδολογία κατασκευής :

Βασική αρχή της μεθόδου αυτής είναι να διατηρηθεί η αντοχή του περιβάλλοντος στη σήραγγα εδάφους και να γίνει πλήρης αξιοποίησή της. Ελεγχόμενη παραμόρφωση του εδάφους παρουσία εύκαμπτης υποστήριξης - σε αντίθεση με τις παλαιότερες απόψεις περί «βαρειάς» υποστήριξης - επιδρά θετικά και έχει ως αποτέλεσμα την ασφαλή ανάπτυξη της αντοχής του. Η μεθοδολογία μελέτης / κατασκευής του έργου είναι η ακόλουθη:

- Εκτελείται γεωτεχνική/γεωλογική έρευνα και δοκιμές (επί τόπου και εργαστηριακές) για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του εδάφους στην περιοχή όπου έχει σχεδιασθεί να γίνει η διάνοιξη της σήραγγας.
- Γίνεται η μελέτη (υπολογισμοί και σχέδια) εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας, βάσει των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του εδάφους που προέκυψαν στο προηγούμενο στάδιο. Επίσης, γίνεται και η μελέτη της μόνιμης (τελικής) επένδυσης της σήραγγας.
- Εκτελείται η εκσκαφή με συμβατικά μηχανικά μέσα (εκσκαφέας σημειακής κοπής, συμβατικός εκσκαφέας, κλπ) και ενίοτε γίνεται και άμεση υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής κατά φάσεις, ανάλογα με την ποιότητα του εδάφους.
- Μετά την εκσκαφή, που γίνεται τμηματικά αναλόγως των χαρακτηριστικών των πετρωμάτων και του έργου, ακολουθεί η τοποθέτηση ενός συστήματος προσωρινής αντιστήριξης που αποτελείται από επένδυση εκτοξευομένου σκυροδέματος (gunite), μπουλόνια/αγκύρια (rockbolts), σιδηρά πλαίσια, κλπ. Σε περίπτωση εδαφών με φτωχά χαρακτηριστικά πριν από την εκσκαφή τοποθετούνται δοκοί προπορείας (forepoling) σε όλη την περιοχή πάνω από το θόλο της σήραγγας σε μορφή «ομπρέλας» προστασίας του μετώπου εκσκαφής. Αρκετές φορές η εκσκαφή γίνεται σε δύο φάσεις, άνω ημιδιατομή (θόλος) και κάτω ημιδιατομή (πυθμένας). Ανάλογα με το υπέδαφος και τη γεωμετρία της σήραγγας μπορεί να χρειασθεί η εκσκαφή να γίνει και σε περισσότερες φάσεις. Η χρονική στιγμή τοποθέτησης της αρχικής αντιστήριξης καθώς και η ολοκλήρωση του πλήρους δακτυλίου της επένδυσης είναι βασικής σημασίας για τον έλεγχο των παραμορφώσεων. Το σύστημα της άμεσης υποστήριξης μαζί με το περιβάλλον έδαφος αποτελούν το στατικό φορέα της σήραγγας στη φάση αυτή.

Καθ' όλη τη διάρκεια της κατασκευής γίνονται συστηματικές μετρήσεις παρακολούθησης (monitoring) της συμπεριφοράς του υπεδάφους και της προσωρινής αντιστήριξης, δηλαδή

μετρώνται οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους και στα γειτονικά κτίρια, οι συγκλίσεις μέσα στη σήραγγα, η αυξομείωση της στάθμης του υπογείου ύδατος, κλπ. Η ασφάλεια των κτιρίων που βρίσκονται κοντά ή ακριβώς επάνω από τη χάραξη της σήραγγας είναι ένα ιδιαίτερα κρίσιμο θέμα και αντιμετωπίζεται με τη συνεχή ενόργανη παρακολούθηση αλλά και τις επί τόπου επισκέψεις των μηχανικών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συγκρίνονται με τις παραδοχές και τα αποτελέσματα της μελέτης και, εάν χρειάζεται, γίνονται οι απαραίτητες τροποποιήσεις στο σύστημα υποστήριξης και τη χρονική σειρά των εργασιών. Επίσης, τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό ή και τον έλεγχο των παραδοχών της μελέτης της μόνιμης επένδυσης της σήραγγας που θα ακολουθήσει στη συνέχεια.

Η τελική (μόνιμη) επένδυση της σήραγγας κατασκευάζεται όταν το σύστημα της αρχικής υποστήριξης έχει φθάσει σε συνθήκες ισορροπίας. Η μόνιμη επένδυση προσφέρει αυξημένη ασφάλεια στο χρόνο ζωής του έργου, δημιουργεί μία ομοιόμορφη εσωτερική επιφάνεια και βελτιώνει την στεγανότητά της. Η μόνιμη επένδυση των σηράγγων κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα, έγχυτο επί τόπου. Χρησιμοποιούνται ειδικοί σιδηρότυποι, συνήθως αυτοφερόμενοι, κάτι που μειώνει σημαντικά το χρόνο και το κόστος του έργου. Υπάρχουν υδραυλικοί μοχλοί που μπορούν να ρυθμίζουν το επιθυμητό πάχος της επένδυσης. Το συνολικό μήκος τέτοιων καλουπιών είναι της τάξεως των 10-12 μ, αναλόγως της διατομής. Σε πρώτη φάση κατασκευάζεται το κάτω μέρος της σήραγγας (πυθμένας) και στους κατασκευαστικούς αρμούς τοποθετούνται ειδικοί υδατοφραγμοί (waterstop) για υδατοστεγάνωση. Σε επόμενη φάση σκυροδετείται ο θόλος με τη χρήση του αυτοφερόμενου σιδηρότυπου. Ο χρόνος αφαίρεσης του σιδηροτύπου είναι της τάξεως ωρών από την έγχυση. Για την ανάπτυξη επαρκούς αντοχής του σκυροδέματος σε σύντομο χρόνο, χρησιμοποιούνται στη σύνθεση του ειδικά χημικά πρόσμεικτα. Επειδή πάντοτε απομένει μικρό κενό μεταξύ της στέγης του σκυροδέματος και του εδάφους στην οροφή της σήραγγας, ακολουθούν τσιμεντενέσεις πλήρωσης αυτών των κενών.

Οι βασικές θεωρήσεις που γίνονται στη διάνοιξη σήραγγας με τη χρήση της νέας Αυστριακής μεθόδου σχετίζονται με:

- την αλληλεπίδραση επένδυσης-βραχόμαζας
- συμπεριφορά βραχόμαζας
- συμπεριφορά υποστήριξης
- ευστάθεια μετώπου
- γεωτεχνικές μετρήσεις
- ασφάλεια

#### *2.6.1.A Αλληλεπίδραση επένδυσης-βραχόμαζας*

Κατά τη φάση της εκσκαφής οι παραμορφώσεις στη βραχόμαζα ελέγχονται προκειμένου να παραμείνουν όσο το δυνατό μικρές για να μη μειωθεί πολύ η αντοχή της βραχόμαζας και ταυτόχρονα να είναι τέτοιου μεγέθους που να μειώνουν την τάση που αναπτύσσεται πάνω στην επένδυση. Η δημιουργία μιας σύνθετης ενιαίας κατασκευής αποτελούμενης από βραχόμαζα και



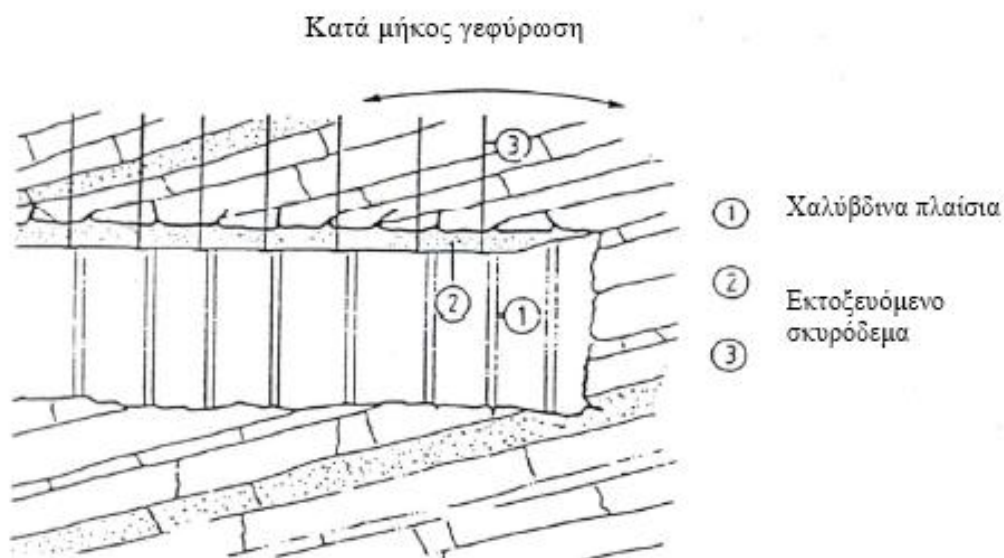
επένδυση είναι το πιο σημαντικό στοιχείο που επιτυγχάνεται με τη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Επιπλέον η χρήση αγκυρίων αυξάνει την αντοχή της βραχώμαζας, επιτρέποντάς της να αυτοϋποστηρίζεται. Σε βαθιές σήραγγες (με μεγάλο πάχος υπερκειμένων) όπου η αστοχία οφείλεται στην υπέρβαση της διατμητικής αντοχής της βραχώμαζας, έχει αποδειχθεί ότι τόσο το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα όσο και τα αγκύρια αυξάνουν τη διατμητική αντοχή της βραχώμαζας, ενώ επιπλέον τα αγκύρια εισάγουν και τάσεις πάνω στο επίπεδο αστοχίας. Σε σήραγγες κοντά στην επιφάνεια του εδάφους η μέθοδος θεωρεί ότι είναι απαραίτητο να ολοκληρωθεί γρήγορα η εξωτερική επένδυση (μικρά χρονικά στάδια εκσκαφών) που πλέον θα λειτουργεί με θλιπτικές τάσεις μειώνοντας παράλληλα τις επιφανειακές καθιζήσεις.

### 2.6.1.B Συμπεριφορά βραχώμαζας υποστήριξης

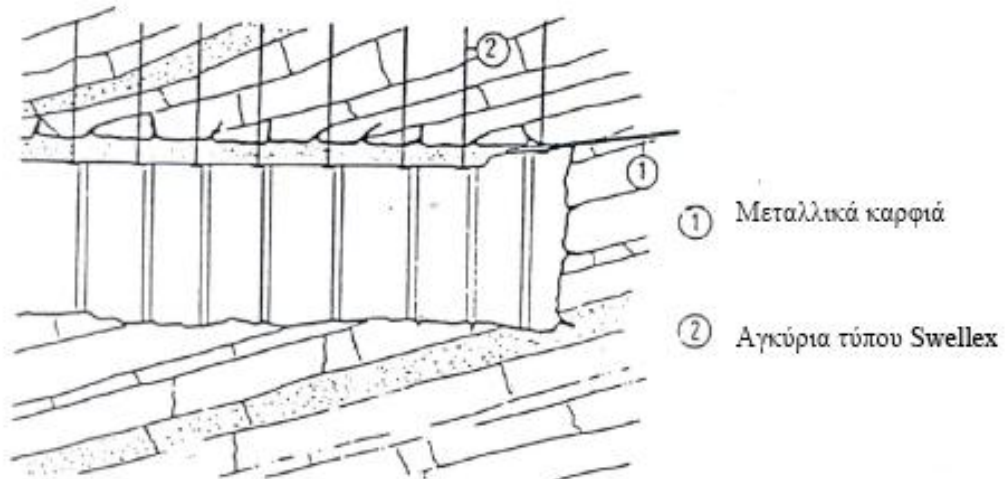
Ο χρόνος που θα εφαρμοσθεί η υποστήριξη καθώς επίσης και η ακαμψία της υποστήριξης είναι δύο πολύ σημαντικοί παράμετροι. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αμέσως μετά την τοποθέτησή του παρουσιάζει ερπυστικές παραμορφώσεις και έχει συμπεριφορά ελαστοπλαστικού υλικού. Οι παραμορφώσεις στη διατομή μειώνονται δραστικά σε απόσταση μίας διαμέτρου πίσω από το μέτωπο της σήραγγας γιατί εκεί το σκυρόδεμα συνεχίζει να αναπτύσσει ερπυστικά φαινόμενα.

### 2.6.1.Γ Ευστάθεια μετώπου

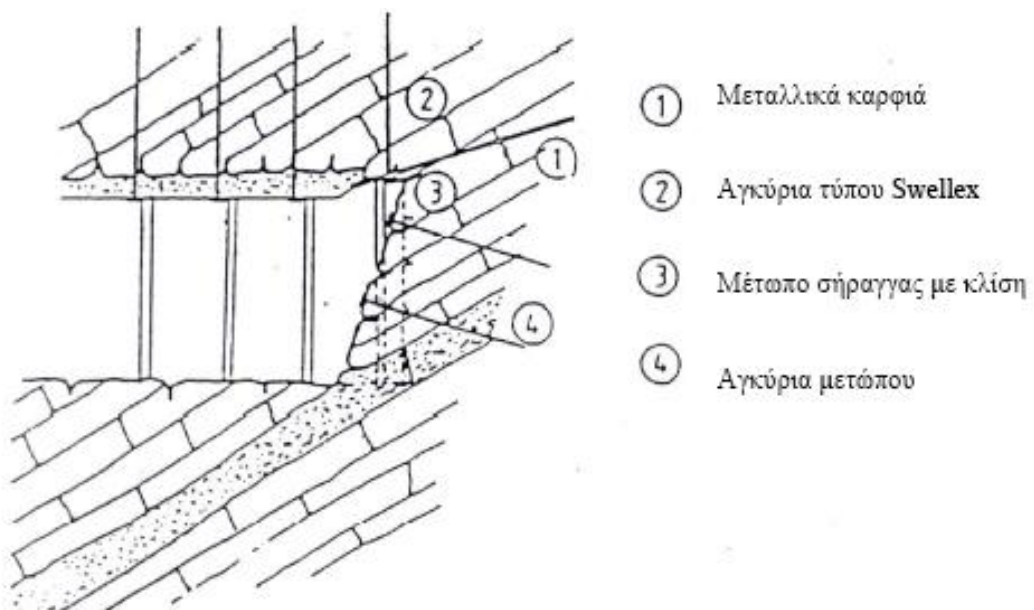
Είναι σημαντικό κατά τη διάνοιξη της σήραγγας να υπάρχουν επαρκή μέτρα υποστήριξης στο μέτωπο της σήραγγας. Τοξωτά χαλύβδινα πλαίσια συνήθως παρέχουν την απαραίτητη προσωρινή υποστήριξη μέχρι που να τοποθετηθεί και να αρχίσει να «λειτουργεί» το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Επιπροσθέτως είναι δυνατό να χρησιμοποιούνται και μεταλλικά καρφιά, ενώ και η χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε συνδυασμό με πλέγμα από χάλυβα είναι πολλές φορές επιθυμητή.



Εικόνα : Βελτίωση ευστάθειας μετώπου σήραγγας



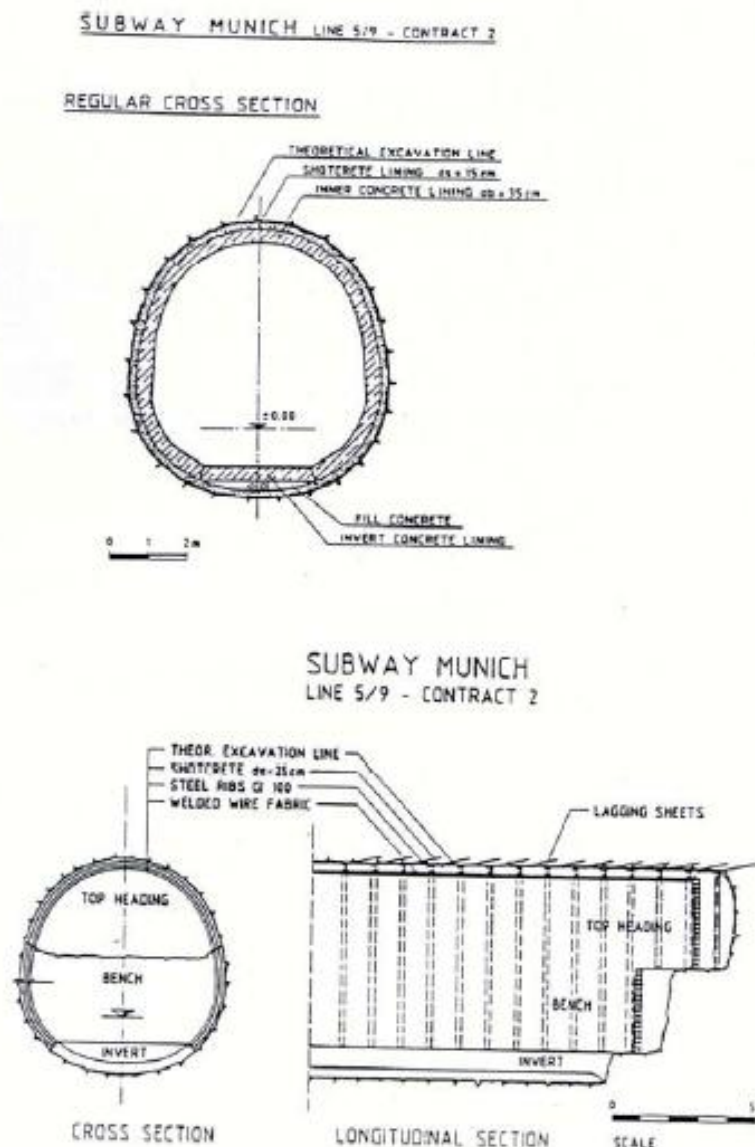
Εικόνα : Βελτίωση ευστάθειας μετώπου σήραγγας



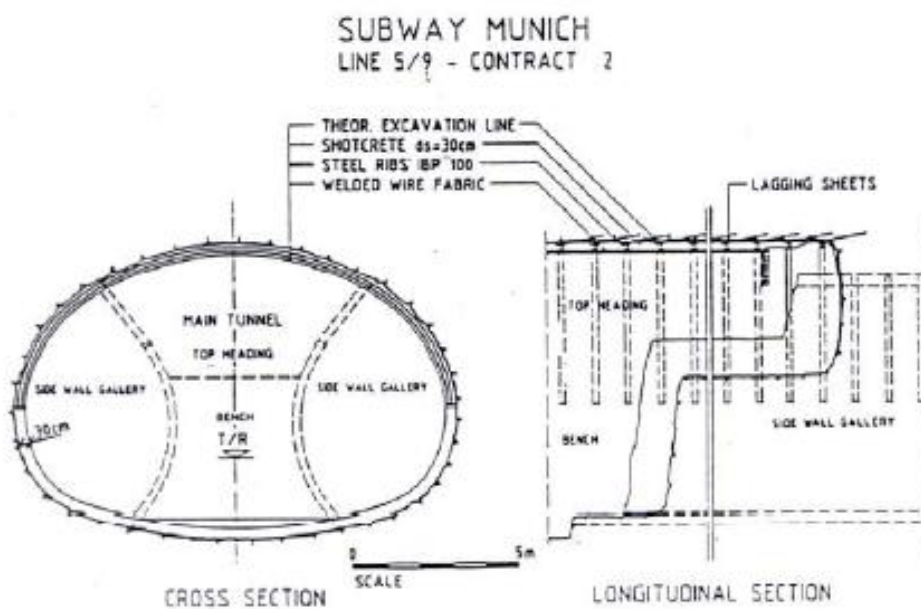
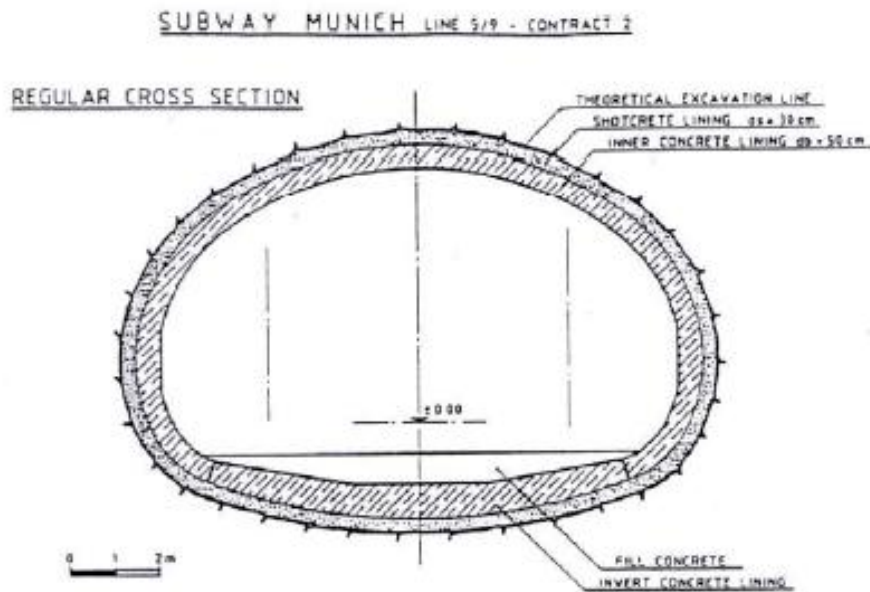
Εικόνα : Βελτίωση ευστάθειας μετώπου σήραγγας

### 2.6.1.4 Γεωτεχνικές μετρήσεις

Το πρόγραμμα γεωτεχνικών μετρήσεων έχει ως στόχο να ελέγξει τις τάσεις και παραμορφώσεις στη βραχώμαζα και στο σκυρόδεμα, να ελέγξει τις τάσεις των αγκυρίων κλπ. Τα συνήθη όργανα που χρησιμοποιούνται είναι κλισιόμετρα, μηκυσιόμετρα κλπ. Στις επόμενες δύο εικόνες παρουσιάζονται σχέδια από τη διάνοιξη σήραγγας του μητροπολιτικού σιδηρόδρομου του Μονάχου. Όταν η ποιότητα του υπερκειμένου της οροφής της σήραγγας εδάφους δεν είναι καλή, τότε γίνεται χρήση της μεθόδου των δοκών προπορείας (forepolling), δηλαδή εισάγονται με μικρή κλίση, περίπου 100 μοίρες, μεταλλικές δοκοί, συνήθως 9-12m μήκους, πάνω από την οροφή της σήραγγας, που έχουν ως σκοπό την αρχική προσωρινή αντιστήριξη των υπερκειμένων. Οι δοκοί συνήθως έχουν μεταξύ τους επικάλυψη ανά 6m και λειτουργούν ως πρόβολοι



Εικόνα : Παράδειγμα διάνοιξης μονής σήραγγας του μητροπολιτικού σιδηρόδρομου στο Μόναχο Γερμανίας



Εικόνα : Παράδειγμα διάνοιξης διπλής σήραγγας του μητροπολιτικού σιδηρόδρομου στο Μόναχο Γερμανίας

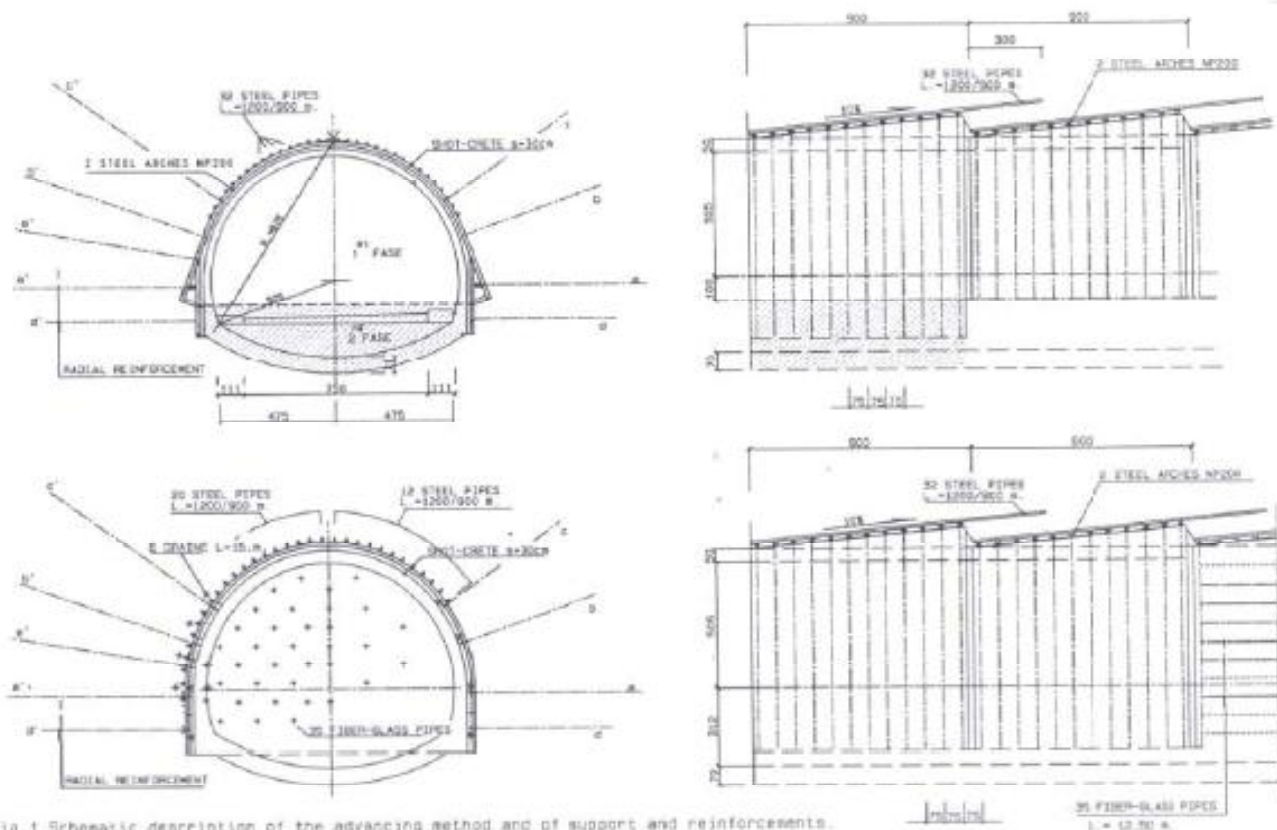


Fig.1 Schematic description of the advancing method and of support and reinforcements.  
 Above: upper-half section excavation. Below: full section excavation with reinforcements at the face.

Εικόνα : Δοκίδες προπορείας και χρήση της νέας Αυστριακής μεθόδου διάνοιξης σηράγγων

### 2.6.2 Διάνοιξη σήραγγας με μηχανικά μέσα

Τα μηχανήματα σημειακής κοπής παρουσιάζουν ευκινησία κατά τη διάτρηση, μπορούν να μορφώσουν μη κυκλική διατομή σήραγγας και συνήθως χρησιμοποιούνται σε βραχόμαζες που παρουσιάζουν αντοχή περίπου 65 Μρα. Αν η βραχόμαζα είναι συμπαγής τότε το όριο μειώνεται



στα 35 MPa, ενώ αν είναι διακλασμένη ή παρουσιάζει σχιστότητα αυξάνει στα 140MPa.

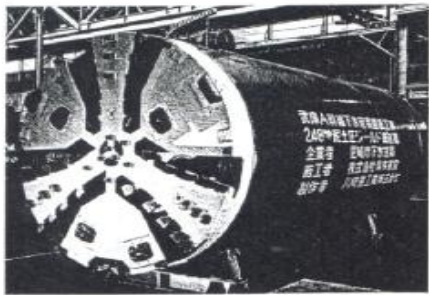
Τα πλεονεκτήματα των συρμών ολομέτωπης κοπής είναι: η δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας σε συνδυασμό με τις υψηλές ταχύτητες προχώρησης. Επιπλέον εφόσον έχει γίνει σωστή αξιολόγηση των γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν είναι αξιόπιστη η πρόβλεψη ολοκλήρωσης της διάνοιξης, ενώ οι κραδασμοί κατά την εκσκαφή δεν είναι έντονοι (ενδιαφέρει στη διάνοιξη σήραγγων σε αστικό περιβάλλον) και η εκσκαφή είναι ήπια με μειωμένη διαταραχή στη βραχώμαζα. Τα προϊόντα εκσκαφής απομακρύνονται εύκολα, ενώ η ασφάλεια των εργαζομένων είναι μεγάλη και το προσωπικό βάρδιας περιορίζεται στα δέκα (10) άτομα περίπου. Αντιθέτως ως μειονεκτήματα είναι το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης που όμως μειώνεται λόγω ανακατασκευής και επαναχρησιμοποίησής τους, ο μακρύς χρόνος παράδοσης και προετοιμασίας. Τα παραπάνω μειονεκτήματα τα καθιστούν απαγορευτικά σε μικρού μήκους σήραγγες. Επιπλέον σε δυσμενείς γεωλογικές καταστάσεις (πχ. μικτά γεωλογικά μέτωπα) μικρές δυνατότητες τροποποίησης, όπως και υποστήριξης του μετώπου, περιορισμός σε κυκλικής διατομής σήραγγες και μικρές ταχύτητες σε πολύ σκληρά πετρώματα. Οι ασπίδες χρησιμοποιούνται σε μη συνεκτικά εδάφη, σε μαλακές αργίλους, σε εδάφη με νερά και σε πολύ ασταθή εδάφη. Παρουσιάζονται με τους εξής τύπους: μονή, διπλή και τυφλές με πίεση από πεπιεσμένο αέρα, από το υλικό εκσκαφής και από την ίδια την ασπίδα.

#### **2.6.2.A Μηχανήματα Εκσκαφής TBM**

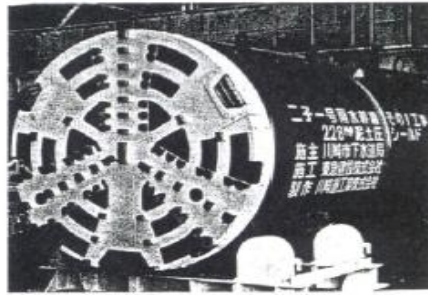
Τα Μηχανήματα Εκσκαφής Σηράγγων ή TBM όπως ονομάζονται από το αγγλικό αρκτικόλεξο (*Tunnel boring machines*) σχετίζονται με πολλά συμπληρωματικά στοιχεία που μπορούν να αυτοματοποιήσουν ολόκληρη την διαδικασία εκσκαφής της σήραγγας. Υπάρχουν πολλών ειδών TBM που λειτουργούν σε ένα εύρος συνθηκών, από σκληρά πετρώματα μέχρι έδαφος με θύλακες νερού. Ορισμένοι τύποι TBM έχουν διαμερίσματα υπό πίεση στο μπροστινό μέρος, επιτρέποντας τα να χρησιμοποιούνται σε δύσκολες συνθήκες όπως κάτω από υδάτινο πυθμένα. Αυτό συμπιέζει το έδαφος μπροστά από την κεφαλή εκσκαφής του TBM για να αντισταθμίσει στην πίεση του νερού. Ο χειριστής εργάζεται υπό κανονική ατμοσφαιρική πίεση πίσω από το συμπιεσμένο διαμέρισμα, αλλά μπορεί να χρειαστεί να εισέλθει στο συμπιεσμένο διαμέρισμα για να αλλάξει ή να επιδιορθώσει τους κόφτες. Αυτό απαιτεί ειδικές προφυλάξεις, όπως τοπική προεργασία του εδάφους ή την ακινητοποίηση του TBM σε περιοχή χωρίς νερό. Παρ όλες τις δυσκολίες, σήμερα προτιμούνται τα TBM από την προηγούμενη μέθοδο της εκσκαφής σε ατμόσφαιρα υπό πίεση, με έναν θάλαμο απομόνωσης και αποσυμπίεσης σε κάποια απόσταση από το TBM, η οποία απαιτεί να εργάζονται οι χειριστές σε υψηλή πίεση και να πρέπει να περνούν από θάλαμο αποσυμπίεσης στο τέλος της βάρδιας τους, όπως οι δύτες.

Μέχρι πρόσφατα, το μεγαλύτερο TBM που κατασκευάστηκε, χρησιμοποιήθηκε για την διάνοιξη της σήραγγας Πράσινης Καρδιάς στην Ολλανδία. Είχε διάμετρο 14,87 μέτρα.

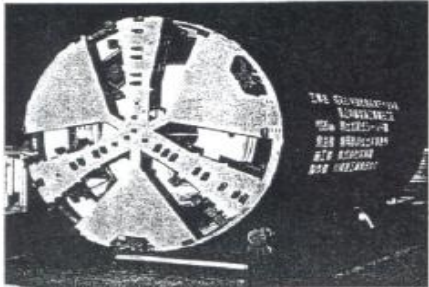
Σήμερα υπάρχουν ακόμα μεγαλύτερα μηχανήματα, όπως για παράδειγμα τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του περιφερειακού δρόμου της Μαδρίτης στην Ισπανία και της σήραγγας Χονγκ Μινγκ στην Σαγκάη στην Κίνα.



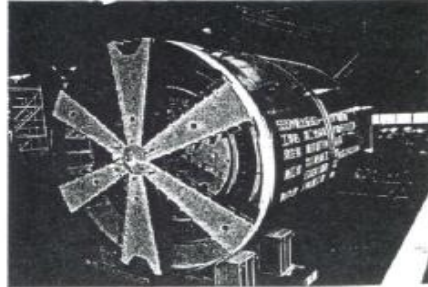
Boulder crushing type



Face breasting type (concentric)



Face breasting type (radial)

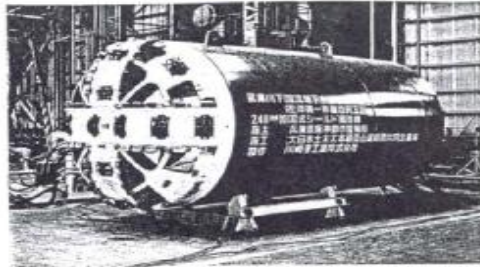


Spoke type

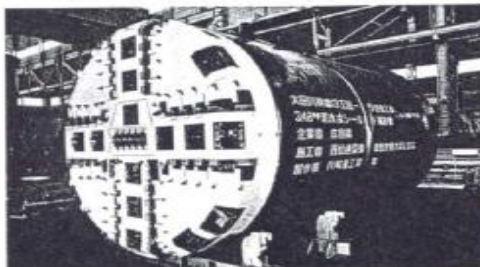
Ασπίδες με πίεση προς το μέτωπο από το υλικό εκσκαφής (Earth Pressure Balanced Shields, EPB)



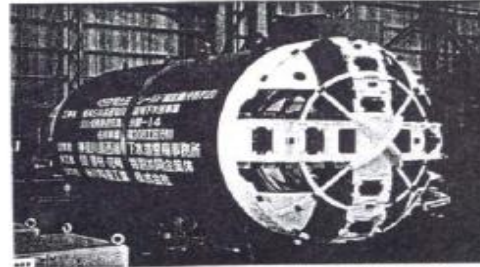
2.68 Mpa mud pressure balanced shield, fat type (drag bits protection)



2.48 Mpa mud pressure balanced shield, dome type

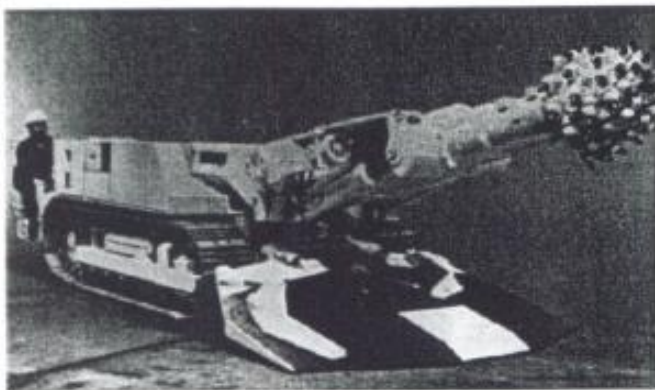


3.68 Mpa slurry shield, semi-dome type, front crushing type

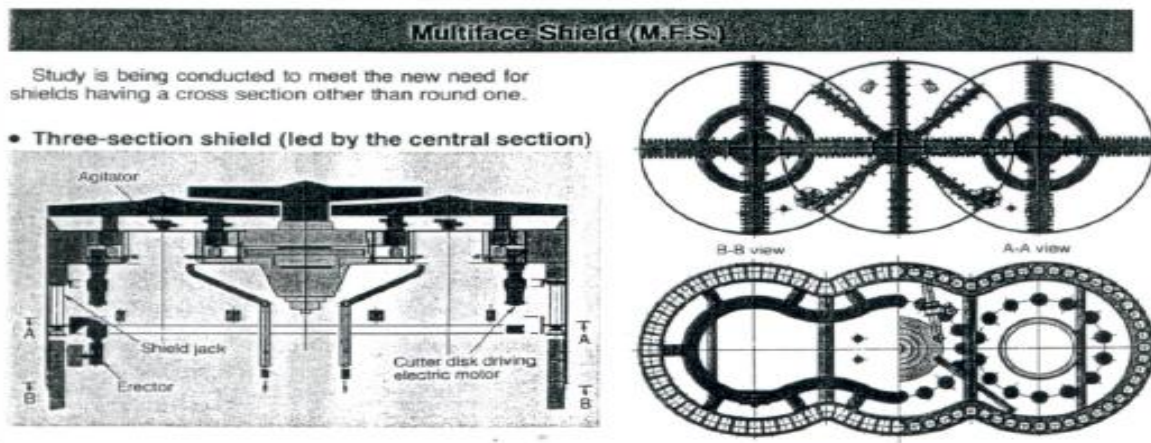


2.68 Mpa mud pressure balanced shield, dome type, non-front crushing type

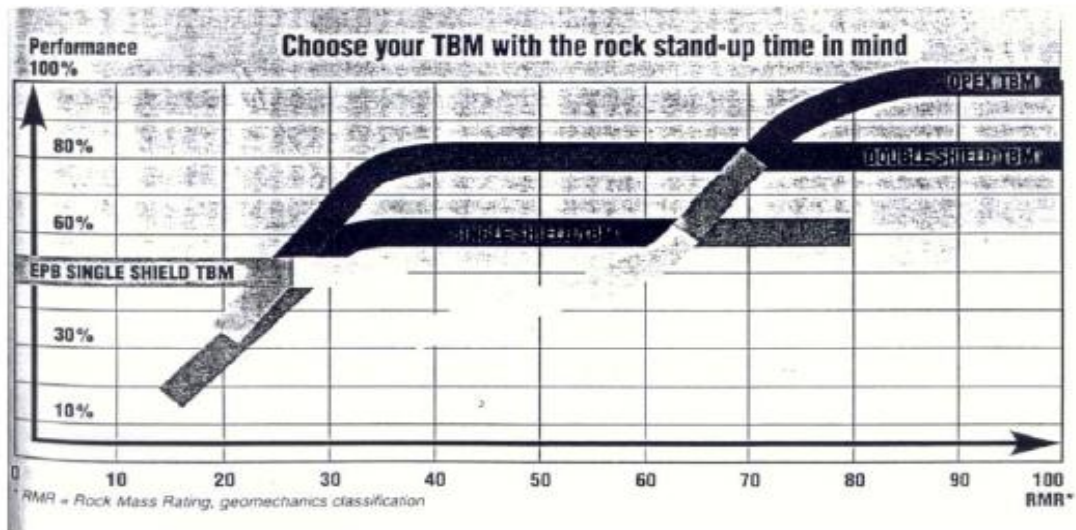
Ασπίδες με πίεση προς το μέτωπο με χρήση μπετονίτη



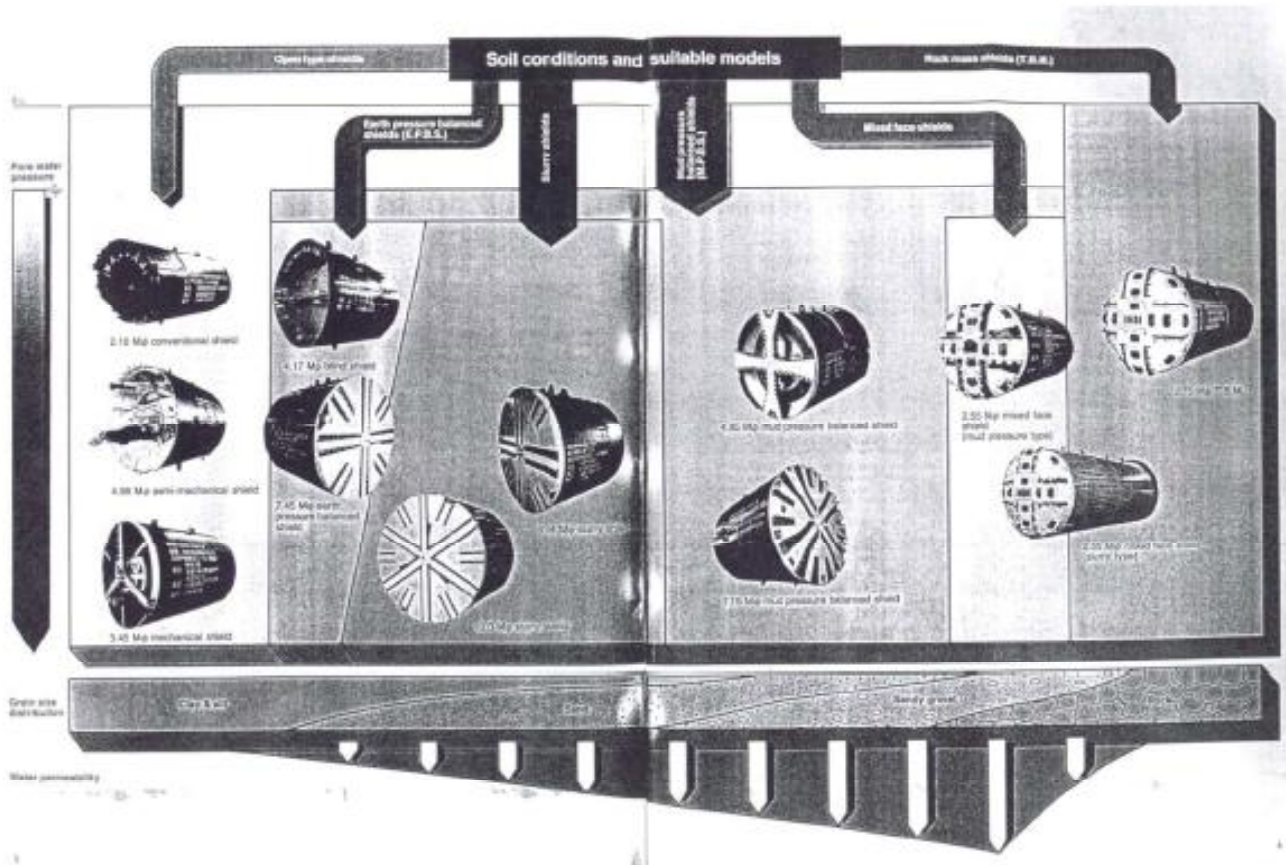
Μηχάνημα σημειακής κοπής



Επιλογή μηχανήματος ολομέτωπης κοπής ανάλογα με τη γεωτεχνική ταξινόμηση βραχώμαζας κατά Bieniawski







### 2.6.3 Εκσκαφή και Επανεπίχωση (Cut-and-Cover)

Η Εκσκαφή και Επανεπίχωση είναι μια απλή μέθοδος κατασκευής σιδηρόδρομων σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια, όπου πρώτα σκάβεται ένα όρυγμα και μετά τοποθετείται από πάνω η οροφή. Η αντοχή της οροφής και του συστήματος στήριξης θα πρέπει να είναι αρκετά ισχυρό ώστε να μπορεί να αντεπεξέλθει στο βάρος των υλικών επικάλυψης, των δρόμων και οτιδήποτε βρίσκεται στην επιφάνεια.

Είναι διαθέσιμες δύο βασικές μορφές της Εκσκαφής και Επικάλυψης:

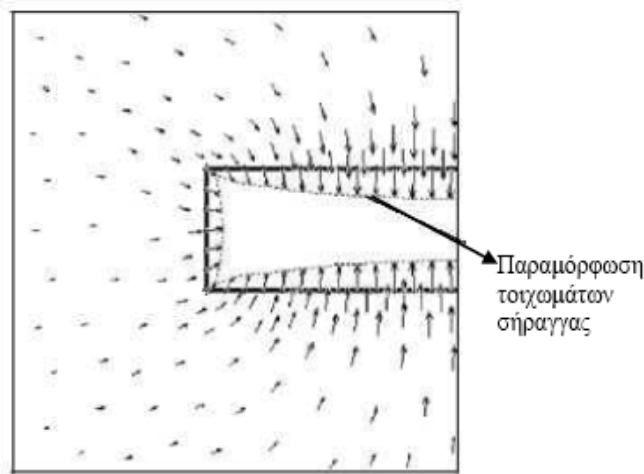
- *Μέθοδος από την βάση (bottom-up):* Ένα όρυγμα σκάβεται, με υποστήριξη του εδάφους όπου χρειάζεται, και η σήραγγα κατασκευάζεται μέσα σε αυτό. Η σήραγγα μπορεί να αποτελείται από σκυρόδεμα που χυτεύεται επιτόπου, προκατασκευασμένα κομμάτια σκυροδέματος, προκατασκευασμένα τόξα, ατσάλινα τόξα. Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν τούβλα για την κατασκευή. Το όρυγμα στην συνέχεια επικαλύπτεται με προσοχή στην εξισορρόπηση της συμπίεσης των υλικών επικάλυψης και η επιφάνεια αποκαθίσταται.
- *Μέθοδος από την οροφή (top-down):* Σε αυτή την μέθοδο, κατασκευάζονται διαφραγματικοί, πλευρικοί τοίχοι και πάνω σε αυτούς στηρίζονται δοκοί στήριξης στο επίπεδο του εδάφους. Στην συνέχεια γίνεται μια ρηχή εκσκαφή ώστε να είναι δυνατή η κατασκευή της οροφής με προκατασκευασμένα τόξα ή με χύτευση σκυροδέματος επιτόπου. Η επιφάνεια αποκαθίσταται εκτός από ορισμένα ανοίγματα. Τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για την διάνοιξη της σήραγγας κατεβαίνουν μέσω των ανοιγμάτων και ξεκινούν την εκσκαφή κάτω από την μόνιμη οροφή, μέχρι την βάση της σήραγγας. Αυτό επιτρέπει την γρήγορη επαναχρησιμοποίηση των δρόμων ή άλλων υπηρεσιών που βρίσκονται στην επιφάνεια. Με αυτή την μέθοδο κατασκευάζονται η σταθμοί του Μετρό Θεσσαλονίκης (τρέχον έργο).

**Οι ρηχές σήραγγες είναι συχνά εκσκαφής και επικάλυψης ενώ για μεγαλύτερα βάθη χρησιμοποιείται μηχάνημα διάνοιξης με ασπίδα εκσκαφής.**

## 2.7 Εκτίμηση συγκλίσεων σε σήραγγες

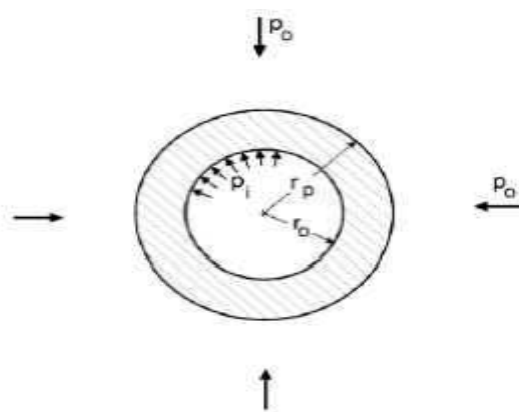
Η διάνοιξη σιδηρόδρομων σε ασθενείς γεωτεχνικά βραχώμαζες –δηλαδή βραχώμαζες με χαμηλό γεωλογικό δείκτη αντοχής (GSI) – είναι μεγάλη πρόκληση για το γεωτεχνικό μηχανικό καθώς θα πρέπει να γίνει ακριβής σχεδιασμός των μέτρων υποστήριξης ειδικά ελλοχεύει ο κίνδυνος μεγάλων σε έκταση αστοχιών που για να αντιμετωπισθούν χρειάζεται μεγάλο κόστος. Στα επόμενα εξετάζεται η παραμόρφωση της βραχώμαζας γύρω από μια σήραγγα και ο τρόπος που τα σχεδιαζόμενα μέτρα υποστήριξης αντιμετωπίζουν την παραμόρφωση. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τρισδιάστατων αναλύσεων - με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων - των παραμορφώσεων ασθενούς βραχώμαζας καθώς μέσα σε αυτή διανοίγεται σήραγγα και σε όλες τις διευθύνσεις επικρατεί το ίδιο τασικό πεδίο (υδροστατική πίεση).





Τα βέλη δείχνουν τη φορά των παραμορφώσεων (από Hoek)

Η παραμόρφωση της βραχώμαζας ξεκινά περίπου μισή διάμετρο μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας και φθάνει τη μέγιστη τιμή της περίπου μία και μισή διάμετρο πίσω από το μέτωπο της σήραγγας. Στο μέτωπο της σήραγγας περίπου το ένα τρίτο της παραμόρφωσης (κλείσιμο) κατά την ακτίνα της σήραγγας έχει πραγματοποιηθεί και το μέτωπο κινείται προς το εσωτερικό της σήραγγας. Θεωρείται ότι η περιβάλλουσα της σήραγγας βραχώμαζα συμπεριφέρεται σαν ένα ελαστικό – απολύτως πλαστικό υλικό και η αστοχία που θα συμβεί κατά μήκος αλληλοτεμνόμενων οικογενειών ασυνεχειών αυτής θα έχει μηδενική ογκομετρική μεταβολή, ενώ η υποστήριξη που θα εφαρμοσθεί στη σήραγγα μπορεί να προσομοιωθεί με μία εσωτερικώς ασκούμενη πίεση. Προκύπτει συνεπώς - για μια σήραγγα διαμέτρου  $r_0$  που υπόκειται σε εξωτερική ολόπλευρη πίεση  $p_o$  και εσωτερική πίεση  $p_i$  - ότι η βραχώμαζα αστοχεί (δημιουργία πλαστικής ζώνης όπως στο σχήμα που ακολουθεί) όταν η εσωτερική πίεση  $p_i$  είναι μικρότερη από την εσωτερική κρίσιμη που ορίζεται ως:



Δημιουργία πλαστικής ζώνης γύρω από κυκλική σήραγγα (από Hoek)

$$p_{cr} = \frac{2 * p_o - \sigma_{cm}}{1 + \kappa}$$

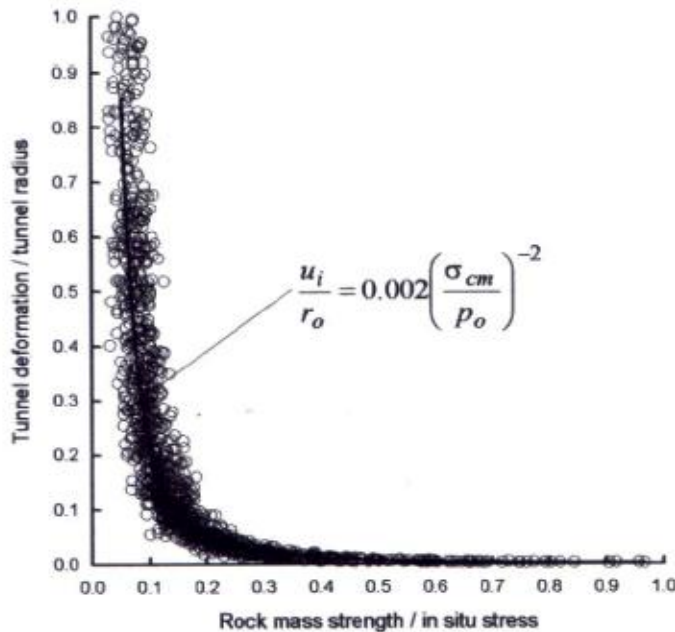
όπου  $\sigma_{cm}$  είναι αντοχή της βραχώμαζας και το  $\kappa$  ορίζεται ως:

$$\kappa = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'}$$

όπου  $\phi'$  είναι η γωνία εσωτερικής τριβής της βραχώμαζας.

Από τα παραπάνω ο Hoek (1999) κατέληξε ότι ο λόγος της μονοαξονικής

θλιπτικής αντοχής  $\sigma_{cm}$  της βραχώμαζας με την επιτόπου τάση του περιβάλλοντος  $p_o$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης για την εκτίμηση των πλαστικών παραμορφώσεων (συγκλίσεων) για κυκλικής διαμέτρου σήραγγες. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ένα ευρύ φάσμα αναλύσεων, που περιλαμβάνει σήραγγες σε βάθη από 80 έως και 800m (εξωτερικές πιέσεις  $p_o$  από 2 MPa έως 20 MPa), διαμέτρους σηράγγων από 4 έως 16m, και αντοχή άρρηκτου βράχου από 1 έως 30 MPa. Από τη μελέτη του διαγράμματος παρατηρείται μια συγκεκριμένη συμπεριφορά που μπορεί να παρασταθεί με την ακόλουθη εξίσωση:



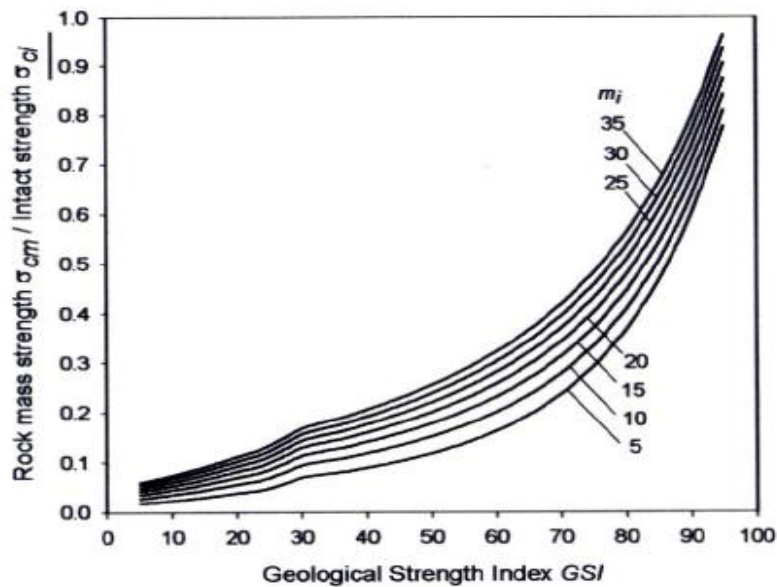
Διάγραμμα συσχέτισης συγκλίσεων σήραγγας με το λόγο  $\sigma_{cm}/\rho_o$ .

$$\varepsilon(\%) = \frac{u_i}{r_o} = 0.2 * \left( \frac{\sigma_{cm}}{\rho_o} \right)^{-2}$$

—όπου  $\varepsilon$  είναι παραμόρφωση της σήραγγας,

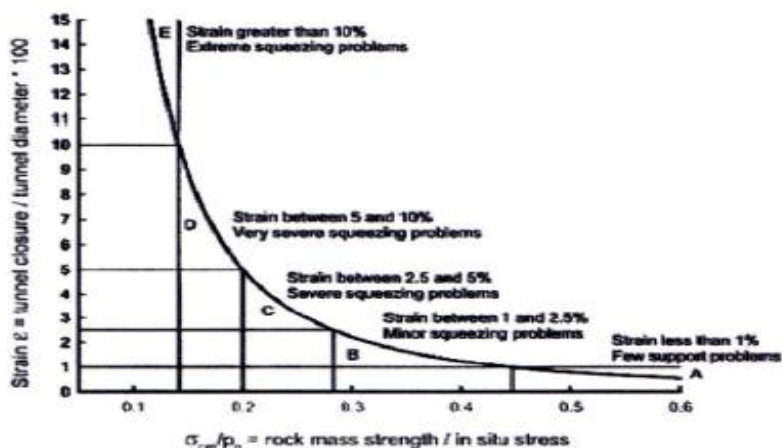
$u_i$  είναι η σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας και

$r_o$  είναι η διάμετρος της σήραγγας.



Σχέση μεταξύ GSI και του λόγου αντοχής βραχώμαζας  $\sigma_{cm}$  με την αντοχή του άρρηκτου βράχου  $\sigma_{ci}$

Επιπλέον ο Hoek στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζει εύρη τιμών παραμορφώσεων και τα συσχετίζει με τις συγκλίσεις, ενώ στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζει τρόπους υποστήριξης ανάλογη των παραμορφώσεων της βραχώμαζας.



	Παραμόρφωση ε(%)	Γεωτεχνικά στοιχεία	Τύποι υποστήριξης
A	Λιγότερο από 1%	Λίγα προβλήματα αστάθειας. Τα συνιστώμενα μέτρα υποστήριξης που βασίζονται σε συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα	Αγκυρα βράχου και χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
B	1% έως 2.5%	Μέθοδοι σύγκλισης αποτόνωσης χρησιμοποιούνται τόσο για την πρόβλεψη του σχηματισμού πλαστικής ζώνης στην περιβάλλουσα της σήραγγας βραχώμαζα όσο και για την αλληλεπίδραση μεταξύ της προοδευτικής ανάπτυξης της ζώνης αυτής και των διάφορων τύπων υποστήριξης.	Μικρά προβλήματα συγκλίσεων που αντιμετωπίζονται με αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυροδέμα, ενώ μερικές φορές προστίθενται ελαφρά μεταλλικά πλαίσια ή δικτυωτά πλαίσια
C	2.5% έως 5%	Χρησιμοποιείται διαδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων όπου έχουν ενσωματωθεί στοιχεία υποστήριξης και φάσεις εκσκαφής. Η αστάθεια μετώπου δεν είναι τόσο μεγάλο πρόβλημα.	Σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων που απαιτούν γρήγορη τοποθέτηση υποστήριξης καθώς και επιμελημένη εκτέλεση των εργασιών. Γενικώς απαιτείται η τοποθέτηση βαριών μεταλλικών πλαισίων μέσα στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα
D	5% έως 10%	Ο σχεδιασμός της σήραγγας ελέγχεται από την αστάθεια του μετώπου και ενώ χρησιμοποιείται διαδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, απαιτείται εκτίμηση της δράσης των δοκών προτορείας και της ενίσχυσης του μετώπου	Πολύ σοβαρές συγκλίσεις και προβλήματα ευστάθειας μετώπου. Συνήθως είναι απαραίτητη η χρήση δοκών προτορείας, ενίσχυση του μετώπου και μεταλλικών πλαισίων ενσωματωμένων στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα
E	Περισσότερο από 10%	Σοβαρά προβλήματα ευστάθειας μετώπου όπως επίσης και συγκλίσεις στη σήραγγα δημιουργούν ένα ιδιαίτερα δύσκολο τρισδιάστατο πρόβλημα για το οποίο δεν είναι ακόμη διαθέσιμες αποτελεσματικές μέθοδοι σχεδιασμού.	Εξαιρετικά προβλήματα συγκλίσεων. Συνήθως εφαρμόζονται δοκοί προτορείας και ενίσχυση του μετώπου. Ολισθαίνοντα πλαίσια

## 2.8 Γεωτεχνικά Όργανα Παρακολούθησης

### 2.8.1 Γενικά στοιχεία

Ο στόχος της τοποθέτησης των γεωτεχνικών οργάνων είναι να ποσοτικοποιηθούν οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τις αρχικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή του έργου. Οι παράμετροι που συνήθως καταγράφονται επί τόπου είναι η πίεση του νερού των πόρων του εδάφους, η διαπερατότητα και η ευστάθεια πρανών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των παραδοχών που έγιναν στη φάση του σχεδιασμού του έργου και στη συνέχεια κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου, για τη σύγκριση της συμπεριφοράς της προβλεπόμενης με την πραγματική παράμετρο. Έτσι, με την παρακολούθηση των οργανομετρήσεων, γίνεται έλεγχος των εδαφικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου, και κατά συνέπεια ελέγχεται και η ποιότητα στην εκτέλεση των εργασιών. Οι μετρήσεις χρησιμοποιούνται και σαν σύστημα προειδοποίησης επικείμενης αστοχίας επιτρέποντας τη λήψη εκτάκτων μέτρων.

### 2.8.2 Καθοριστικοί παράγοντες στην επιλογή των οργάνων

Για την επιλογή κάποιου γεωτεχνικού οργάνου λαμβάνονται υπόψη κάποιες σημαντικές παράμετροι, οι οποίες χαρακτηρίζουν το τεχνικό, το οποίο πρόκειται να κατασκευαστεί. Στο στάδιο του σχεδιασμού του έργου πρέπει να αναγνωρισθούν αυτές οι παράμετροι και να δοθεί το απαραίτητο βάρος στην επίλυση τυχόν γεωτεχνικών προβλημάτων.

Οι παράμετροι αυτοί, σε συνδυασμό με την σωστή επιλογή των οργάνων, το συστηματικό σχεδιασμό, τη μεθοδική συλλογή και την επεξεργασία δεδομένων, οδηγούν στην επιτυχή χρήση των οργάνων στις γεωκατασκευές. Ο Peck (Dunnicliff, 1993) είπε: “Κάθε όργανο που χρησιμοποιείται σε ένα έργο πρέπει να επιλέγεται και να τοποθετείται με σκοπό να δώσει απάντηση σε συγκεκριμένο ερώτημα/πρόβλημα.” Ακολουθώντας αυτόν τον κανόνα το πρόγραμμα οργανομετρήσεων θα στεφθεί με επιτυχία. Πέρα από την παράμετρο που μετράει το κάθε όργανο, η επιλογή του οργάνου επηρεάζεται και από κάποιους παράγοντες, οι οποίοι είναι:

**Εδαφικές συνθήκες.** Οι εδαφικές συνθήκες συχνά καθορίζουν τον τύπο του οργάνου.

Είναι λογικό η επιτυχής μέτρηση του κάθε οργάνου να εξαρτάται από τη συμβατότητα της σύνδεσης του εδάφους με το γεωτεχνικό όργανο, όπου θα πρέπει θεωρητικά το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή των αναφερόμενων να είναι παραπλήσια. Έτσι, διαφορετικά όργανα απαιτούνται σε βραχώδη και χαλαρά εδάφη λόγω διαφοράς των ακαμψιών τους.

**Κόστος.** Ανάλογα με τον τρόπο χρήσης ενός οργάνου (μικρό ή μεγάλο χρονικό διάστημα), συνυπολογίζεται το κόστος εγκατάστασης, το κόστος αγοράς και το κόστος για τη λήψη των μετρήσεων.

**Χρόνος λειτουργίας.** Ανάλογα με τον αναμενόμενο χρόνο λειτουργίας των οργάνων, τη φάση κατασκευής ή και τη διάρκεια ζωής του έργου γίνεται επιλογή κατάλληλων οργάνων, τρόποι προσέγγισης αλλά και προστασίας αυτών.

**Περιβαλλοντικές συνθήκες.** Συνθήκες, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, αποδείχθηκε ότι επηρεάζουν τη λειτουργία των οργάνων. Για παράδειγμα αποφεύγονται όργανα, όπου η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται σε ηλεκτρικού τύπου σε περιπτώσεις με έντονη υγρασία ή σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, ή υδραυλικού τύπου σε συνθήκες παγετού, Τα όργανα μέτρησης πρέπει να είναι κατάλληλα και να επιδέχονται τροποποίηση, ανάλογα με την κατάσταση.

### 2.8.3 Συμπεριφορά οργάνων μέτρησης

Η απόδοση ενός οργάνου μέτρησης χαρακτηρίζεται από τη συμβατότητα, το εύρος λειτουργίας, την ακρίβεια, την διακριτική ικανότητα, την ευαισθησία, τη γραμμικότητα και την επαναληπτικότητα στις μετρήσεις. Στο στάδιο τεχνικής και οικονομικής αξιολόγησης προσδιορίζονται οι ελάχιστες απαιτήσεις, αφού το κόστος του οργάνου αυξάνει με το βαθμό ακρίβειας, διακριτικότητας και επαναληπτικότητας των μετρήσεων (Γεωργιάννου, 2000).

**Συμβατότητα.** Η εγκατάσταση ενός οργάνου για την καταγραφή της τιμής μιας



παραμέτρου δεν θα πρέπει ουδέποτε να επηρεάζει την τιμή της εδαφικής παραμέτρου.

**Εύρος.** Καθορίζεται από τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή μέτρησης του οργάνου.

Συνήθως τόσο κατά την επιλογή ενός οργάνου όσο και κατά τον προγραμματισμό ενός τεχνικού προσδιορίζεται η μέγιστη απαιτούμενη τιμή μέτρησης.

**Ακρίβεια.** Εκφράζει την απόκλιση της τιμής μέτρησης από την πραγματική τιμή της παραμέτρου. Η απόκλιση προσδιορίζεται με τη βαθμονόμηση του οργάνου. Για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιούνται ειδικά κατασκευασμένες συσκευές, η ακρίβεια των οποίων ακολουθεί αυστηρές διεθνείς προδιαγραφές. Η απόκλιση μπορεί να είναι θετική + ή αρνητική -, ή να δίνεται με τη μορφή του ποσοστού %. Επομένως το όργανο θα καταγράφει τιμές που αντιστοιχούν σε μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές από τις πραγματικές.

**Επαναληπτικότητα.** Αναφέρεται σε ένα αριθμό, μετρήσεων της πραγματικής τιμής μιας παραμέτρου και αφορά την απόκλιση κάθε μιας από τις μετρήσεις από τη μέση τιμή. Επομένως, η επαναληπτικότητα αντανάκλα τη δυνατότητα προσδιορισμού μιας μέτρησης. Η επαναληπτικότητα προσδιορίζει τη μεταβολή της τιμής και εκφράζεται από ένα αριθμό με την προσθήκη του προσθεταφαιρέτου συμβόλου. Η διαφορά μεταξύ των όρων ακριβεία και επαναληπτικότητα φαίνεται στο σχήμα. Το σημείο τομής των δύο αξόνων αντιστοιχεί στην πραγματική τιμή της παραμέτρου.



Σχήμα : Ακρίβεια και επαναληπτικότητα.

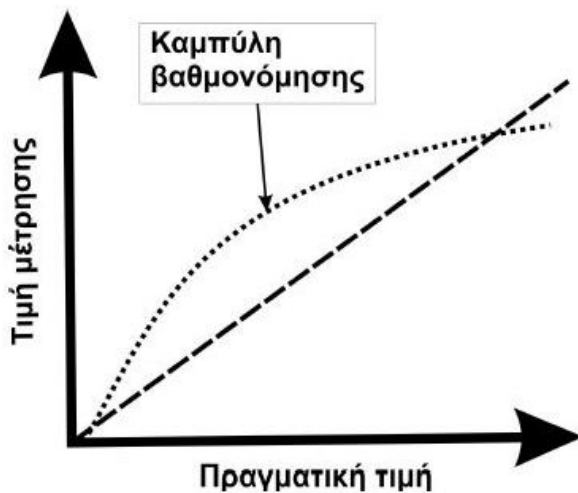
Στην πρώτη περίπτωση, οι μετρήσεις εμφανίζουν επαναληπτικότητα αλλά η απόκλισή τους από την πραγματική τιμή είναι σημαντική. Παρόμοιες μετρήσεις είναι πιθανώς αποτέλεσμα απόκλισης του οργάνου από τη μηδενική θέση ή απόρροια άλλου συστηματικού λάθους. Στη δεύτερη περίπτωση, οι μετρήσεις δεν εμφανίζουν επαναληπτικότητα, δεν είναι ακριβείς αλλά ο μέσος όρος τους είναι ακριβής. Οι μετρήσεις υποδεικνύουν τυχαίο λάθος. Τέλος, οι μετρήσεις στην τρίτη περίπτωση είναι ακριβείς και εμφανίζουν επαναληπτικότητα.

**Διακριτικότητα.** Είναι η μικρότερη υποδιαίρεση της κλίμακας του οργάνου. Στην περίπτωση ψηφιακής οθόνης η διακριτική ικανότητα είναι η μοναδιαία αλλαγή του τελευταίου ψηφίου. Η διακριτικότητα ενός οργάνου συνήθως μειώνεται όσο αυξάνει το εύρος των μετρήσεων.

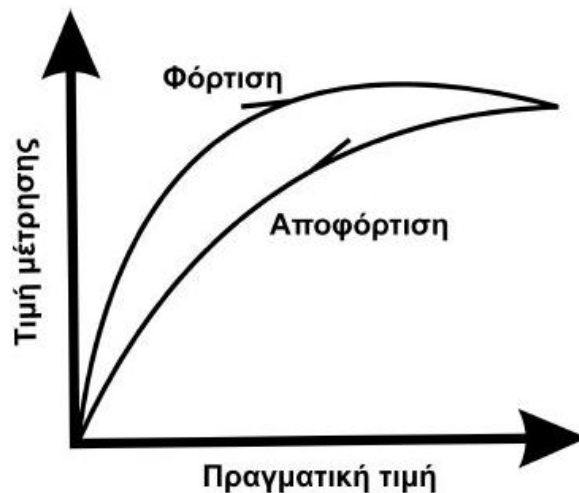
**Ευαισθησία.** Αναφέρεται στην έξοδο ενός οργάνου μέτρησης η οποία αντιστοιχεί στην επιβαλλόμενη είσοδο. Για την ίδια είσοδο το κάθε όργανο έχει διαφορετική έξοδο και το όργανο με τη μεγαλύτερη ευαισθησία εμφανίζει και τη μεγαλύτερη έξοδο. Μεγάλη ευαισθησία δεν σημαίνει και μεγάλη ακρίβεια ή επαναληπτικότητα.

**Γραμμικότητα.** Ένα όργανο μέτρησης εμφανίζει γραμμικότητα όταν οι μετρούμενες τιμές είναι ευθέως ανάλογες του μεγέθους που μεταβάλλεται και επομένως η καμπύλη βαθμονόμησης είναι ευθεία γραμμή (σχήμα 3.2). Συνήθως η καμπύλη βαθμονόμησης αποκλίνει από την ευθεία λόγω κατασκευαστικών περιορισμών του οργάνου. Η μέγιστη απόσταση της καμπύλης βαθμονόμησης από την ευθεία γραμμή που χαράσσεται, ώστε το άθροισμα των

αποκλίσεων από αυτή να είναι το ελάχιστο δυνατό, είναι ο δείκτης γραμμικότητας. Δείκτης γραμμικότητας 1%, σημαίνει ότι το μέγιστο λάθος ότων χρησιμοποιείται γραμμικός συντελεστής βαθμονόμησης είναι το ποσοστό 1% της μέγιστης πιθανής τιμής μέτρησης.



Σχήμα : Γραμμικότητα.



Σχήμα : Υστέρηση.

**Υστέρηση.** Αντιπροσωπεύει τις διαφορετικές τιμές μέτρησης μιας παραμέτρου όταν το μέγεθος που μεταβάλλεται αυξάνεται ή μειώνεται σε διαδοχικά βήματα (σχήμα )

**Θόρυβος.** Οι τιμές μέτρησης μιας παραμέτρου μεταβάλλονται λόγω εξωτερικών παραγόντων όπως γειννίαση με πηγές τάσης υψηλής συχνότητας ή πηγές εκπομπής ήχου, τηλεοπτικού σήματος κ.λ.π., με αποτέλεσμα τη μείωση της ακρίβειας και διακριτικότητας του οργάνου.

**Σφάλμα.** Είναι η διαφορά της μετρούμενης και της πραγματικής τιμής και συνεπώς μαθηματικά ισοδυναμεί με την ακρίβεια. Το σφάλμα μπορεί να είναι τυχαίο και συνήθως οφείλεται σε απροσεξία, κούραση, έλλειψη εμπειρίας, ή συστηματικό όταν το αποτέλεσμα μη σωστής βαθμονόμησης του οργάνου ή μεταβολής των συντελεστών της καμπύλης βαθμονόμησης με το χρόνο. Η τελευταία αποφεύγεται με το συχνό έλεγχο της καμπύλης βαθμονόμησης.

#### 2.8.4 Εγκατάσταση των γεωτεχνικών οργάνων

Η εγκατάσταση των οργάνων είναι σημαντικός παράγοντας για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Ένα όργανο μπορεί να θεωρηθεί αναξιόπιστο όταν έχει παραληφθεί και η παραμικρή ουσιαστική λεπτομέρεια κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης. Η ορθολογική χρήση του οργάνου δεν αναφέρεται σε οποιοσδήποτε συνθήκες της υπό μελέτη περιοχής, δεδομένου ότι κάθε περιβάλλον επιδρά διαφορετικά στα αποτελέσματα. Αυτός που θα πραγματοποιήσει την εγκατάσταση θα πρέπει να έχει βασικές γνώσεις στα γεωτεχνικά αλλά και γνώσεις στη διαδικασία εγκατάστασης του οργάνου.

Πριν από κάθε εγκατάσταση θα πρέπει να ληφθεί υπόψη:

- Το πρόγραμμα των οργανομετρήσεων
- Την παράμετρο που θα μετράει το όργανο
- Τη συχνότητα λήψης των μετρήσεων
- Τις οδηγίες εγκατάστασης του οργάνου
- Την προετοιμασία για την εγκατάσταση
- Την ακριβή θέση των οργάνων

Η τοποθέτηση των οργάνων γίνεται είτε σε ζώνες με συγκεκριμένο ενδιαφέρον, είτε σε

αντιπροσωπευτικές ζώνες, είτε σε ζώνη με χαρακτηριστικό δείκτη, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαφορετική συμπεριφορά αυτής. Ανεξάρτητα από τη θέση που ενδείκνυται στο τοπογραφικό σχέδιο, η ακριβής θέση του οργάνου θα ορίζεται τόσο από τη μορφολογία της υπό μελέτη περιοχής, όσο και από τη γεωλογία και τις λεπτομέρειες της κατασκευής.

#### **2.8.4.A Παράγοντες εγκατάστασης οργάνων**

Όλα τα όργανα θα πρέπει να είναι καλώς εγκατεστημένα, να διατηρούνται σε λειτουργία και να είναι προσβάσιμα προς λήψη μετρήσεων, για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εγκατάσταση των οργάνων στην επιφάνεια διαφέρουν αυτών σε γεώτρηση.

Επιφανειακά όργανα. Όταν τοποθετούνται όργανα στην επιφάνεια θα πρέπει να υπάρχει προστασία του οργάνου για την αποφυγή της καταστροφής αυτού, είτε από τη διέλευση των πεζών ή και των οχημάτων ή ακόμα και από τα ζώα. Ίσως να χρειαστεί να τοποθετηθούν μεταλλικά καλύμματα, ή κουτιά ή και κλειδαριές. Επίσης θα πρέπει να προστατευτούν και οι καλωδιώσεις και οι σωληνώσεις για τους ίδιους λόγους. Η προστασία από το νερό είναι ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας, δεδομένου ότι μπορεί να θεωρηθεί ακατάλληλο το όργανο, ακόμα και σε περίπτωση υγρασίας, όπως συμβαίνει με τα ηλεκτρικά όργανα.

Όργανα σε γεώτρηση. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη προσοχή.

Ισχύουν τα παραπάνω αλλά θα πρέπει να δοθεί προσοχή στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γεώτρησης δεδομένου ότι πρέπει να προστατευτεί η εισαγωγή του οργάνου στη σωλήνωση καθώς και να μην αλλάζουν οι παράμετροι της γεώτρησης σε περιπτώσεις παραμόρφωσης.

Επίσης, πολύ σημαντικό είναι να τηρηθούν οι οδηγίες για:

- Τη διάτρηση της οπής.
- Την εγκατάσταση της σωλήνωσης.
- Το γέμισμα μεταξύ της γεώτρησης και της σωλήνωσης.

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου κάποια όργανα θέτουν κάποιους περιορισμούς, προκειμένου να έχουν το βέλτιστο της λειτουργίας τους, ή ακόμα να πρέπει να παρθούν κάποια επιπρόσθετα μέτρα αναλογά με το περιβάλλοντα χώρο. Για παράδειγμα όταν οι κλισιομετρικοί σωλήνες τοποθετούνται σε μαλακά εδάφη καλό είναι να χρησιμοποιηθούν τηλεσκοπικοί σύνδεσμοι για την αποφυγή μεταβολής του μήκους του σωλήνα σε περιπτώσεις καθιζήσεων.

Επίσης, κατά την εγκατάσταση της σωλήνωσης πρέπει να αποφευχθεί η περιστροφή της και για το λόγο αυτό πριν από τη χρήση τους αποφεύγεται η έκθεση τους στον ήλιο και πριν την εισαγωγή τους ελέγχονται η τάση περιστροφής των καναλιών και συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αναιρείται η περιστροφή αυτών.

Συνοψίζοντας, οι παράγοντες που επηρεάζουν την εγκατάσταση των γεωτεχνικών οργάνων, τόσο σε επιφάνεια όσο και σε γεώτρηση, αφορούν κυρίως τη διαδικασία εγκατάστασης από την προετοιμασία του χώρου τοποθέτησης μέχρι και την σωστή πάκτωση του οργάνου, αλλά και τη σωστή λειτουργία του γεωτεχνικού οργάνου, η οποία εντοπίζεται κυρίως από τη βαθμονόμησή του.

#### **2.8.4.B Βαθμονόμηση**

Οι μετρήσεις από ένα γεωτεχνικό όργανο είναι χρήσιμες μόνο όταν η βαθμονόμηση του οργάνου είναι σωστή και ακριβής. Τότε μόνο δεν θα υπάρχουν αποκλίσεις της μετρούμενης τιμής από την πραγματική. Έτσι, ο χρήστης του κάθε οργάνου θα πρέπει αρχικά να είναι γνώστης της σωστής λειτουργίας του οργάνου και να μπορεί να αντιληφθεί τότε το όργανο δεν είναι σε θέση να δώσει σωστά αποτελέσματα. Για να είναι εφικτό αυτό θα πρέπει να ακολουθεί κατά γράμμα το εγχειρίδιο οδηγιών που δίνει ο κατασκευαστής και να πραγματοποιεί τις μετρήσεις με προσοχή και όχι μηχανικά, ώστε να παρατηρήσει τυχόν ανακρίβειες του οργάνου. Ανάλογα με την εμπειρία του χρήστη είναι δυνατόν αυτές οι ανακρίβειες να γίνονται αντιληπτές στο ύπαιθρο ή ακόμα και στην επεξεργασία των δεδομένων.

Ο πρώτος έλεγχος για τη βαθμονόμηση του οργάνου γίνεται από τον ίδιο τον κατασκευαστή στο εργαστήριο. Ενδεικνύται πριν την χρήση του οργάνου και εάν αυτό είναι εφικτό, ο ίδιος ο χρήστης να βρίσκεται παρών στη βαθμονόμηση του οργάνου στο εργαστήριο. Ο δεύτερος έλεγχος γίνεται αμέσως μετά την άφιξη του οργάνου στον χρήστη, δεδομένου ότι μπορεί να έχει υποστεί ζημιά κατά τη μεταφορά του. Ο ίδιος ο κατασκευαστής δίνει την ακρίβεια του οργάνου, η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Ο τρίτος έλεγχος πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια χρήσης του οργάνου. Θα πρέπει ο ίδιος ο χρήστης να λειτουργεί το όργανο σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή για να έχει ακρίβεια στα αποτελέσματά του και να μη θέτει σε κίνδυνο το ίδιο το όργανο. Επισημάνσεις για τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, για τυχόν υγρασία, για αποφυγή παραμικρών χτυπημάτων, για ολικό ξετύλιγμα του καλωδίου και στη συνέχεια χρήση αυτού, για εφαρμογή του οργάνου σε καθαρή επιφάνεια, για τον τρόπο πάκτωσης κ.α. θα πρέπει να τηρούνται για την αποφυγή ανακριβιών στις μετρήσεις. Η υπευθυνότητα του χρήστη και η εφαρμογή των οδηγιών για τον καθαρισμό του οργάνου, για τη στεγανότητά του, για τυχόν λαδώσεις, για τον τρόπο φόρτισης των μπαταριών, για τη προστασία των τερματικών, των καλυμμάτων, κ.α. συντελούν στη συχνότητα με την οποία θα πραγματοποιείται η βαθμονόμηση του, ή ακόμα και την αντικατάσταση του οργάνου. Γίνεται αντιληπτό ότι η συντήρηση του οργάνου είναι βασική και θα πρέπει να παρατηρείται η παραμικρή δυσλειτουργία του ή καταστροφή του. Η συχνότητα με την οποία θα πραγματοποιείται η βαθμονόμηση του οργάνου εξαρτάται από τη συχνότητα λήψης των μετρήσεων και τον τρόπο χρήσης αυτού. Θα πρέπει να υπάρχει επικοινωνία του κατασκευαστή με τον χρήστη για τη βαθμονόμηση του οργάνου και η οποία θα πραγματοποιείται στο εργαστήριο. Στην περίπτωση του κλισιομέτρου είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος και από τον ίδιο το χρήστη.

#### ***2.8.4.Γ Συλλογή, επεξεργασία, αξιολόγηση και παρουσίαση δεδομένων οργανομετρήσεων***

Πριν από την έναρξη των εργασιών οργανομετρήσεων, κατά τη φάση σχεδιασμού, απαιτείται η προετοιμασία λεπτομερών προδιαγραφών που συμπληρώνονται και οριστικοποιούνται μετά την εγκατάσταση των οργάνων, στις θέσεις καταγραφών. Οι προδιαγραφές οριστικοποιούνται, όταν το υπεύθυνο προσωπικό έχει εξοικειωθεί με τη λειτουργία των οργάνων και έχει ληφθεί υπόψη η επίδραση των ιδιαιτεροτήτων της θέσης του έργου. Με το πέρας του σχεδιασμού του προγράμματος των οργανομετρήσεων, γίνεται η λήψη των μετρήσεων και τελικά η παρουσίαση των δεδομένων που έχουν ληφθεί. Ο τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις αποδειχθήκε ότι είναι σημαντικός και πρέπει να είναι κατανοητός σε κάθε μηχανικό, ακόμα και στην περίπτωση που δεν έχει ασχοληθεί καθόλου με το αντικείμενο των οργανομετρήσεων.

Κατά τη φάση σχεδιασμού του προγράμματος οργανομετρήσεων για συγκεκριμένο έργο ή κατασκευή, ορίζεται μία ομάδα, η οποία είναι υπεύθυνη για τη συλλογή των δεδομένων, και η οποία είναι υπό την καθοδήση ενός πεπειραμένου γεωτεχνικού μηχανικού. Το προσωπικό που θα επιλεγεί πρέπει να είναι αξιόπιστο, ικανό στην καταγραφή στοιχείων με κάθε δυνατή ακρίβεια και λεπτομέρεια, εξοικειωμένο με τους υπολογιστές, γνώστης της εδαφομηχανικής και των βασικών αρχών μηχανολογικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Η επιλογή της κατάλληλης ομάδας είναι συνάρτηση τόσο των προσωπικών ικανοτήτων όσο και των απαιτήσεων του έργου.

Την ευθύνη των οργανομετρήσεων, συνήθως έχει ο κύριος του έργου ή εξειδικευμένο προσωπικό που έχει επιλεγεί από τον ανάδοχο του έργου. Ο κατασκευαστής του έργου είναι υπεύθυνος για τις παροχές που χρειάζονται για τις εργασίες της οργανομέτρησης, όπως η πρόσβαση του επιλεγμένου προσωπικού στις θέσεις των οργάνων στον χώρο του έργου. Τις περισσότερες φορές, ο κατασκευαστής είναι υπεύθυνος και για τις γεωδαιτικές εργασίες που σχετίζονται με τη συλλογή των δεδομένων.

Μέχρι πριν από μερικά χρόνια η πλειοψηφία των καταγραφών ήταν χειρόγραφη. Με την πρόοδο των συστημάτων αυτόματης καταγραφής, και όπου αυτό είναι εφικτό το σκηνικό άλλαξε. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης αυτοματοποιημένων συστημάτων καταγραφής είναι κυρίως η



μεγαλύτερη ευελιξία στη συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων και η ηλεκτρονική καταγραφή δεδομένων κατάλληλη για άμεση ανάλυση και παρουσίαση αποτελεσμάτων.

Πρέπει να έχουμε γνώση και των ακόλουθων μειονεκτημάτων κατά τη χρήση των αυτοματοποιημένων συστημάτων καταγραφής, όπως το σχετικά υψηλό αρχικό κόστος και συχνά υψηλό κόστος συντήρησης και ότι το σύστημα είναι ευάλωτο σε βλάβες υπό αντίξοες εδαφικές συνθήκες και εργασίες κατασκευής στην περιοχή του οργάνου.

Με το πέρας της συλλογής των δεδομένων και αφού έχει ελεγχθεί η ορθότητά τους – χρησιμοποιώντας οπτικές παρατηρήσεις στο έδαφος και στην κατασκευή, δίνοντας έμφαση στην ορθολογική χρήση των οργάνων αλλά και της συλλογής των δεδομένων, κ.λ.π., γίνονται οι ανάλογοι υπολογισμοί, οι οποίες είναι ανάλογες του έργου και του τύπου οργάνου. Πολλές φορές, πέρα από τους υπολογισμούς που κάνει το αντίστοιχο λογισμικό για κάθε όργανο, ο υπεύθυνος μηχανικός είναι υποχρεωμένος να υπολογίζει αριθμητικά ή ακόμα και με γραφικές παραστάσεις κάποιες παραμέτρους, βασικές ώστε να κατανοηθεί το επικείμενο πρόβλημα που πιθανόν θα προκύψει, όπως ο υπολογισμός του ρυθμού μεταβολής της μετρούμενης παραμέτρου.

Η χρήση των γραφικών απεικονήσεων υποβοηθά την ταχύτερη και ευκολότερη αξιολόγηση των δεδομένων στις ακόλουθες περιπτώσεις, όπως είναι ο έλεγχος της αξιοπιστίας δεδομένων και η παρουσίαση της μεταβολής των μεγεθών σε συνάρτηση με το χρόνο και τα στάδια κατασκευής του έργου. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η κατάλληλη παρουσίαση των καταγεγραμμένων μεγεθών αποτελεί θεμελιώδες υποβοήθημα στην κατανόηση των αρχών της εδαφομηχανικής όσο και της βραχομηχανικής.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι όταν τα δεδομένα δεν αξιολογηθούν σωστά, το πρόγραμμα των οργανομετρήσεων μπορεί να αποτύχει. Ο βασικός στόχος της περαιτέρω επεξεργασίας και αξιολόγησης των δεδομένων είναι η συσχέτιση των καταγεγραμμένων μεγεθών με άλλες παραμέτρους και η μελέτη της απόκλισης των καταγραφών από την προβλεπόμενη συμπεριφορά. Η αξιολόγηση βασίζεται στα χαρακτηριστικά του οργάνου και την ιδιαιτερότητα του κάθε έργου. Με το πέρας της αξιολόγησης των δεδομένων, πρέπει να γίνεται η δημοσιοποίηση αυτών σε όλα τα μέλη της ομάδας, αρχικά με την σύνταξη προκαταρκτικών εκθέσεων και μετέπειτα με την παράδοση της τελικής έκθεσης, η οποία και δίδεται στον Κύριο του Έργου και στον Μελετήτη.

Η έκθεση πρέπει να περιλαμβάνει μία εκτίμηση του βαθμού επιτυχίας/αποτυχίας του προγράμματος οργανομετρήσεων. Όταν όργανα χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς μεγεθών κατά τη φάση λειτουργίας του έργου, η τελική έκθεση πρέπει να αποτελεί τμήμα του Εγχειριδίου Λειτουργίας και Συντήρησης του Έργου. Αξιοσημείωτο είναι και η ενθάρρυνση των μηχανικών στη δημοσιοποίηση καλά σχεδιασμένων και επιτυχώς –ή/και ανεπιτυχώς- εκτελεσμένων προγραμμάτων οργανομετρήσεων ή και κάποιων καινοτόμων μεθόδων καταγραφής, συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων.

### 2.8.5 Όργανα μέτρησης ολικών τάσεων

Η ολική τάση στο έδαφος μετράται είτε αποκλειστικά μέσα στην εδαφική μάζα, είτε στην διεπιφάνεια εδάφους-κατασκευής, όπως μέτρηση της τάσης εδάφους σε επαφή με τοίχους αντιστήριξης, πασσαλότοιχους, διαφράγματα, στηρίξεις εκσκαφών και επιφανειακές θεμελιώσεις. Τα όργανα μέτρησης τάσης εδάφους είναι είτε εντοιχισμένες μονάδες (στοιχεία ή κύτταρα) μέτρησης εδαφικών τάσεων (περίπτωση αναχώματος ή φράγματος), είτε μονάδες επαφής για τη μέτρηση εδαφικών πιέσεων στη διεπιφάνεια εδάφους – δομικών στοιχείων κατασκευής.

Για να είναι αξιόπιστη η μέτρηση της ολικής τάσης σε σημείο μέσα στο έδαφος πρέπει να πληροί τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

1. Η παρουσία του οργάνου μέτρησης να μην μεταβάλλει το τασικό πεδίο στο έδαφος. Το μέτρο ελαστικότητα στο έδαφος πρέπει να προσομοιώνει αυτό του εδάφους. Για παράδειγμα το ένεμα που θα χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση του οργάνου να προσομοιώνεται στο μέτρο ελαστικότητας του περιβάλλοντος χώρου, για να μην επηρεαστούν οι μετρήσεις.



2. Η εγκατάσταση του οργάνου να μην μεταβάλλει την εντατική κατάσταση του εδάφους. Για παράδειγμα εάν γίνει χρήση ενός πιεζομέτρου θα πρέπει αυτό με τη σειρά του να μην αποτελεί μέσο αποστράγγισης της περιοχής.

3. Απαιτείται κατάλληλος σχεδιασμός του οργάνου ώστε η μέτρηση να επηρεάζεται στο ελάχιστο δυνατό, από ανομοιομορφίες, κατά την εντοίχιση στο έδαφος. Για το λόγο αυτό οι μετρήσεις περιορίζονται σε επιχώματα και γενικά σε τεχνητά εδάφη.

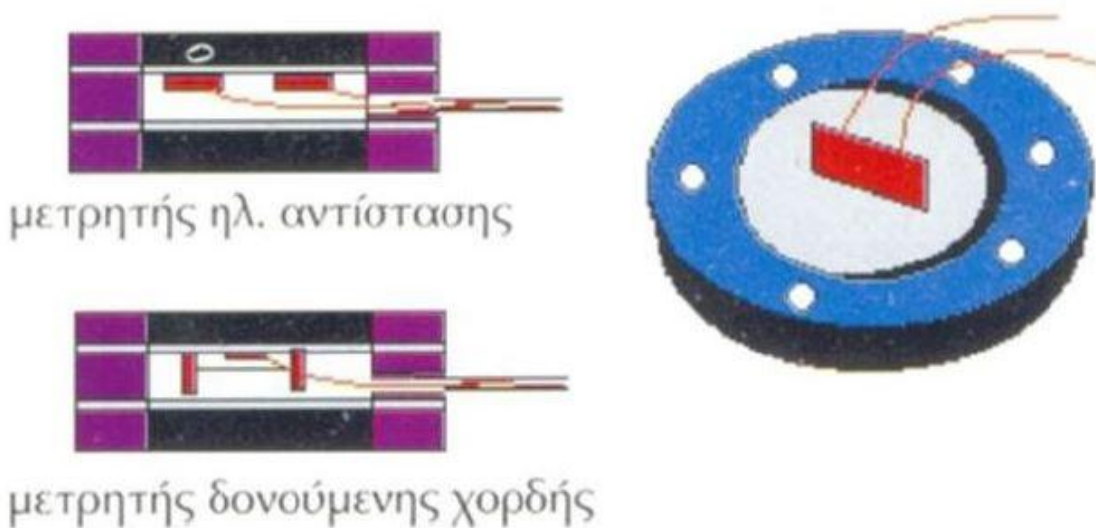
4. Η επιφάνεια της μέτρησης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μετριάζονται οι οποιεσδήποτε τοπικές ανομοιομορφίες.

Γενικότερα, οι μονάδες μέτρησης τάσης προσδιορίζουν τις ολικές τάσεις και την κατανομή των τάσεων σε επιχώματα και φράγματα, τις τάσεις σε διεπιφάνειες εδάφους-κατασκευής όπως τοίχους αντιστήριξης, διαφράγματα, μεσόβαθρα και ακρόβαθρα, τις τάσεις θεμελίωσης, τις τάσεις στην επιφάνεια και το εσωτερικό της επικάλυψης υπογείων κατασκευών και τις τάσεις στα τοιχώματα βράχου σε ανεπένδυτες υπόγειες κοιλότητες και σήραγγες.

### 3.5.1 Λειτουργία εντοιχισμένων μονάδων μέτρησης εδαφικής τάσης

Υπάρχουν δύο κατηγορίες μονάδων μέτρησης εδαφικής τάσης. Οι μονάδες των οποίων η λειτουργία βασίζεται στην α) αρχή του διαφράγματος και οι β) υδραυλικές μονάδες.

Το διάφραγμα που συνήθως έχει τη μορφή άκαμπτης μεταλλικής μεμβράνης που στηρίζεται περιμετρικά σε ένα μεταλλικό δακτύλιο παραμορφώνεται καμπτικά υπό τη δράση εξωτερικής τάσης. Η παραμόρφωση καταγράφεται από ένα μετρητή, η αρχή του οποίου βασίζεται στη χρήση είτε ηλεκτρικών αντιστάσεων, είτε δονούμενης χορδής. Ο μετρητής παραμόρφωσης τοποθετείται είτε στη μία πλευρική επιφάνεια του διαφράγματος (η οποία καθίσταται με αυτόν τον τρόπο ενεργός) είτε σε αμφότερες τις πλευρικές επιφάνειες (σχήμα 3.4).

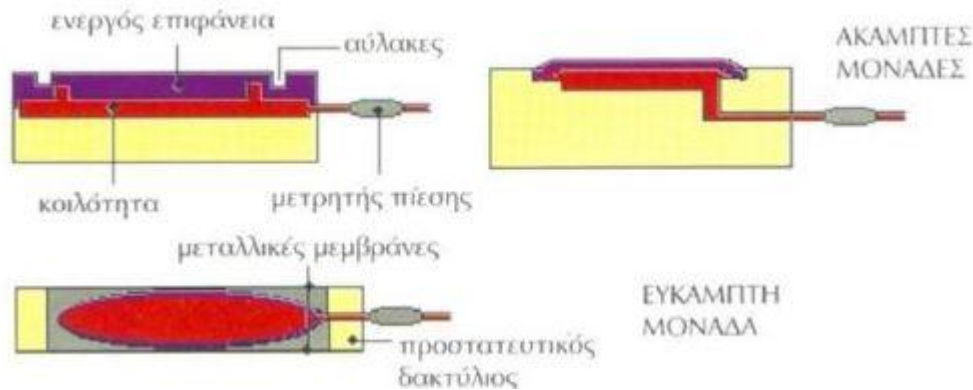


Σχήμα . Μονάδες διαφράγματος (Γεωργιαννού, 2000).

Οι μονάδες διαφράγματος χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση μικρών και μεσαίων τιμών τάσης από 0-3.5 MPa με ακρίβεια  $\pm 2$  kPa.

Οι υδραυλικές μονάδες αποτελούνται από δύο κυκλικές ή τετράγωνες χαλύβδινες πλάκες που ενώνονται περιμετρικά δημιουργώντας μια στεγανή κοιλότητα γεμάτη υγρό π.χ. μείγμα νερού-αλκοόλης. Η τάση του εδάφους είναι ίση με την πίεση του υγρού στο εσωτερικό της κοιλότητας. Το υγρό της κοιλότητας πρέπει να έχει παραμορφωσιμότητα ανάλογη με εκείνη του εδάφους, π.χ. λάδι για μετρήσεις στο έδαφος, υδράργυρος για μετρήσεις στο βράχο. Την πίεση του υγρού της κοιλότητας μετρά ο μετρητής. Όπως φαίνεται και στο σχήμα (3.5) η μία

υδραυλική μονάδα αποτελείται από δύο επιφάνειες σημαντικού πάχους από τις οποίες η ενεργός είναι η λεπτότερη (2.5 – 6.0mm).



Σχήμα . Υδραυλικές μονάδες (Γεωργιαννού, 2000).

Γενικά η επιλογή της κατάλληλης μονάδας πρέπει να βασίζεται στον έλεγχο των παραμέτρων όπως είναι: ο λόγος πάχους προς διάμετρο της μονάδας, ο λόγος της ακαμψίας του εδάφους προς την ακαμψία της μονάδας, οι διαστάσεις της μονάδας, οι ανομοιομορφίες κατά την τοποθέτηση της μονάδας στο έδαφος. Κάθε μονάδα πρέπει να ελέγχεται στο εργαστήριο συστηματικά. (Dunnicliff, 1993).

#### 2.8.5.A Εγκατάσταση μονάδων μέτρησης εδαφικής τάσης

##### Εγκατάσταση μονάδων μέτρησης τάσης σε επίχωμα

Η εγκατάσταση των μονάδων μέτρησης της εδαφικής τάσης πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή και σύμφωνα πάντα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Πρέπει να δοθεί έμφαση στο μέτρο ελαστικότητας του υλικού εγκατάστασης και αυτού του περιβάλλοντος χώρου. Η διάταξη των μονάδων να είναι τέτοια ώστε να γίνει σωστά η λήψη των μετρήσεων ακόμα και σε περιπτώσεις καθιζήσεων.

Οι μονάδες μέτρησης τάσης προσδιορίζουν την ολική τάση στο έδαφος.

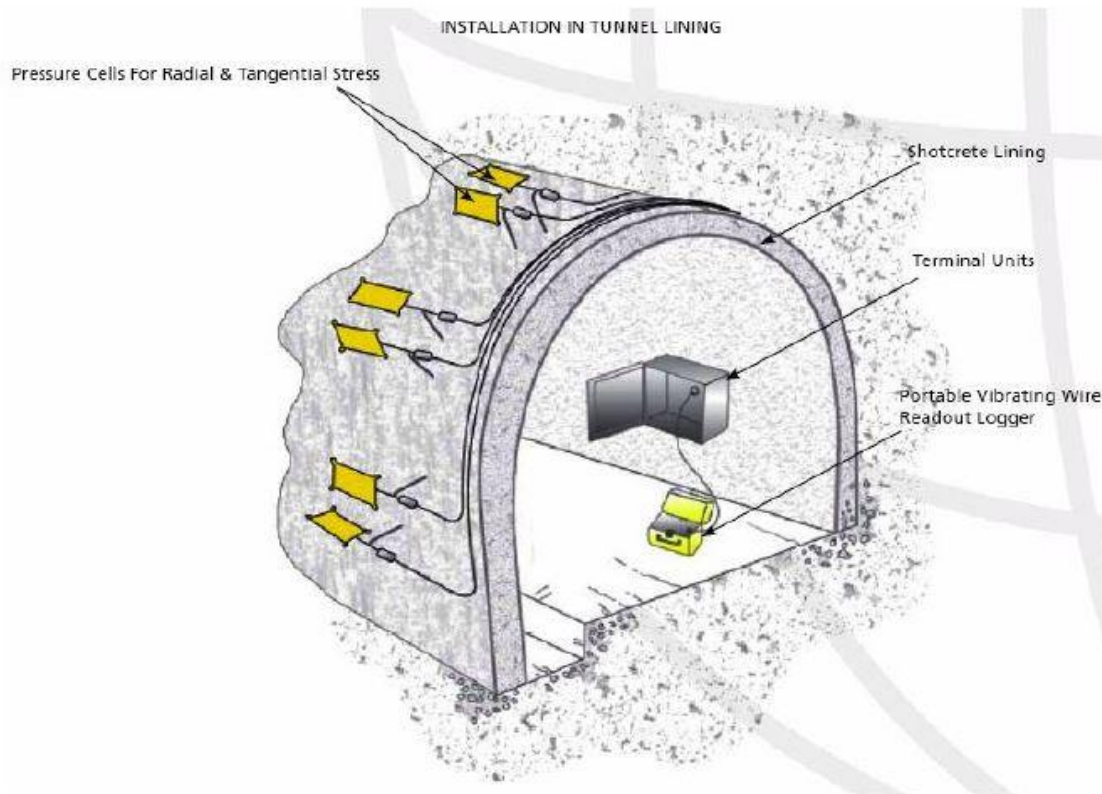
##### Εγκατάσταση μονάδων Μέτρησης Τάσης σε Διεπιφάνειες

Βασική προϋπόθεση κατά την εγκατάσταση των μονάδων μέτρησης τάσης σε διεπιφάνεια εδάφους – σκυροδέματος, είναι η ενεργός επιφάνεια της μονάδας να βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με τη μία επιφάνεια και σε απόλυτη επαφή με την άλλη πλευρά της διεπιφάνειας. Οι μονάδες μέτρησης της τάσης τοποθετούνται σε προκαθορισμένες υποδοχές, για μετρήσεις σε τοίχους αντιστήριξης, τάφρους, πασσάλους και επενδύσεις σήραγγας με προκατασκευασμένα τμήματα. Η βάση του οργάνου επικολλάται στην υποδοχή με ρητίνη.

Η σκυροδέτηση γίνεται επι τόπου, και πρέπει να επιτρέπει την στερέωση της μονάδας μέτρησης σε συγκεκριμένη θέση έχοντας πάντα σε επαφή το έδαφος και τη μονάδα.

##### Εγκατάσταση Μονάδων Μέτρησης Τάσης σε Σήραγγες

Η εγκατάσταση των μονάδων μέτρησης τάσης γίνεται είτε στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είτε ανάμεσα στα προκατασκευασμένα τμήματα της σήραγγας, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Οι μονάδες εγκαθίστανται στις σήραγγες σε ομάδες τριών (σχήμα 3.6) για τη μέτρηση ακτινικής, περιμετρικής, και αξονικής τάσης. Για χρήση σε βράχο ή σκυρόδεμα μονάδες κυκλικής ή τετραγωνικής επιφάνειας πάχους 64mm και διαστάσεων διαμέτρου 120 έως 170mm ή 70 \*(140 έως 200)\*300mm, έχουν σαν υλικό επίστρωσης υδράργυρο και μετρητές πίεσης τύπου διαφράγματος με σώμα και διάφραγμα από ανοξείδωτο χάλυβα. Η μέγιστη τάση λειτουργίας τους είναι 20MPa.



Σχήμα . Εγκατάσταση μονάδων Μέτρησης Τάσης σε σήραγγα (Soil Instruments Ltd.).

### **2.8.5.B Εγκατάσταση μονάδων μέτρησης τάσης σε βράχο**

Σύμφωνα με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά, οι τάσεις μέσα στην βραχομάζα μπορούν να εμφανίζουν σημαντικές διαφορές από σημείο σε σημείο. Συνεπώς η μέτρηση της τάσης σημείου μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτική της μάζας. Με την τοποθέτηση μίας μονάδας μέτρησης γίνεται ο έλεγχος της ευστάθειας του βράχου σε περιπτώσεις αστοχίας είτε λόγω αύξησης είτε λόγω μείωσης των τάσεων. Στη δεύτερη περίπτωση μείωσης της πλευρικής συμπίεσης επιτρέπει την ολίσθηση τεμάχων βράχου.

Για τον προσδιορισμό λοιπόν των τάσεων απαιτείται γνώση των ελαστικών ιδιοτήτων του βράχου.

### **2.8.5.Γ Μονάδα Μέτρησης φορτίων**

Στην κατηγορία αυτή το συχνότερο απαντώμενο όργανο μέτρησης είναι οι μονάδες μέτρησης φορτίου (load cells), οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την καταγραφή του επιβαλλόμενου φορτίου σε ελκυστήρες, αγκύρια βράχου (σχήμα 3.7), αγκύρια εδάφους, αντηρίδες, πασσάλους και επενδύσεις σηράγγων και εξασφαλίζουν:





Σχήμα . Κυψέλες μέτρησης φορτίων (Soil Instruments Ltd.)

#### Δοκιμές αγκυρίων (Acceptance tests)

Για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας των αγκυρίων γίνεται χρήση μονάδων μέτρησης των φορτίων που λαμβάνει το αγκύριο. Η μονάδα μέτρησης τοποθετείται μαζί με το αγκύριο και μεταξύ του γρύλου και της κατασκευής (π.χ τοίχος αντιστήριξης), όπου καταγράφει το φορτίο και την αντίστοιχη παραμόρφωση. Οι κανονισμοί ASTM προτείνουν προφόρτιση του αγκυρίου της τάξης του 10% πριν την εκτέλεση του πειράματος. Το φορτίο αυτό είναι ικανό να ενεργοποιήσει τη διατμηματική αντίσταση του αγκυρίου, να αποτρέψει την χαλάρωση του αγκυρίου και να εδράσει σωστά το γρύλο. Παράλληλα με την επιβολή των φορτίων, καταγράφεται και το φορτίο. Επίσης, καταγράφεται η συμπεριφορά της αγκύρωσης στη φάση λειτουργίας. Η μείωση του φορτίου, μπορεί να οφείλεται σε αστοχία της αγκύρωσης ή σε αποφόρτιση του εδάφους πίσω από το δομικό στοιχείο, π.χ τοίχο αντιστήριξης. Αύξηση του φορτίου πιθανώς οφείλεται σε αστοχία γειτονικών αγκυρώσεων ή φόρτιση του εδάφους. Κατά τις δοκιμές αγκυρίων (acceptance tests) ασκείται με τη βοήθεια υδραυλικής πρέσσας δύναμη στην κεφαλή, η οποία δρα στην κατεύθυνση του άξονα. Αρχικά προφορτίζεται το αγκύριο σε δύναμη  $F_i$  ( $F_i = 0,1F_{\text{λειτ}}$ ) και εν συνεχεία αυξάνεται η φόρτιση σε  $0,6F_p$  (όπου  $F_p = 1,25 F_{\text{λειτ}}$ ). Ακολουθεί αποφόρτιση  $0,2F_p$  και φόρτιση σε σταθερή δύναμη  $F_p$  για 5 λεπτά. Αν η πίεση μεταβληθεί πάνω από 5% η δοκιμή θεωρείται πετυχημένη και δε λαμβάνεται καμία μέτρηση επιμήκυνσης. Αναλυτική περιγραφή του τρόπου εκτέλεσης της δοκιμής περιγράφεται στο DIN 21521. Δοκιμές αγκυρίων προτείνεται να γίνουν ανά 50 m σε όλο το μήκος της σήραγγας και σε κάθε αλλαγή γεωλογικού σχηματισμού.

Τα είδη των μονάδων μέτρησης φορτίου είναι οι μετρητές φορτίου τύπου ηλεκτρικής αντίστασης, οι μετρητές φορτίου τύπου δονούμενης χορδής και οι μετρητές φορτίου υδραυλικού τύπου. Για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας οι μετρητές τοποθετούνται μεταξύ χαλύβδινων πλακών που υποβοηθούν στην ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου. Οι πλάκες πρέπει να είναι επίπεδες, παράλληλες μεταξύ τους και ικανής αντοχής ώστε να μην παραμορφώνονται υπό την επίδραση φορτίου. Η σωστή τοποθέτηση και ευθυγράμμιση των μετρητών επηρεάζει σημαντικά

την συμπεριφορά τους.

Οι περισσότερες μονάδες μέτρησης τύπου ηλεκτρικής αντίστασης φορτίου στις γεωτεχνικές εφαρμογές αποτελούνται από ένα κυλινδρικό δακτύλιο από χάλυβα ή αλουμίνιο. Οι ανωτέρω μετρητές είναι αξιόπιστοι και δεν επηρεάζονται από θερμοκρασιακές μεταβολές αλλά είναι ακατάλληλοι για χρήση μέσα στο έδαφος λόγω προβλημάτων στεγάνωσης.

Οι μετρητές φορτίου τύπου δονούμενης χορδής είναι και οι πλέον διαδεδομένοι γιατί οι μετρήσεις δεν επηρεάζονται από συνθήκες έντονης εφύγρανσης, ούτε και από το μήκος της καλωδίωσης. Είναι απλοί στη χρήση και τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι ακριβή και αξιόπιστα. Η ακρίβεια είναι της τάξης του 1%.

Οι μετρητές φορτίου υδραυλικού τύπου είναι κυλινδρικοί δακτύλιοι που εμπεριέχουν μία κοιλότητα πλήρη με υγρό. Στη συμπαγή τους μορφή είναι κύλινδροι από χάλυβα με επικάλυψη ρητίνης για να αντιστέκονται στην οξείδωση. Η επιβαλλόμενη εξωτερική φόρτιση μετατρέπεται σε πίεση υγρού της κοιλότητας. Η χρήση αυτής της μονάδας μέτρησης είναι απλή και τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα. Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι 1% και δεν επηρεάζονται από το μήκος των σωληνώσεων. Κατάλληλοι για τοποθέτηση κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (σχήμα 3.8).



Σχήμα Εγκατάσταση μετρητού φορτίου σε αγκύριο βράχου (SISGEO Co.).

Στην κατηγορία των εντοιχιζόμενων μετρητών παραμόρφωσης, το πλέον διαδεδομένο όργανο είναι οι κυψέλες φορτίου. Χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της κατανομής, αλλά και των ολικών πιέσεων, που θα ασκούνται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, καθώς και για τη μέτρηση των ολικών πιέσεων στην επαφή πετρώματος / χαλύβδινων πλασίων ή πετρώματος / σκυροδέματος.

Το κυρίως τμήμα μίας υδραυλικής κυψέλης αποτελείται από μία επίπεδη πλακοειδή κυψέλη πληρομένη με υγρό, η οποία μπορεί να δεχθεί πίεση 50 ή 200bar. Η πλάκα συνδέεται μέσω υδραυλικής αντλίας με έμβολο τύπου spring load, το οποίο εν συνεχεία με τη φορητή μονάδα καταγραφής. Ο καταγραφέας χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των μετατοπίσεων του εμβόλου και κατά συνέπεια των ασκούμενων πιέσεων επί του σκυροδέματος. Για την εξασφάλιση της λήψης ορθών μετρήσεων η υδραυλική κυψέλη υπόκειται σε προένταση έτσι ώστε να διατηρείται συνεχής η επαφή μεταξύ της πλακοειδούς κυψέλης και του περιβάλλοντος εδάφους. Μία τυπική υδραυλική κυψέλη και τα υπό μέρους τμήματα της φαίνονται στο σχήμα (3.9).





Σχήμα . Υδραυλική κυψέλη φορτίου (Soil Instruments Ltd)

Οι καταγραφόμενες- μετρούμενες πιέσεις συγκρίνονται με τις θεωρητικά υπολογισθείσες και ακολούθως ελέγχονται οι παραδοχές και οι παράμετροι σχεδιασμού. Προτείνεται η τοποθέτηση τουλάχιστον 2 κυψελών σε όλο το μήκος της σήραγγας και σε κάθε αλλαγή γεωλογικού σχηματισμού. Ιδιαίτερης προσοχής θα πρέπει να τύχουν οι θέσεις στις οποίες παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές του πεδίου των τάσεων λόγω διάνοιξης της σήραγγας. Όσον αφορά τη συχνότητα λήψης των μετρήσεων, ισχύουν αυτά που αναφέρονται και για τις μετρήσεις συγκλίσεων.

#### Μονάδες Μέτρησης Παραμορφώσεων σε Κατασκευές

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μετρητών παραμόρφωσης όπως επικολλώμενοι (bonded), συγκολλώμενοι (weld able), ηλεκτρικής αντίστασης, δονούμενης χορδής, ημιαγωγών, μεταλλικής επικάλυψης. Στην επιλογή του μετρητή υπεισέρχονται παράγοντες όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η ακρίβεια, το κόστος και το μέγεθος.

Για μέτρηση επιφανειακών παραμορφώσεων σε γεωτεχνικά έργα χρησιμοποιούνται τόσο οι επικολλώμενοι όσο και οι συγκολλώμενοι μετρητές. Συνήθως προτιμώνται οι συγκολλώμενοι γιατί η τοποθέτησή τους επιτόπου απαιτεί λιγότερο έμπειρο προσωπικό σε σχέση με τους επικολλώμενους. Οι εφαρμογές επικολλωμένων μετρητών παραμόρφωσης σε χάλυβα ελέγχουν τις τάσεις και τα φορτία στα δομικά στοιχεία της κάθε κατασκευής.

Οι τύποι των μονάδων μέτρησης παραμόρφωσης είναι οι παρακάτω:

#### Μετρητές Επιφανειακής παραμόρφωσης Τύπου Ηλεκτρικής Αντίστασης

Οι επιφανειακοί μετρητές παραμορφώσεων (surface mounted strain gauges) είναι όργανα που παρουσιάζουν μικρή τάση εξόδου, έχουν μήκος της τάξης των 0.25-150mm και μετρούν παραμόρφωση με ακρίβεια 1-100μs. Απαντώνται σε δύο τύπους επικολλώμενοι και συγκολλώμενοι. Η ακρίβεια των οργάνων στο εργαστήριο είναι  $\pm 1$  μs. Τα συγκολλώμενα όργανα μέτρησης παραμορφώσεων συνήθως προτιμώνται των επικολλωμένων στις επιτόπου εφαρμογές διότι η εγκατάστασή των δεν απαιτεί εμπειρία. Το μήκος τους είναι περί τα 25mm και η ακρίβεια τους κυμαίνεται από  $\pm 5$  έως  $\pm 15$ μs.

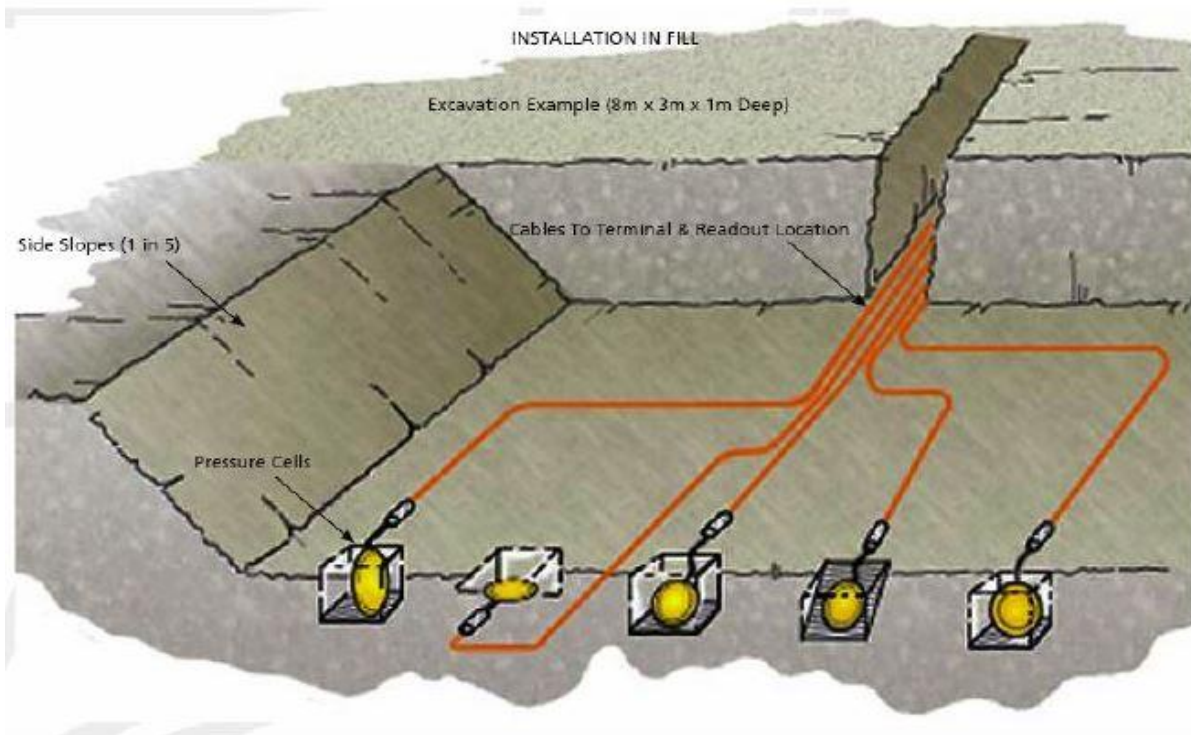
#### Μετρητές Παραμόρφωσης Τύπου Δονούμενης Χορδής

Τα όργανα αυτά συνήθως συγκολλώνται σε μεταλλικές κατασκευές ή προσκολλώνται σε επιφάνειες από σκυρόδεμα. Το όργανο αποτελείται από μεταλλική χορδή και ηλεκτρομαγνητικό πηνίο που περιβάλλονται από το σώμα χαλύβδινου σωλήνα.

#### Εντοιχιζόμενοι μετρητές παραμόρφωσης

Η βασική εφαρμογή των εντοιχιζόμενων μετρητών παραμορφώσεων (embedment strain gauges) είναι η μέτρηση παραμορφώσεων στο σκυρόδεμα. Στις γεωτεχνικές εφαρμογές τα

κατασκευαστικά στοιχεία είναι απλής διατομής και υποβάλλονται σε θλίψη ή και κάμψη όπως για παράδειγμα εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι (σχήμα 3.10) ή τοιχώματα φρεατίων. Οι εντοιχιζόμενοι μετρητές είναι όπως και οι επιφανειακοί, είτε τύπου ηλεκτρικής αντίστασης, είτε δονούμενης χορδής. Οι τελευταίοι είναι πλέον συνήθεις και ο μετρητής αποτελείται από τη χορδή και το πηνίο.



Σχήμα: Μέτρηση παραμόρφωσης στο σκυρόδεμα (Soil Instruments Ltd.)

## 2.8.6 Όργανα μέτρησης παραμόρφωσης

### 2.8.6.A Εισαγωγή

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες οργάνων μέτρησης παραμορφώσεων, αυτές που αναφέρονται σε επιφανειακές ή υπόγειες μετρήσεις, σε οριζόντιες ή κατακόρυφες, αξονικές ή στρεπτικές παραμορφώσεις, στον τρόπο λειτουργίας των οργάνων (μηχανικό ή ηλεκτρικό, κ.λ.π.) και στην ακρίβεια των οργάνων. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται τα είδη των οργάνων μέτρησης παραμόρφωσης ανάλογα με το τι μετράει ή κάθε κατηγορία.

Πίνακας.1: Κατηγορίες γεωτεχνικών οργάνων

Γεωτεχνικό όργανο	Τύπος οργάνου	Τι μετράει
1. Γεωδαιτικές μέθοδοι	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ταινία μέτρησης</li> <li>• Ηλεκτρονικό όργανο μέτρησης απόστασης</li> <li>• Θεοδόλιχος</li> <li>• Σταθερά σημεία αναφοράς</li> </ul>	Οριζόντια και κατακόρυφη μετατόπιση κατασκευών και επιφάνειας εδάφους
2. Όργανα μέτρησης Εγκάρσιας παραμόρφωσης	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κλισιόμετρα</li> <li>• Δείκτες προσδιορισμού επιπέδου αστοχίας</li> <li>• Μηκυσιόμετρα πρανών</li> <li>• Γωνιόμετρα</li> </ul>	Παραμόρφωση κάθετη στον άξονα της γεώτρησης ή του σωλήνα εγκατάστασης
3. Όργανα μέτρησης κλίσης κατασκευής	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων</li> <li>• Κλινόμετρα</li> </ul>	Κλίση κατασκευής
4. Όργανα μέτρησης σε διάφορες κατευθύνσεις	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μηκυσιόμετρα ανίχνευσης (μαγνητικό, ηλεκτρικό και μηχανικό)</li> <li>• Μηκυσιόμετρα τύπου ράβδου (απλού ή πολλαπλών σημείων)</li> </ul>	Καθίζηση, ανύψωση, σύγκλιση, πλευρική μετακίνηση σε εδαφικές αποθέσεις και σε βράχο.

Τα συχνότερα απαντώμενα όργανα μέτρησης παραμόρφωσης είναι τα μηκυσιόμετρα. Τα μηκυσιόμετρα μετρούν επιφανειακές και υπόγειες παραμορφώσεις σε όλες τις κατευθύνσεις. Διακρίνονται σε επιφανειακά, σε μηκυσιόμετρα με ανιχνευτή και σε μηκυσιόμετρα σταθερής βάσης.

Μια άλλη κατηγορία αποτελούν τα όργανα μέτρησης εγκάρσιας παραμόρφωσης. Αυτά καταγράφουν παραμόρφωση κάθετη στον άξονα της γεώτρησης ή του σωλήνα όπου τοποθετούνται. Το συχνότερο χρησιμοποιούμενο όργανο στην κατηγορία αυτή αποτελεί το κλισιόμετρο. Τα κλισιόμετρα με ανιχνευτή και τα μονίμως εγκατεστημένα κλισιόμετρα μετρούν την μεταβολή στην κλίση και κατά συνέπεια παραμορφώσεις.

Τα κλινόμετρα και οι ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της μεταβολής της κλίσης μιας κατασκευής.

Τέλος, στην κατηγορία αυτή ανήκουν και τα όργανα μέτρησης επιφανειακών παραμορφώσεων με χρήση γεωδαιτικών μεθόδων. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν ο θεοδόλιχος, η ταινία μέτρησης, τα σταθερά σημεία αναφοράς, κ.λ.π.

Μία εξίσου σημαντική μέτρηση παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια κατασκευής μίας σήραγγας είναι οι συγκλίσεις. Μεταξύ των διαφόρων μεθόδων γεωμηχανικής παρακολούθησης, οι μετρήσεις μετακινήσεων – συγκλίσεων, έχουν εμπειρικά αποδειχτεί οι πιο χρήσιμες για τρεις κυρίως λόγους:

- Αποτελούν μια άμεσα και σχετικώς εύκολα μετρούμενη ποσότητα.
- Παρέχουν πληροφορίες για τη συνολική μετακίνηση του εδάφους εντός της μετρούμενης περιοχής. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι οι μετρήσεις λαμβάνονται σε ικανό αριθμό σημείων, καλύπτοντας έτσι μεγάλο τμήμα του περιβάλλοντος εδάφους.

- Ελέγχουν την αποτελεσματικότητα των μέτρων αντιστήριξης. Αναφορικά με το είδος των οργάνων παρακολούθησης, τοίζεται ότι όργανα που λειτουργούν βασισμένα εξ' ολοκλήρου σε μηχανικά μέρη είναι γενικώς ανθεκτικότερα από αντίστοιχα ηλεκτρονικής φύσεως. Στοιχεία, όπως σκόνη, υγρασία, εκσκαφές, επιδρούν αρνητικά στη λειτουργία των ηλεκτρονικών μερών, μειώνοντας την ακρίβεια και την αξιοπιστία των ηλεκτρονικών οργάνων.

Οι μετρήσεις των συγκλίσεων θα γίνονται με γεωδαιτικές μεθόδους κατά τις τρεις διευθύνσεις x, y, z. Για το σκοπό αυτό τοποθετούνται στο εσωρράχιο της σήραγγας, ακίδες επί των οποίων είναι δυνατόν να εφαρμοστούν ανακλαστήρες (σχήμα ). Στη συνέχεια με χρήση θεοδόλιχου μετρούνται οι απόλυτες συντεταγμένες των σημείων και υπολογίζονται οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις και οι συγκλίσεις. Σημειώνεται ότι οι απόλυτες συντεταγμένες καταγράφονται αυτόματα δια μέσου καταγραφικού στον γεωδαιτικό σταθμό και έπειτα μεταφέρονται στον Η/Υ δια μέσου προγράμματος επικοινωνίας του γεωδαιτικού σταθμού.



Σχήμα : Ακίδες με ανακλαστήρες.

Με χρήση της μεθόδου αυτής μπορεί να επιτευχθεί ακρίβεια +/- 2 mm, η οποία είναι αρκετή για τη διερεύνηση της αντίδρασης του εδάφους και της επάρκειας των μέτρων αντιστήριξης. Η χωροστάθμιση σημείων μέσα στη σήραγγα για την παρακολούθηση των μετακινήσεων, θα γίνει με εξάρτηση από σταθερά εξωτερικά σημεία που θα βρίσκονται σε τόση απόσταση από το έργο, ώστε να είναι βέβαιο ότι η θέση τους δεν επηρεάζεται από αυτό. Η τοποθέτηση των ακίδων θα γίνεται σε απόσταση όχι μεγαλύτερη των 6m από το μέτωπο και με τέτοιο τρόπο ώστε να μην κινδυνεύουν από τις εργασίες που γίνονται μέσα στη σήραγγα. Αν η εκσκαφή γίνει σε δύο φάσεις τοποθετούνται τρία σημεία μέτρησης στην άνω ημιδιατομή (κλείδα, αριστερή παρειά, δεξιά παρειά) και δύο στην κάτω ημιδιατομή (αριστερή παρειά, δεξιά παρειά). Αν η εκσκαφή γίνει σε μια φάση τοποθετούνται και τα 5 σημεία μέτρησης ταυτόχρονα.

Οι μετρήσεις των μετακινήσεων (συγκλίσεις- χωροσταθμίσεις) θα λαμβάνονται τακτικά σε διατομές ανά 50m και αναλόγως των γεωλογικών σχηματισμών. Σε δυσμενείς συνθήκες θα γίνεται πύκνωση των σταθμών παρακολούθησης συγκλίσεων. Για παράδειγμα θα πρέπει να τοποθετείται σταθμός σε κάθε ομπρέλα προπορείας (ανά 12μ περίπου). Οι μετρήσεις θα λαμβάνονται καθημερινά για μία εβδομάδα και κατόπιν ανά 3-7 ημέρες για διάρκεια ενός μήνα. Στη συνέχεια οι μετρήσεις θα πραγματοποιούνται ανά 25-30 ημέρες μέχρι να σταθεροποιηθούν ασυμπτωτικά σε τέτοιο βαθμό, ώστε να μην παρουσιάζουν μεταβολές μεγαλύτερες από 1mm από την προηγούμενη μέτρηση και στο τέλος θα γίνεται περιοδικός έλεγχος. Οι μετρήσεις θα συνεχίζονται σε κάθε περίπτωση έως ότου το μέτωπο εκσκαφής απομακρυνθεί πέντε διαμέτρους σήραγγας τουλάχιστον.



Η πυκνότητα λήψης μετρήσεων θα αυξάνεται εάν η μετακίνηση μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων είναι μεγαλύτερη των 5mm ή τουλάχιστον υπάρχουν ενδείξεις αποσταθεροποίησης της βραχομάζας της περιοχής. Μετά την λήψη των μετρήσεων παράγονται διαγράμματα χρόνου-οριζώντιων μετακινήσεων, χρόνου- κατακόρυφων μετακινήσεων και απόστασης μετώπου σε σχέση με τις οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις. Τα διαγράμματα θα περιλαμβάνουν τις χρονικές στιγμές εφαρμογής των μέτρων αντιστήριξης καθώς και την ολοκλήρωση των μέτρων υποστήριξης. Επίσης θα υπολογίζεται ο ρυθμός ανάπτυξης του φαινομένου σύγκλισης (mm/12h) ανά σημείο μέτρησης. Οι μετακινήσεις που μετρήθηκαν, συγκρίνονται με τις θεωρητικά υπολογισθείσες τιμές για να ελεγχθούν οι παραδοχές σχεδιασμού.

#### 2.8.6.B Όργανα μέτρησης εγκάρσιας παραμόρφωσης

Πρόκειται για όργανα που τοποθετούνται σε μία γεώτρηση ή σε ένα σωλήνα και μετρούν παραμόρφωση κάθετη στον άξονα της γεώτρησης ή του σωλήνα. Χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του βάθους και της έκτασης μιας ζώνης αστοχίας σε πρηνή ή επιχώματα και της οριζόντιας παραμόρφωσης σε φράγματα ή παρειές εκσκαφών. Τα πλέον συνήθη όργανα είναι τα κλισιόμετρα. Άλλα όργανα μέτρησης εγκάρσιας παραμόρφωσης είναι τα ακόλουθα:

- Δείκτες προσδιορισμού επιπέδου αστοχίας. Στην απλούστερη μορφή τους είναι ξύλινοι δείκτες οι οποίοι εμπεγνύονται στο έδαφος σε βάθος μεγαλύτερο του βάθους του αναμενόμενου επιπέδου αστοχίας. Οι δείκτες θραύονται όταν λαμβάνει χώρα μετακίνηση κατά μήκος του επιπέδου. Το μειωμένο μήκος τους αντιστοιχεί στο βάθος του επιπέδου αστοχίας.
- Ένα άλλο σύστημα αποτελείται από πλαστικό σωλήνα διαμέτρου 50mm, ο οποίος παραμορφώνεται λόγω μετακίνησης του εδάφους στο επίπεδο αστοχίας. Ένα σύστημα ραβδών μήκους 150 έως 1020mm χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της καμπυλότητας στην περιοχή παραμόρφωσης. Το εύρος της μετρούμενης καμπυλότητας αντιστοιχεί σε ακτίνες 150mm έως 6m. Η καμπυλότητα του σωλήνα στην περιοχή του επιπέδου αστοχίας δίνεται από την έκφραση:

$$R = \frac{L_2}{8 \cdot (D_1 - D_2)}$$

όπου R=ακτίνα καμπυλότητας σωλήνα,  $D_1$  = εσωτερική διάμετρος σωλήνα,  $D_2$  = εξωτερική διάμετρος ράβδου, L = μήκος ράβδου

- Μηκυσιόμετρο Πρανών. Πρόκειται για μηκυσιόμετρο πολλαπλών σημείων και χρησιμοποιείται για προσδιορισμό μεγάλων διατμητικών παραμορφώσεων. Συγκρινόμενα με τα κλισιόμετρα πρόκειται για απλή και γρήγορη διαδικασία μέτρησης μεγάλων διατμητικών παραμορφώσεων. Το όργανο δεν καταγράφει απόλυτη μέτρηση μετακίνησης παρά μόνο όταν τα δύο τμήματα της γεώτρησης αποχωρίζονται, όπως φαίνεται στο σχήμα, λόγω πλευρικής μετακίνησης των τεταμένων ραβδών μέσα στη γεώτρηση.
- Επί τόπου κλισιόμετρα. Είναι κλισιόμετρα μονίμως εγκατεστημένα σε σειρά σε κατακόρυφη γεώτρηση. Χρησιμοποιούνται για την καταγραφή μετακινήσεων στις παρειές των εκσκαφών ή σε πρηνή ιδίως όταν απαιτούνται γρήγορες αυτοματοποιημένες καταγραφές. Η ακρίβειά τους είναι της τάξης των 0.5 έως 1mm στα 3m.
- Όργανα μέτρησης γωνίας (Γωνιόμετρα). Είναι ένα σύστημα ανάλογο με τα εν σειρά κλισιόμετρα όπου η μέτρηση της στροφής γίνεται με όργανα μέτρησης γωνίας αντί για όργανα μέτρησης της κλίσης. Συγκρινόμενα με τα κλισιόμετρα, τα γωνιόμετρα εγκαθίστανται σε γεωτρήσεις οποιασδήποτε κλίσης καθώς τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιούν δεν βασίζονται στη βαρύτητα. Λόγω ατέλειας στο σχεδιασμό τα όργανα αυτά δεν δύναται να συνυπολογίσουν τη στροφή του όλου συστήματος, εάν υπάρχει. Θα πρέπει να τονισθεί ότι τα λάθη στα γωνιόμετρα αυξάνονται εκθετικά ενώ στα κλισιόμετρα η αύξηση των λαθών ακολουθεί αριθμητική πρόοδο. Στην κατηγορία αυτή το όργανο που χρησιμοποιείται εκτενέστερα είναι το κλισιόμετρο. Μέσα από τη χρήση του οργάνου αποκτήθηκε η εμπειρία και η ανάλογη γνώση για το πως ακριβώς λειτουργεί και το κατά πόσο μπορούν τα αποτελέσματά του να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία.



### 2.8.6 .1 Κλισιόμετρα

Τα κλισιόμετρα, ανήκουν στην κατηγορία των οργάνων μέτρησης της εγκάρσιας παραμόρφωσης. Ο όρος κλισιόμετρο είναι η ελληνική απόδοση της λέξης inclinometer. Πιο συγκεκριμένα καταγράφουν παραμόρφωση κάθετη στον άξονα της γεώτρησης ή του σωλήνα όπου τοποθετούνται. Το κλισιόμετρο αποτελεί το συχνότερα χρησιμοποιούμενο όργανο στην κατηγορία του,

κυρίως σε περιοχές με κατολισθητικά φαινόμενα. Αυτό αποτελείται από:

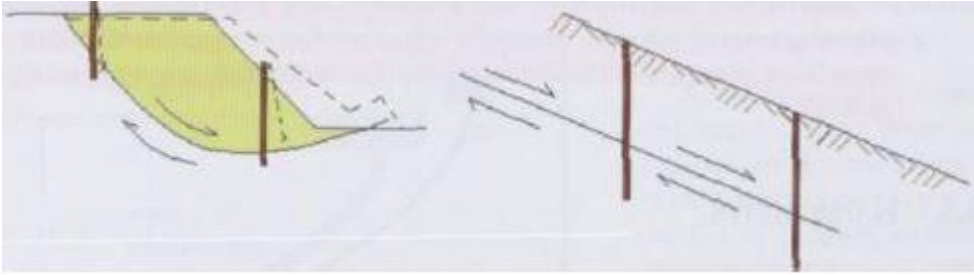
- Σύστημα σωλήνωσης από πλαστικό, αλουμίνιο, ινώδες γυαλί ή χάλυβα. Για τη μέτρηση οριζόντιας μετακίνησης η σωλήνωση τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση. Κατά μήκος της σωλήνωσης υπάρχουν ειδικά αυλάκια, στα οποία κινείται ο αισθητήρας.
- Από κινητό ανιχνευτή με αισθητήρα βαρύτητας ή άλλου τύπου αισθητήρα.
- Από Ηλεκτρικό κύκλωμα για ενεργοποίηση του οργάνου και μέτρηση της τάσης εξόδου.
- Από Καλώδιο με κωδικό αριθμό το οποίο συνδέει το ηλεκτρικό κύκλωμα με τον ανιχνευτή.
- Από τη Μονάδα μέτρησης (σχήμα 3.12) η οποία αποτελείται από μια απλή οθόνη ή σύστημα καταγραφής με μνήμη και επεξεργασία των μετρήσεων για συνεχή παρακολούθηση των μετακινήσεων.



Σχήμα 3.12. Κλισιόμετρο, (Ε.Ο.Α.Ε., 2000)

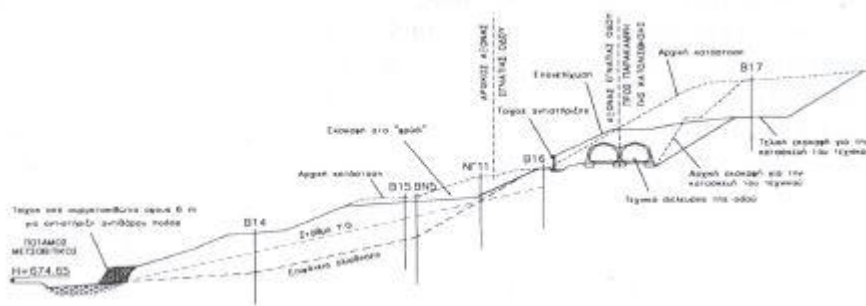
Οι κύριες εφαρμογές της ανάλυσης των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις του κλισιομετρικού οργάνου αναφέρονται παρακάτω:

**Επί τόπου έρευνα:** Εύρεση μετακίνησης, καθορισμός διατμητικών ζωνών, εξακρίβωση επιπέδου διάτμησης και έλεγχος ρυθμού μετακινήσεων πρυνών (σχήμα 3.13). Για παράδειγμα στη θέση κατασκευής φράγματος, ελέγχεται η ύπαρξη πιθανών διατμητικών ζωνών, οι οποίες με την αύξηση της πίεσης των πόρων μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία. Είναι σημαντικό η τοποθέτηση των κλισιομετρικών οργάνων να είναι τέτοια, ώστε να εντοπιστεί το επίπεδο διάτμησης. Για παράδειγμα μπορεί ο σωλήνας να είναι μέσα στη διατμητική ζώνη χωρίς να την τέμνει και άρα να μην την εντοπίζει αφού τα αποτελέσματα θα δείχνουν ότι δεν υπάρχει κίνηση.



Σχήμα: Τοποθέτηση κλισιομέτρου σε πρανή και σε περιοχή κατολίστησης (Γεωργιάννου, 2000).

**Έλεγχος παραδοχών σχεδιασμού:** Επιτρέπει την καταγραφή πραγματικών μετακινήσεων και τη σύγκρισή τους με τις τιμές που υπολογίστηκαν στη φάση σχεδιασμού. Πολλές φορές το ομαλό ανάγλυφο πάνω στις κλιτείς, το οποίο αποτελεί κάθισμα παλαιότερης μετακίνησης, παγιδεύει τον χαρακτή-οδοποιό. Επανεργοποίηση μιας τέτοιας κλιτύος γίνεται τόσο από ανθρώπινη παρέμβαση, όσο και από μία βροχοπτώση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περιοχή Δ3 του τμήματος 3.1, της Εγνατίας οδού, στην περιοχή Μ.Περιστερί-Ανθοχώρι, όπου έγινε επανασχεδιασμός τεχνικού δια εκσκαφής και επανεπίχωσης και μετατόπιση της οδού ανάντι των υλικών κατολίστησης, όπως φαίνεται και στο σχήμα (3.14). Επίσης εντοπίστηκε η επιφάνεια ολίστησης από τις ενδείξεις των κλισιομέτρων και ελήφθησαν τα ελάχιστα απαιτούμενα μέτρα για τη βελτίωση της ευστάθειας της κατολίστησης.



Σχήμα : Τοποθέτηση κλισιομέτρου στη φάση σχεδιασμού (Καβουνίδης και συν., 2003)

**Έλεγχος ασφαλείας:** Μόνιμα τοποθετημένα κλισιόμετρα χρησιμοποιούνται για την προειδοποίηση αστοχιών, π.χ. τοποθέτηση του οργάνου σε αυτοκινητόδρομους, σιδηροδρομικά δίκτυα και αγωγούς κοντά σε περιοχές κατολισθήσεων ή σε κατασκευές των οποίων ο τελικός σχεδιασμός εξαρτάται από την παρακολούθηση των οργανομετρήσεων. Για παράδειγμα στο τμήμα 2.4 της Εγνατίας Οδού, στην περιοχή Μεγ. Περιστερί, μεταξύ Μετσόβου και Ιωαννίνων, (σχήμα 3.15), τοποθετήθηκαν πάνω από 40 κλισιόμετρα στην περιοχή, οι μετρήσεις των οποίων έδειξαν μία μόνιμη κίνηση της τάξης των 1-2cm ανά χρόνο. Επομένως, θα υπήρχαν προβλήματα τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής, όσο και μετά την κατασκευή της οδού.



Σχήμα: Περιοχή 2.4, Μ.Περιστέρι-Ανθοχώρι. Τοποθέτηση κλισιομέτρου για τον καθορισμό διατμητικών ζωνών και μετακινήσεων. Επιλέχθηκαν εναλλακτικές χαράξεις λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των κλισιομέτρων (Καβουνίδης και συν., 2003).

#### 2.8.6.B.i Εγκατάσταση κλισιομετρικού σωλήνα- Ενεμάτωση

Πριν την εγκατάσταση συντάσσεται μια κατάσταση συστατικών μερών και ένα φύλλο μητρώου εγκατάστασης, στο οποίο θα καταγραφούν όλες οι λεπτομέρειες εγκατάστασης. Ανάλογα με το σκοπό της χρήσης των αποτεσμάτων των κλισιομετρικών οργάνων, καθώς και το βάθος εγκατάστασης του κλισιομετρικού σωλήνα, αλλά και το γεωπεριβάλλον, επιλέγεται η διάμετρος τόσο της γεώτρησης όσο και του σωλήνα εγκατάστασης. Η ελάχιστη διάμετρος γεώτρησης στην οποία πρόκειται να τοποθετηθεί ο κλισιομετρικός σωλήνας είναι 101 χιλιοστά. Ο σωλήνας κλισιομέτρου θα έχει εσωτερική διάμετρο τουλάχιστον 60 χιλιοστών.

Μοντέλο	Εφαρμογές
60χιλ.	Κατάλληλο για μακροχρόνιες καταγραφές σε μαλακά εδάφη
70χιλ.	Διεθνώς τυποποιημένη διάσταση
85χιλ.	Για πετρώματα και τοιχώματα σκυροδέματος όπου αναμένεται μικρή μετατόπιση εδάφους

Πίνακας : Η καταλληλότερη εφαρμογή της διαμέτρου του κλισιομετρικού σωλήνα

Η διακύμανση των μετρήσεων, λόγω περιστροφής, μειώνεται με την αύξηση της διαμέτρου του σωλήνα κλισιομέτρου, και έτσι το αξιμούθιο σφάλμα περιορίζεται, για δεδομένο πάχος τοιχωμάτων σωλήνωσης και διάσταση των εγκοπών κύλισης της τορπίλης (αισθητήρας). Επίσης, για τη σωστή κύλιση των τροχών της τορπίλης στις εγκοπές της σωλήνωσης είναι σημαντική ακόμα και ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστηκαν οι εγκοπές, δηλαδή με μηχανικό τρόπο ή με καλούπι. Στον πίνακα (3.2) αναφέρονται ενδεικτικά η καταλληλότερη εφαρμογή των σωλήνων ανάλογα με τη διάμετρό τους. Σε περιπτώσεις αυξημένων μετατοπίσεων σε μικρά χρονικά διαστήματα όπως σε μαλακά, λασπώδη ή αργιλικά εδάφη, μπορούν να παρουσιαστούν προβλήματα όπως θραύση των συνδέσμων, εκτροχιασμός ή αγκύρωση των τροχών της τορπίλης κ.λ.π. Σε αυτές τις περιπτώσεις ένας τηλεσκοπικός σύνδεσμος (π.χ. ΕΛΕΒΟΡ) προσφέρει ενίσχυση της σύζευξης και ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο αστοχίας του συνδέσμου. Ο σύνδεσμος αυτού του τύπου έχει μήκος 400 χιλ., ενώ οι σύνδεσμοι που διαθέτουν οι περισσότεροι κατασκευαστές είναι των 150-200 χιλ.

Όπως αναφέρθηκε η τοποθέτηση του κλισιομετρικού σωλήνα είναι σημαντική και πρέπει να γίνει

με μεγάλη προσοχή για να αποφευχθεί το παραμικρό λάθος καθώς και να μην ασκηθεί βία. Πριν να αρχίσει η τοποθέτηση ελέγχεται εάν το περίβλημα του γεωτρύπανου μπορεί να ανυψωθεί χωρίς να χρησιμοποιηθεί περιστροφή.

Οι σωλήνες ενεμάτωσης θα πρέπει να στερεώνονται στο εξωτερικό μέρος του σωλήνα του αποκλισιόμετρου. Ο σωλήνας του κλισιόμετρου θα πρέπει να χαμηλώνεται μέχρι να φθάσει στον πυθμένα της οπής και μετά να ανυψώνεται κατά 30 εκ., έτσι ώστε να μπορεί να γίνει σωστά η ρίψη του ενέματος και να πακτωθεί σωστά ο πάτος του σωλήνα. Σε αυτό το στάδιο, θα πρέπει να ελεγχθεί η διεύθυνση των αυλάκων και αν ο σωλήνας περιστρέφεται ελεύθερα. Η προσαρμογή γίνεται έτσι ώστε η μία αύλακα να είναι στραμμένη προς την κατεύθυνση της πιθανής κίνησης (δηλαδή, συνήθως κατάντι).

Μια ψευδοβολίδα θα χαμηλώνεται για να ελέγξει την συνέχεια των αυλάκων και ότι αυτή φθάνει στην κορυφή με όλους τους τροχούς στις σωστές αύλακες.

Το ένεμα θα σχεδιάζεται έτσι ώστε να έχει παρόμοια συνεκτικότητα με αυτή του εδάφους και να χρησιμοποιηθεί επιταχυντής για να μειωθεί ο χρόνος πήξης. Θα πρέπει να παρασκευάζονται δοκιμαστικά μίγματα πριν την ενεμάτωση ώστε να ελέγχεται η συνεκτικότητα του ενέματος. Ο μπετονίτης θα πρέπει να αναμιχθεί με νερό έξι ώρες πριν την προσθήκη του τσιμέντου. Τα μίγματα που αναφέρονται πιο κάτω είναι ενδεικτικά:

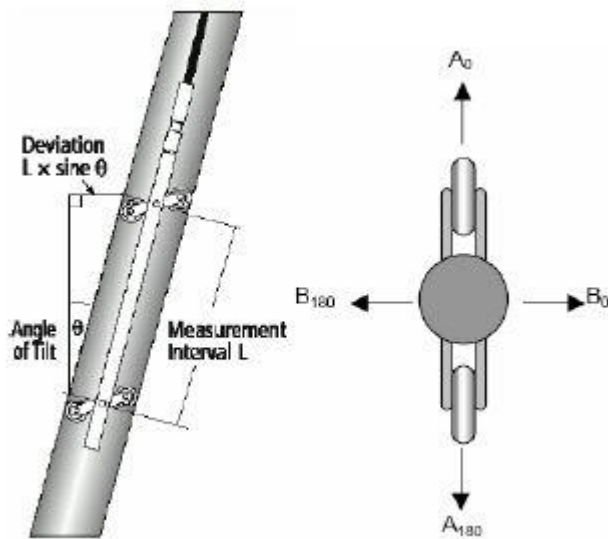
- Ισχυρό Πέτρωμα: αναλογία 0.87 : 0.13 : 1, τσιμέντο : μπετονίτης: νερό, ή 750kg τσιμέντου προς 100kg μπετονίτη ανά κυβικό μέτρο.
- Ασθενές πέτρωμα: αναλογία 0.23 : 0.17 : 1, τσιμέντο: μπετονίτης: νερό, ή 200kg τσιμέντου προς 150kg μπετονίτη ανά κυβικό μέτρο.
- Χαλαρός σχηματισμός: αναλογία 0.06 : 0.15 : 1, τσιμέντο : μπετονίτης : νερό, ή 50kg τσιμέντου προς 150kg μπετονίτη ανά κυβικό μέτρο.

Η ενεμάτωση θα πρέπει να γίνει διαμέσου του χαμηλότερου σωλήνα (δηλαδή η πλήρωση πραγματοποιείται από τον πυθμένα προς την επιφάνεια). Εάν χάνεται μέρος του ενέματος στο έδαφος, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν πρόσθετες ουσίες όπως λεπτή άμμος και πριονίδι. Όταν το ένεμα πήξει, θα εγκατασταθεί το κομμάτι από σκυρόδεμα και το μεταλλικό κάλυμμα. Μέσα στο κομμάτι από σκυρόδεμα θα τοποθετηθεί υποδοχή για μάρτυρα χωροθέτησης, για να συγκρίνονται τα αποτελέσματα και να αποφεύχονται λάθη, όταν υπάρχει μετακίνηση.

#### 2.8.6.B.ii Μετρήσεις Βάσης

Πριν την λήψη μετρήσεων βάσης, θα πρέπει να αποφασισθεί η κατεύθυνση A, η οποία θα πρέπει να συμπίπτει με την πιθανή αναμενόμενη διεύθυνση μετακίνησης. Για την ασφαλέστερη διεξαγωγή των μετρήσεων και την εξάλειψη του λάθους 'κατακορυφότητας' (sensor offset error ή bias shift error) του οργάνου οι μετρήσεις λαμβάνονται δύο φορές με 180 μοίρες διαφορά, πρώτα προς τη διεύθυνση A0 και προς τη διεύθυνση A180 (σχήμα 3.17). Το όργανο αυτόματα λαμβάνει τις τιμές των αποκλίσεων στις δύο κάθετες διευθύνσεις από δύο φορές με αντίθετο πρόσημο.





Σχήμα : Διεύθυνση λήψης μετρήσεων. Απόκλιση της τορπίλης από την κατακόρυφο (Ομάδα ΕΟΑΕ)

Οι τελικές τιμές σε κάθε διεύθυνση βρίσκονται από το μέσο όρο των αλγεβρικών διαφορών ( $A_0$  και  $A_{180}$ ). Οι τιμές που λαμβάνονται από το όργανο αναφέρονται στη γωνία που σχηματίζει η βολίδα από την κατακόρυφο ( $\theta$ ) πολλαπλασιασμένα με έναν συντελεστή, ο οποίος ποικίλει από κλισιόμετρο σε κλισιόμετρο. Στη συνέχεια αυτός ο αριθμός μετατρέπεται σε χιλιοστά απόκλισης και έτσι παράγεται το διάγραμμα της συνολικής απόκλισης του κλισιομετρικού σωλήνα. Οι μετρήσεις βάσης θα πρέπει να ληφθούν μια εβδομάδα μετά την εγκατάσταση. Θα λαμβάνονται δύο σειρές μετρήσεων στις αύλακες Α. Θα συγκρίνονται και αν δεν πληρούνται τα εξής κριτήρια, θα ληφθεί μια τρίτη σειρά μετρήσεων:

Η διαφορά μεταξύ των μέσων ποσών ελέγχου πρέπει να είναι μικρότερη από  $\pm 10$  στον άξονα Α και από  $\pm 20$  στον άξονα Β.

Η διαφορά μεταξύ της πρότυπης απόκλισης των ποσών ελέγχου πρέπει να είναι μικρότερη από 3 μονάδες στον κάθε άξονα.

Η φαινόμενη αθροιστική μετατόπιση να είναι μικρότερη από 2 χιλιοστά σε κάθε επίπεδο του διαγράμματος για εγκαταστάσεις βάθους μέχρι 60 μέτρων και λιγότερο από 4 χιλιοστά σε όλες τις στάθμες για εγκαταστάσεις με βάθος μεγαλύτερο από 60m.

Αν δεν είναι δυνατόν να ικανοποιηθούν τα κριτήρια μετά από τρεις μετρήσεις, θα πρέπει να εντοπιστούν οι στάθμες, στις οποίες δεν είναι αξιόπιστα τα δεδομένα. Αν ανακαλυφθεί ότι τα σφάλματα είναι εγγενή στις αύλακες Α, οι μετρήσεις θα πρέπει να εκτελεστούν στις αύλακες Β. Η βασική σειρά για την σύγκριση με μελλοντικές μετρήσεις θα επιλεγεί ως η πιο αντιπροσωπευτική σειρά.

#### 2.8.6.B.iii Συνήθεις μετρήσεις ρουτίνας

Οι συνήθεις μετρήσεις ρουτίνας θα λαμβάνονται κατά τη φορά ανύψωσης ανά 0,5 μ στις διευθύνσεις  $A_0$  και  $A_{180}$ . Ο λόγος που γίνονται οι μετρήσεις από τον πυθμένα προς τα πάνω είναι γιατί κατά την εισαγωγή της τορπίλης αναγνωρίζεται εάν έχει στρεβλωθεί ή παραμορφωθεί ο σωλήνας και άρα προσέχεις ή ακόμα και δεν λαμβάνεις τη μέτρηση για να μην καταστρέψεις την τορπίλη και γιατί μπορεί να δημιουργήσεις ένα νέο αρχείο όταν γίνει η λήψη των μετρήσεων από διαφορετικό βάθος.

Θα πραγματοποιούνται 2 σύνολα μετρήσεων στην Α διεύθυνση. Οι δύο, αυτές μετρήσεις θα συγκρίνονται μεταξύ τους και θα πρέπει να τηρούν τα προαναφερθέντα κριτήρια, σε αντίθετη περίπτωση θα πραγματοποιηθεί και ένα τρίτο σετ μετρήσεων. Εάν τα λάθη εντοπίζονται μόνο στην Α διεύθυνση, τότε πρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις και στη Β διεύθυνση.



#### 2.8.6.B.iv Σφάλματα μετρήσεων

Όσον αφορά την αξιολόγηση των μετρήσεων, αυτή πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή αλλά και εμπειρία. Πολλές φορές έχουν παρατηρηθεί διαγράμματα με φαινόμενες κινήσεις που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα ή επιδρούν στο μέγεθος και την μορφή πραγματικών κινήσεων, γεγονός που απαιτεί προσοχή, εμπειρία και συσχετισμό των αποτελεσμάτων με άλλα όργανα και στοιχεία παρατήρησης.

Οι μετρήσεις που λαμβάνονται με τα κλισιόμετρα συνήθως παρέχουν καλής ποιότητας αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, στην εκτέλεση οποιονδήποτε μετρήσεων, πάντα υπεισέρχονται τα συστηματικά ή τυχαία σφάλματα. Ο εντοπισμός και η διόρθωσή τους πλέον τείνει να επιλυθεί και σχεδόν σε κάθε λογισμικό πακέτο που συνοδεύει το γεωτεχνικό όργανο υπάρχει και η αντίστοιχη επέμβαση διόρθωσης με άμεσο τρόπο.

Τα είδη των σφαλμάτων που εντοπίζονται χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα τυχαία και στα συστηματικά σφάλματα. Συνήθως τα τυχαία σφάλματα παραμένουν αμετάβλητα ενώ τα συστηματικά σφάλματα τείνουν να μεταβάλλονται 9672 0 από περιοχή σε περιοχή. Το τυχαίο σφάλμα  $\pm 1.24\text{mm}$  στα 30m μέτρησης παραμένει ενώ όλα τα συστηματικά σφάλματα μπορούν να απομακρυνθούν. Είναι προφανές ότι σε αυτή τη περίπτωση το αποτέλεσμα μπορεί να βελτιωθεί εκτελώντας επαναλαμβανόμενες μετρήσεις και λαμβάνοντας το μέσο όρο αυτών. Παρόλα αυτά, αν το πρόβλημα στην έρευνα εντοπίζεται σε μια μεμονωμένη ζώνη διάτμησης, τότε το σφάλμα μπορεί να μειωθεί και να φτάσει έως και  $\pm 0.2\text{mm}$ .

Οι παράγοντες, οι οποίοι είτε μεμονωμένα, είτε συνδυασμός αυτών, μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία συστηματικών σφαλμάτων είναι:

- Συστηματικό σφάλμα αισθητήρα
- Μετάθεση ευαισθησίας (sensitivity drift)
- Αλλαγή διεύθυνσης (περιστροφή) αισθητήρα
- Σφάλμα προσδιορισμού βάθους
- Κλίση και καμπυλότητα σωλήνωσης

Είναι αποδεκτό ότι η διόρθωση, στα προαναφερόμενα συστηματικά σφάλματα, μπορεί να πραγματοποιηθεί στην περίπτωση κατά την οποία ο χειριστής γνωρίζει τη φύση των σφαλμάτων, διαμέσου της επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων. Σκοπός είναι να εντοπιστούν οι πηγές προέλευσης των σφαλμάτων και να γίνει η απαραίτητη διόρθωση για να επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια. Φυσικά η ακρίβεια στους υπολογισμούς εξαρτάται από τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου έργου και φυσικά από το συνολικό διαθέσιμο προϋπολογισμό του έργου.

Όπως αναφέρεται και στον Mikkelsen (2003), η ακρίβεια στους υπολογισμούς μπορεί να κυμανθεί από  $\pm 1.24\text{mm}$  έως  $\pm 7.8\text{mm}$  για 30m μετρήσεων (60 δείγματα), λαμβάνοντας μέριμνα για την ελαχιστοποίηση και διόρθωση των συστηματικών σφαλμάτων. Πρώτο βήμα στην όλη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι η σωστή εγκατάσταση των κλισιομετρικών σωλήνων, ο έλεγχος της κατακορυφότητας της γεώτρησης και της εγκατάστασης των σωλήνων, καθώς και ο αποκλεισμός από την εγκατάσταση των «στραβών» σωλήνων. Αν κάποια από τα παραπάνω δεν μπορεί να διασφαλιστεί, τότε πρέπει να ακολουθηθούν διαδικασίες διόρθωσης των μετρήσεων, όπως αναφέρει και ο Mikkelsen (2003). Το πρόβλημα, τελικά όταν εντοπιστεί ένα σφάλμα, το οποίο μεταφράζεται σε μετατόπιση, έχει σημαντικό οικονομικό αντίκτυπο.

Στη συνέχεια παρατείνονται οι κυριότερες πηγές σφαλμάτων στις μετρήσεις:

- Βαθμονόμηση: είναι η σχέση μεταξύ του μετρούμενου μεγέθους και της τάσης εξόδου του οργάνου. Προσδιορίζει την κλίση της εξίσωσης βαθμονόμησης.,
- Μηδενική απόκλιση: είναι η τιμή της τάσης εξόδου, όταν το όργανο βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση.
- Περιστροφή του αξιμούθιου άξονα: το λάθος που προέρχεται από τη διαφορά μεταξύ του επιπέδου του άξονα του οργάνου και του επιπέδου που προσδιορίζουν οι τροχοί που είναι προσαρτημένοι στον ανιχνευτή.
- Τοποθέτηση σωλήνωσης: Βίαιη εισαγωγή σωλήνωσης μέσα στη γεώτρηση μπορεί να προκαλέσει ακόμα και το σπάσιμο της σωλήνωσης ή και το τσαλάκωμα αυτής.

- Ενεμάτωση: Έχουν παρατηρηθεί ανακρίβειες στις μετρήσεις λόγω κακής πλήρωσης της οπής με ένεμα.
- Μη σωστός χειρισμός του οργάνου: Κακός χειρισμός της βολίδας—π.χ. πιθανό κτύπημα κατά την εισαγωγή.

Η μικρότερη τιμή λάθους που επιτυγχάνεται κατά την τοποθέτηση του οργάνου και των τροχών του ανιχνευτή είναι της τάξης των  $\pm 0.5$  μοιρών. Τα λάθη αυξάνονται από τη φθορά του συστήματος των τροχών, γήρανση ηλεκτρονικών τμημάτων του οργάνου και αλλαγές της θερμοκρασίας.

Επίσης μία άλλη πηγή λάθους θεωρείται και η περιστροφή της σωλήνωσης. Όταν γίνεται η εγκατάσταση του κλισιομετρικού σωλήνα, ο προσανατολισμός των καναλιών της σωλήνωσης σε βάθος, δεν είναι απαραίτητο να είναι ο ίδιος με αυτόν κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Η προεξοχή της αλουμινένιας σωλήνωσης, μπορεί να προκαλέσει ελικοειδή εικόνα της τάξης του 1 βαθμού ανά 3m μήκος, ενώ έχουν παρατηρηθεί και παρόμοιες αποκλίσεις και σε πλαστικές σωληνώσεις. Η παρατεταμένη έκθεση της πλαστικής σωλήνωσης σε ηλιοφάνεια μπορεί να προκαλέσει περιστροφή αυτής, επομένως τα τεμάχια πρέπει πάντα να αποθηκεύονται σε σκιερό μέρος. Επίσης, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί περιστροφή και από ένα φτωχό μείγμα ενέματος κατά τη διάρκεια εγκατάστασης της σωλήνωσης.

Έτσι, όσο πιο προσεκτικά γίνονται τα βήματα για την εγκατάσταση καθώς και για τη λήψη των μετρήσεων τόσο ελαχιστοποιούνται οι πηγές των σφαλμάτων και πιο αξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα. Άρα μηδενίζονται οι αμφιβολίες για την εγκυρότητα των μετρήσεων.

#### 2.8.6.B.v Ανάλυση δεδομένων κλισιομέτρων

Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τις μετρήσεις, είναι σε ψηφιακή μορφή και γίνεται χρήση λογισμικών πακέτων, τα οποία συνοδεύουν τον κλισιομετρικό εξοπλισμό. Αυτά τα πακέτα διαφέρουν από τορπίλη σε τορπίλη. Τα αποτελέσματα επεξεργάζονται με τη χρήση λογισμικών, όπως το DMM, για την εισαγωγή των δεδομένων από τη μονάδα καταγραφής και το DIGIPRO για τη δημιουργία των διαγραμμάτων. Τα δεδομένα παρουσιάζονται υπό μορφή διαγραμμάτων της αθροιστικής μετατόπισης (cumulative displacement) σε συνάρτηση με το βάθος. Πρέπει η κλίμακα της Α και Β διεύθυνσης να είναι ίδια. Όταν τα δεδομένα δεν είναι συμβατά ή δεν είναι εφικτή η κατανόηση αυτών, τότε θα πρέπει να δίνονται υπό μορφή διαγραμμάτων: α) τα ποσά ελέγχου (checksums), β) οι σταδιακές μεταβολές (incremental displacement), οι οποίες θα αναφέρονται στις τοπικές μετατοπίσεις σε συγκεκριμένο βάθος και γ) η αθροιστική απόκλιση (cumulative deviation) της οπής από την κατακόρυφο. Εάν υπάρχει ξεκάθαρα μετατόπιση τότε θα δημιουργείται και διάγραμμα που να παρουσιάζει τη μετατόπιση σε συνάρτηση με το χρόνο, για την εύρεση του ρυθμού μεταβολής. Είναι πολύ πιο σημαντικό η εύρεση του ρυθμού μετατόπισης από την απλή πληροφορία ότι υπάρχει μετακίνηση.

Το διάγραμμα που παράγεται μετά την πρώτη επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων (raw data), είναι το διάγραμμα 'Σταδιακής Απόκλισης'. Αυτό αναπαριστά την υπολογιζόμενη απόκλιση από την κατακόρυφο (σε mm) κάθε σημείου μέτρησης. Αθροιζόμενες οι τιμές αυτών (από κάτω προς τα πάνω) μας δίνουν το διάγραμμα της 'αθροιστικής απόκλισης' το οποίο αναπαριστά το προφίλ της γεώτρησης.

Το διάγραμμα που παρουσιάζει αυτές τις μεταβολές των αποκλίσεων με αρχική θέση την κατακόρυφο, ονομάζεται διάγραμμα 'Σταδιακής μετακίνησης'. Με την άθροιση των τιμών αυτών προκύπτει το διάγραμμα 'Αθροιστικής μετακίνησης' το οποίο δείχνει μια υψηλής ευκρίνειας αναπαράσταση της μετακίνησης"

Τα ποσά ελέγχου είναι τα αθροίσματα των πρωτογενών τιμών που παράγονται κατά τις μετρήσεις στις δύο αντίθετες διευθύνσεις (Α0 και Α180 ή Β0 και Β180). Αυτές οι τιμές, ιδανικά θα έπρεπε να είναι αντίθετες και τα αθροίσματά τους μηδενικά. Λόγω όμως διάφορων λαθών που οφείλονται, είτε στο σύστημα μέτρησης (bias shift error, depth errors κτλ), είτε στην εγκατάσταση του οργάνου στο έδαφος (ακάθαρτα αυλάκια, έντονες αποκλίσεις από την κατακόρυφο κ.α.), τα checkSums δεν έχουν μηδενικές τιμές. Στην υποενότητα αυτή, δεν θα δοθούν λεπτομέρειες για το

κάθε παραγόμενο διάγραμμα, αλλά το κάθε διάγραμμα θα αναλυθεί μέσα από το πραγματικό παράδειγμα εφαρμογής όπως αναλύεται στη συνέχεια.

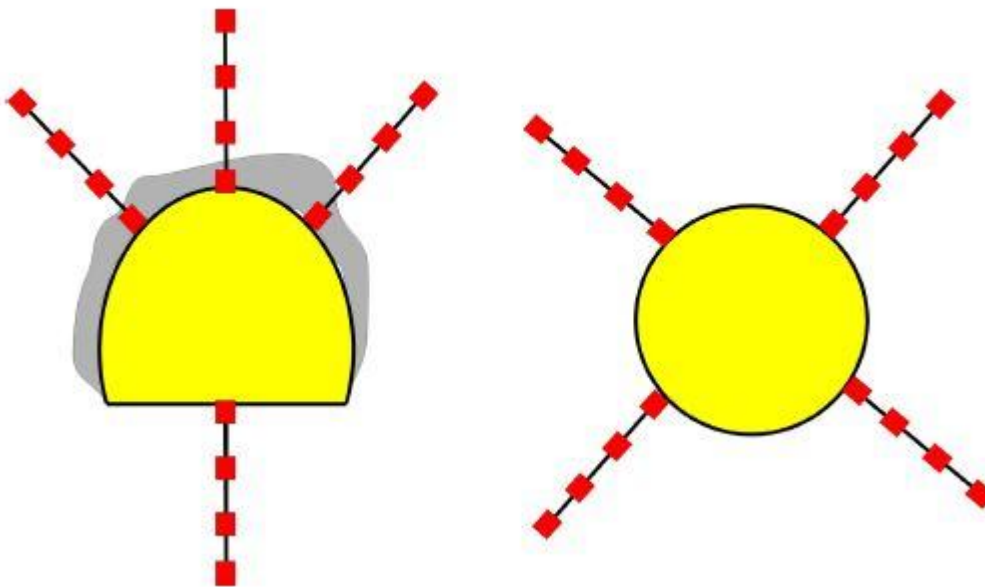
Στην ίδια σελίδα θα απεικονίζονται γραφήματα της ίδιας ομάδας μετρήσεων στις διευθύνσεις Α και Β. Κάθε γράφημα θα περιέχει το όνομα οργάνου, την κατεύθυνση Α0 σε σχέση με το βορρά, την κατάσταση με τα αποτελέσματα των προηγούμενων μετρήσεων, το τεχνικό της περιοχής και τον πίνακα των παρατηρήσεων

## 2.9 Όργανα μέτρησης παραμορφώσεων σε διάφορες κατευθύνσεις

Το συχνότερο απαντώμενο όργανο μέτρησης παραμόρφωσης είναι το **μηκυνσιόμετρο** και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση παραμορφώσεων σε διάφορες κατευθύνσεις.

### 2.9.1 Μηκυνσιόμετρα

Τα μηκυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση καθίζησης, ανύψωσης, σύγκλισης και πλευρικής μετακίνησης σε εδαφικές αποθέσεις, λόγω στερεοποίησης εδαφικού υλικού ή μετά από άντληση. Επίσης, χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση συγκλίσεων στα πλευρικά τοιχώματα των σηράγγων (σχήμα).



Σχήμα . Καταγραφή ευστάθειας και σύγκλισης σηράγγων.

Πολλές φορές τα όργανα αυτά καλούνται και μηκυνσιόμετρα γεώτρησης αφού η εγκατάστασή τους γίνεται μέσα σε γεώτρηση. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες οργάνων: Τα μηκυνσιόμετρα ανίχνευσης χρησιμοποιούνται κυρίως σε εδάφη όπου αναμένονται μεγάλες καθιζήσεις. Η ακρίβεια του οργάνου είναι 1χιλ. ανά σημείο κατά μήκος του σωλήνα. Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του ανιχνευτή τα μηκυνσιόμετρα διακρίνονται σε μαγνητικά, ηλεκτρικά και μηχανικά.

Τα μηκυνσιόμετρα τύπου ράβδου ονομάζονται και σταθερά μηκυνσιόμετρα γεώτρησης αφού μετρούν τη μετακίνηση των σταθερών σημείων αγκύρωσης σε γεώτρηση. Χρησιμοποιούνται τόσο σε βραχώδη όσο και σε μαλακά εδάφη. Παρέχουν περιορισμένο εύρος

μετρήσεων (τυπικά της τάξης των 100 έως 150χιλ.) και έχουν ακρίβεια μέτρησης της τάξης του μμ. Αποτελούνται από προεντεταμένες ή μη ράβδους. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη μέτρηση της απόστασης του σημείου αγκύρωσης στη βάση της ράβδου και του υψηλότερου σημείου της γεώτρησης. Ανάλογα με τον αριθμό των ράβδων που περιλαμβάνουν διακρίνονται σε μηκυνσιόμετρα πολλαπλών σημείων. Η μέτρηση πραγματοποιείται με μηχανικό ή ηλεκτρικό ή μαγνητικό όργανο.

#### *Μαγνητικό μηκυνσιόμετρο*

Το μαγνητικό μηκυνσιόμετρο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό μετατοπίσεων κατά μήκος κατακόρυφης γεώτρησης. Εκτός από τον προσδιορισμό σχετικών μετατοπίσεων στα διάφορα βάθη είναι δυνατός και ο προσδιορισμός της συνολικής μετατόπισης.

Η ακρίβεια του συστήματος είναι μεταξύ  $\pm 0.03$  και  $\pm 0.3$ χιλ. Όταν η μέτρηση γίνεται με γεωδαιτική ταινία η ακρίβεια είναι μόνο  $\pm 3$  έως  $\pm 5$ χιλ. Η ακρίβεια της μέτρησης δύναται να βελτιωθεί στα  $\pm 0.5$ χιλ. εάν η ταινία συνδεθεί με ένα μετρητή μετακίνησης που τοποθετείται στην κορυφή της γεώτρησης. Η διάμετρος της γεώτρησης είναι 90χιλ.

#### *Ηλεκτρικό μηκυνσιόμετρο*

Το ηλεκτρικό μηκυνσιόμετρο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των μετατοπίσεων σε διάφορα βάθη σε γεώτρηση ή επίχωμα. Η μέθοδος βασίζεται στη συμβατότητα της σύνδεσης εδάφους και σωλήνα διαμέσου του ενέματος. Επομένως η επιλογή ενέματος είναι πολύ σημαντική. Θεωρητικά θα πρέπει το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή του ενέματος και του εδάφους να είναι παρόμοια. Η μέθοδος αποδείχτηκε αποτελεσματική σε ομοιόμορφα εδάφη και για συμπίεση της τάξης του 2% του πάχους του εδαφικού στρώματος.

Η ακρίβεια του οργάνου είναι  $\pm 0.5$ χιλ. Όταν όμως χρησιμοποιείται ταινία η ακρίβεια είναι της τάξης των  $\pm 3$  έως  $\pm 5$ χιλ. Η ακρίβεια για μετρήσεις στην οριζόντια κατεύθυνση είναι της τάξης των  $\pm 3$  έως  $\pm 25$ χιλ. Η ακρίβεια αυτή είναι δυνατό να βελτιωθεί εάν τα πηνία εισόδου τοποθετηθούν σε μία ράβδο εγκατεστημένη μόνιμα στο σωλήνα η οποία δύναται να μετακινείται έτσι ώστε η θέση του πηνίου να συμπίπτει με τη θέση της αντίστοιχης πλάκας. Με τον τρόπο αυτόν η ράβδος κινείται σε μικρές αποστάσεις και είναι εφικτή ακρίβεια της τάξης του  $\pm 0.5$ χιλ.

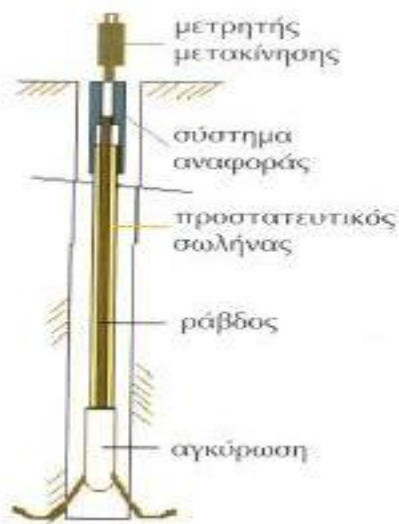
#### *Μηχανικό μηκυνσιόμετρο*

Χρησιμοποιείται για μέτρηση μετακινήσεων στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η λειτουργία του βασίζεται στη χρήση τηλεσκοπικού σωλήνα, ο οποίος έχει κατά διαστήματα ειδικά στοιχεία που επιτρέπουν την αυξομείωση του μήκους τους.

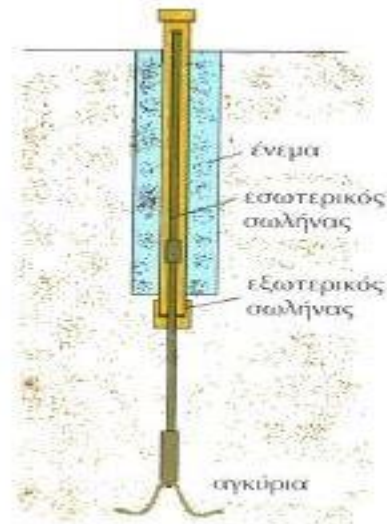
### **2.9.2 Μηκυνσιόμετρα απλού σημείου τύπου ράβδου**

Το μηκυνσιόμετρο απλού σημείου ανήκει στην κατηγορία μηκυνσιομέτρων τύπου ράβδου. Ονομάζεται και σταθερό μηκυνσιόμετρο καθώς δεν απαιτείται η χρήση ανιχνευτή κατά μήκος του άξονα της γεώτρησης κατά τη λειτουργία του. Χρησιμοποιείται για την καταγραφή μικρών μετακινήσεων σε υπόγειες εκσκαφές ή πρηνή σε έδαφος ή βράχο και είναι κατάλληλο για μήκη μέχρι και 90m. Το πλέον συνήθες μηκυνσιόμετρο απλού σημείου είναι το Borros point (σχήματα). Αποτελείται από μία βάση που περιλαμβάνει τρία άγγιστρα και στηρίζει εσωτερικό σωλήνα διαμέτρου 6.25χιλ., ο οποίος περιβάλλεται από εξωτερικό σωλήνα διαμέτρου 25,4χιλ.





Σχήμα Μηκυσιόμετρο απλού Σημείου (Γεωργιαννού, 2000).



Σχήμα Μηκυσιόμετρο σημείου (Borros point) (Γεωργιαννού, 2000).

Πρόκειται για ένα όργανο του οποίου η εγκατάσταση είναι απλή και οικονομική και η καταγραφή μπορεί να γίνει για μεγάλο χρονικό διάστημα. Κυρίως χρησιμοποιείται σε μαλακά εδάφη.

### 2.9.3 Μηκυσιόμετρο πολλαπλών σημείων τύπου ράβδου

Ενώ το μηκυσιόμετρο απλού σημείου προσδιορίζει τη μετατόπιση ενός σημείου μέσα στη γεώτρηση, το μηκυσιόμετρο πολλαπλών σημείων αποτελείται από πολλές ράβδους (έως και 6) τοποθετημένες στην ίδια γεώτρηση και καταγράφει τη μετατόπιση πολλών σημείων και άρα μπορεί να δωθούν πληροφορίες για διαφορετικές ζώνες ενδιαφέροντος.

Το μηκυσιόμετρο πολλαπλών σημείων αποτελείται από 6 ή λιγότερες αγκυρώσεις και ράβδους και ένα σύστημα αναφοράς. Οι αγκυρώσεις γίνονται συνήθως σε σημεία όπου αλλάζει η στρωματογραφία του εδάφους. Η μέτρηση της μετατόπισης γίνεται από τα όργανα καταγραφής παραμορφώσεων. Τα μηκυσιόμετρα πολλαπλών σημείων προσδιορίζουν εκτός από τη συνολική μετακίνηση, τη σχετική μετακίνηση των αγκυρώσεων και την κατανομή των μετακινήσεων ως προς το βάθος.

Στα μηκυσιόμετρα τύπου ράβδου, η ράβδος διατηρείται τεταμένη. Αυτό απαιτείται σε γεωτρήσεις μεγάλου βάθους όπου η τριβή μεταξύ της ράβδου και του προστατευτικού σωλήνα είναι σημαντική. Ένας ενσωματωμένος μηχανισμός στο σύστημα αναφοράς διατηρεί τη ράβδο τεταμένη μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τις δυνάμεις τριβής. Η παρουσία λιπαντικού μεταξύ ράβδου και προστατευτικού σωλήνα δύναται να μειώσει τις δυνάμεις τριβής και ταυτόχρονα να ελαττώσει τον κίνδυνο διάβρωσης ή βλάβης σε συνθήκες παγετού.

Όταν η ράβδος δεν είναι τεταμένη, το μήκος της δεν πρέπει να ξεπερνά τα 30m στην περίπτωση ράβδων από ινώδες γυαλί ή τα 50m στην περίπτωση των χαλύβδινων ράβδων. Για αυτά τα μήκη, η εγκατάσταση είναι απλή και το κόστος χαμηλό. Αντίθετα στην περίπτωση τεταμένης ράβδου απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος και κόστος εγκατάστασης. Όμως η τεταμένη ράβδος μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιαδήποτε κατεύθυνση και εξασφαλίζει τη λειτουργία του οργάνου σε συνθήκες θλίψης και εφελκυσμού.

Οι ράβδοι είναι από ινώδες γυαλί ή αλουμίνιο. Ανεξαρτήτως του υλικού παρουσιάζουν ανάλογη συμπεριφορά και συνθήκες εγκατάστασης. Για τις ράβδους από αλουμίνιο υπάρχει ο κίνδυνος της διάβρωσης.

Ράβδοι από ανοξείδωτο χάλυβα ή ινώδες γυαλί είναι διαθέσιμες στην αγορά. Οι ράβδοι από ανοξείδωτο χάλυβα παραδίδονται σε μήκη 3m και πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους όταν



απαιτούνται μεγαλύτερα μήκη. Οι ράβδοι από χάλυβα και αλουμίνιο διατίθενται σε μεγάλες ανέμες και χρειάζονται ευθειοποίηση στο εργοτάξιο. Ευθειοποίηση δεν είναι απαραίτητη για ράβδους από ινώδες γυαλί. Χαλύβδινες ράβδοι είναι κατάλληλες για μέτρηση καθιζήσεων αλλά παρουσιάζουν δυσκολία στην εγκατάσταση σε περιορισμένο χώρο όπως σε σήραγγες μικρής διαμέτρου. Αντίθετα οι ράβδοι από ινώδες γυαλί τοποθετούνται ευκολότερα. Η διάμετρος των ράβδων είναι 5 έως 13χιλ. Οι ράβδοι πρέπει να περιβάλλονται από προστατευτικό σωλήνα όπου τοποθετείται λιπαντικό στην περίπτωση οριζόντιων γεωτρήσεων.

Η ακρίβεια των μετρήσεων των μηκυνσιομέτρων τύπου ράβδου εξαρτάται από τη γεωδαιτική μέθοδο που υπεισέρχεται στις μετρήσεις και είναι της τάξης των +/-3χιλ. Τα μηκυνσιόμετρα και οι απαραίτητες σωληνώσεις τοποθετούνται στη γεώτρηση για εμποτισμό με ένεμα. Η αντοχή του ενέματος πρέπει να είναι παρόμοια με αυτή του εδάφους. Εάν το ένεμα είναι πολύ άκαμπτο, η αγκύρωση μπορεί να αστοχήσει στη διεπιφάνεια ενέματος/εδάφους. Επίσης, το ένεμα θα πρέπει να επιτρέπει τη μετακίνηση της αγκύρωσης με το περιβάλλον έδαφος. Οι αγκυρώσεις με χρήση ενέματος είναι κατάλληλες για εδάφη με πολλές ρωγμές και κενά.

Οι αγκυρώσεις τριών ή έξι αγκυρίων τα οποία εκτινάσσονται προς το περιβάλλον έδαφος της γεώτρησης είναι ο συχνότερος τύπος που χρησιμοποιείται σε μαλακά εδάφη. Τα αγκύρια εκτινάσσονται στη γεώτρηση με τη βοήθεια υδραυλικής πίεσης.

Σε βραχώδη εδάφη μια μεταλλική (χάλκινη) ζώνη με διπλά στεγανά τοιχώματα τοποθετείται γύρω από την αγκύρωση. Όταν υδραυλική πίεση εφαρμόζεται μέσω λαδιού στην κοιλότητα της ζώνης το μέταλλο των τοιχωμάτων διαστέλλεται και έτσι επιτυγχάνεται επαφή με το περιβάλλον έδαφος. Όταν η πίεση απομακρύνεται η κοιλότητα διατηρεί το παραμορφωμένο σχήμα της.

Οι αγκυρώσεις υδραυλικού τύπου έχουν μεγαλύτερο αρχικό κόστος, υπερτερούν όμως των αγκυρώσεων με χρήση ενέματος στο ότι δεν απαιτείται χρόνος αναμονής και επομένως η χρήση του οργάνου είναι άμεση. Η χρήση τους επίσης προτιμάται για διατρήσεις σε γωνία μεγαλύτερη από την οριζόντιο ή όταν δεν συνίσταται η χρήση ενέματος, όπως στην περίπτωση ρηγματωμένου βράχου. Ένεμα χρησιμοποιείται γύρω από τις αγκυρώσεις για την αποφυγή ροής νερού μέσα στη γεώτρηση.

#### **2.9.4 Επιφανειακά Μηκυνσιόμετρα**

Πρόκειται για όργανα μέτρησης της απόστασης μεταξύ δύο σημείων στην επιφάνεια του εδάφους ή μιας κατασκευής. Μια από τις κύριες εφαρμογές των εν λόγω οργάνων είναι η μέτρηση του πάχους των ρωγμών.

##### *Μέτρηση πάχους ρωγμών*

Υπάρχουν πολλοί μηχανικοί τρόποι προσδιορισμού του πάχους των ρωγμών όπως γυάλινες πλάκες διαστάσεων 76 mm\*25mm και πάχους 2.5mm που προσκολλώνται στην επιφάνεια της ρωγμής με εποξειδική ρητίνη. Το όργανο καταγράφει το μέγεθος και την κατεύθυνση της μετακίνησης κατά μήκος της ρωγμής. Ψαθυρό γυψοκονίαμα δύναται να αντικαταστήσει το γυαλί.

Μεταλλική ταινία ή μεταλλικός κανόνας προσδιορίζει την απόσταση δύο καρφιών, ένα σε κάθε πλευρά της ρωγμής, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η μέτρηση μπορεί να γίνει με ηλεκτρικό όργανο μέτρησης. Τα όργανα μέτρησης μπορεί να είναι διαφορικοί μετατροπείς γραμμικής μεταβολής (LVDT), διαφορικοί μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (DCDT), μετρητές χορδής μεταβλητού μήκους ή μετρητές ηλεκτρικών αντιστάσεων.

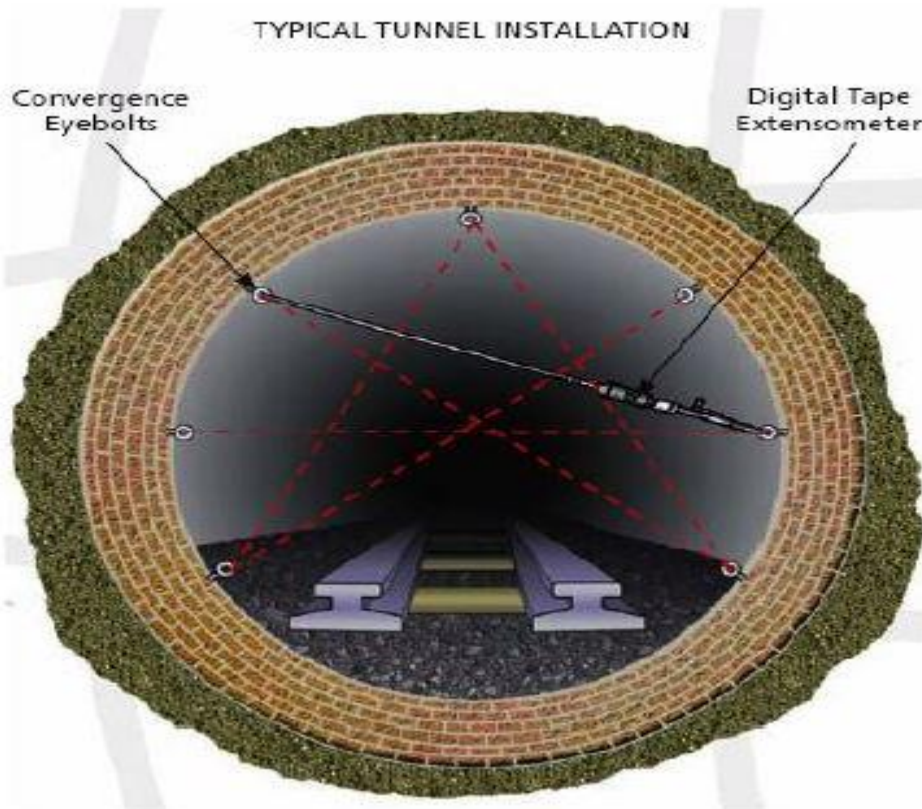


Σχήμα : Μέτρηση πάχους ρωγμής (Soil Instruments Ltd.)

Ο τρισδιάστατος μετρητής ρωγμών αποτελείται από δύο τμήματα προσαρτημένα στις παρειές της ρωγμής. Το όργανο μέτρησης τοποθετείται σε όλες τις θέσεις που έχουν προβλεφθεί στη φάση σχεδιασμού. Η σχετική απόσταση μεταξύ των δύο τμημάτων του μετρητή προσδιορίζεται σε τρεις άξονες. Μεταβολή της απόστασης αντιστοιχεί σε ανάλογη μετακίνηση της ρωγμής. Μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του οργάνου σε άλλη θέση. Μεγαλύτερο αρχικό κόστος από τα άλλα απλά όργανα

#### 2.9.4.1 Μηκυσιόμετρο τύπου ταινία

Ανήκει στην κατηγορία οργάνων που μετρούν τη μεταβολή της απόστασης μεταξύ δύο σημείων αναφοράς αγκυρωμένων στις παρειές μιας εκσκαφής. Τυπικές εφαρμογές αφορούν τον υπολογισμό των μετακινήσεων των παρειών μιας σήραγγας και τον υπολογισμό σύγκλισης σε υπόγεια έργα. (σχήμα ).



Σχήμα: Σύγκλιση σήραγγας (Soil Instruments Ltd).

Το μηκυνσιόμετρο τύπου ταινίας αποτελείται από μεταλλική ταινία με οπές κάθε 50mm. Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξης των  $\pm 0.13\text{mm}$  για απόσταση 10 μέτρων. Η ακρίβεια μειώνεται με την αύξηση της απόστασης. Η μέγιστη τιμή της απόστασης είναι περίπου 60m. Η χρήση της είναι ευρεία διαδεδομένη διότι το όργανο είναι μεγάλης αντοχής, ιδιαίτερα εύχρηστο και τα αποτελέσματα άμεσα και αξιόπιστα.

#### 2.9.4.2 Επιμηκυνσιόμετρα

Τα επιμηκυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των σχετικών μετακινήσεων συγκεκριμένων σημείων εντός του εδάφους. Μια τυπική συσκευή επιμηκυνσιόμετρου αποτελείται από τρία βασικά μέρη, την κεφαλή αγκύρωσης, το στοιχείο μετάδοσης των μικρομετακινήσεων και το άκρο του επιμηκυνσιόμετρου με το στοιχείο μέτρησης. Η ερμηνεία των μετρήσεων των επιμηκυνσιόμετρων και εφόσον αυτή συσχετισθεί με αποτελέσματα των συγκλίσεων, παρέχει στοιχεία σχετικά με τη ζώνη χαλάρωσης του εδάφους.

Μια τυπική διάταξη επιμηκυνσιόμετρου δίδεται στο παρακάτω σχήμα :

- Κεφαλή αγκύρωσης, στερεωμένη με ένεμα
- Κώνος αγκύρωσης
- Ράβδοι επιμήκυνσης εντός πλαστικού προστατευτικού σωλήνα, με καπάκι ασφαλείας στην άκρη του αγκυρίου.
- Κεφαλή επιμηκυνσιόμετρου με οδηγούς ράβδων και αγκύριο για την σταθεροποίηση στο στόμιο της διάτρησης
- Μπάρα αισθητήρα και μετρητή. Υποδοχή για τοποθέτηση μετρητή.
- Μετρητής.



Σχήμα : Παρουσίαση επιμηκυνσιόμετρου (Soil Instruments Ltd).

Θα χρησιμοποιηθούν επιμηκυνσιόμετρα τριών ράβδων (3m, 6m, 9m), τα οποία θα περιλαμβάνουν αγκύρωση με σιμεντένεμα σε κάθε θέση (3m, 6m, 9m) και ράβδους τοποθετημένες σε προστατευτικό σωλήνα συνδεδεμένες με την αγκύρωση.

Για να εξασφαλιστεί η ανεξαρτησία της πάκτωσης των ραβδών προτείνεται η τοποθέτησή τους σε διαφορετικές οπές (γεωτρήσεις) οι οποίες θα διατάσσονται τριγωνομετρικά και θα απέχουν περίπου 20cm μεταξύ τους. Οι κεφαλές των ράβδων πρέπει να βρίσκονται σε κατάλληλη προστατευμένη θέση (εσοχή), έτσι ώστε να μη κινδυνεύουν από άλλες δραστηριότητες του εργοταξίου. Σε γενικές γραμμές αρκεί μικρός αριθμός οργάνων (2 σταθμοί τριών επιμηκυνσιόμετρων) για την αξιολόγηση της ζώνης χαλάρωσης, όμως είναι αναγκαία η συσχέτιση με τα αποτελέσματα των συγκλίσεων στις ίδιες θέσεις. Κάθε σταθμός θα αποτελείται από τρία

επιμηκυνσιόμετρα, ένα εκ των οποίων θα τοποθετηθεί στην κλείδα και ανά ένα στο άνω μέρος των παρειών της σήραγγας. Η τοποθέτηση θα πρέπει να γίνει σε υπερκείμενο > 10,00m και σε θέσεις αλλαγής των γεωλογικών σχηματισμών. Οσον αφορά τη συχνότητα λήψης μετρήσεων, ισχύουν όσα αναφέρθηκαν για τις μετρήσεις σύγκλισης.

Η επεξεργασία των μετρήσεων των επιμηκυνσιομέτρων θα πραγματοποιείται το συντομότερο δυνατό και σίγουρα εντός 24ώρου από τη λήψη της μετρήσεως.

Αρχικά κατασκευάζεται διάγραμμα συσχέτισης των μετακινήσεων με το χρόνο, το οποίο τηρείται ενημερωμένο με τη λήψη κάθε νέας μέτρησης. Η ερμηνεία των μετρήσεων δύναται να διευκολυνθεί θεωρώντας όχι μόνο την μετακίνηση σχετικά με το χρόνο, αλλά και το ρυθμό μεταβολής της μετακίνησης σχετικά με το χρόνο (επιτάχυνση). Η εγκατάσταση των οργάνων θα πρέπει να είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.









### 3.2 Περιγραφή του έργου :

Σύμφωνα με την μελέτη χάραξης για την παράκαμψη του αυτοκινητόδρομου του Δερβενίου ο αριστερός κλάδος του αυτοκινητόδρομου αποκλίνει από την εθνική οδό Πατρών προς το Νότο. Η σήραγγα T8 τέμνει τον παρόν λόφο στην δυτική πλευρά της κοιλάδας του ποταμού Δερβενιώτη.

Το συνολικό μήκος της σήραγγας μαζί με τα τμήματα εκσκαφής και επανεπίχωσης είναι περίπου 670 μέτρα ενώ το υπόγειο τμήμα έχει μήκος 627,5 μέτρα.

Η τυπική διατομή της σήραγγας που εξορύσσεται έχει οριστεί σύμφωνα με τα ακόλουθα έγγραφα και σχεδιασμούς :

1. προμελέτη αυτοκινητόδρομου φάση 2
2. σχετικές προδιαγραφές των σχετικών εγγράφων
  - ειδικούς όρους σύμβασης , παραχώρηση σύμβασης του αυτοκινητόδρομου Ελευσίνα έως Τσάκωνα
  - σχεδιασμό και έρευνες προδιαγραφών , παραχώρηση σύμβασης του αυτοκινητόδρομου Ελευσίνα έως Τσάκωνα.
  - Τεχνικούς όρους σύμβασης , παραχώρηση σύμβασης του αυτοκινητόδρομου Ελευσίνα έως Τσάκωνα
  - συγκεκριμένη ιδιαίτερη τεχνική προδιαγραφή
  - κοινή διαδικασία
- φάση 1 και 2 της ανάλυσης κινδύνου της νέας σήραγγας
- απλοποιημένη μελέτη για την σήραγγα T8
- προμελέτη του Η/Μ υποδομών για σήραγγες T7,T8,T11,T13A,T13B,T15
- ενεργά ρήγματα σε σχέση με τις σήραγγες.

Παρουσίαση δυτικών και ανατολικών τμημάτων εκσκαφής και επανεπίχωσης :

Δυτική εκσκαφή και Επανεπίχωση της T8 :

συνολικό μήκος 17,5 μέτρα από χ.θ. 52+877.50 – 52+895.00

Πτυχιακή Εργασία : Αλεξοπούλου Φ. Παναγιώτα, Τσαρουχάς Ι. Ιωάννης

όπου από χ.θ. 52+877.50 έως 52+882.50 είναι ο τομέας Ι και από χ.θ. 52+882.50 έως 52+895.00 είναι ο τομέας ΙΙ.

Ανατολική εκσκαφή και Επανεπίχωση της Τ8 :

συνολικό μήκος 25 μέτρα από χ.θ. 52+250.00 – 52+225.00

όπου από χ.θ. 52+250.00 έως 52+242.50 είναι ο τομέας Ι και από χ.θ. 52+242.50 έως 52+225.00 είναι ο τομέας ΙΙ.

Τα πρώτα τμήματα αυτών των κατασκευών πρόκειται να κατασκευαστούν κάτω από τα ήδη υπάρχοντα χαλύβδινα πλαίσια προυποστηρίξης . Οι κατασκευές από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που παρέχονται ακριβώς έξω από το μέτωπο εκσκαφής είναι για προστατευτικούς λόγους κατά την διάρκεια της κατασκευαστικής περιόδου (τομέας Ι ). το υπόλοιπο μήκος κατασκευάζεται στις ανοιχτές τομές και ονομάζεται τομέας ΙΙ.

Και οι δυο κατασκευές τελειώνουν σε μια λοξή διατομή η οποία γίνεται αφού κόψουμε την κορυφή του ημικυκλικού μέρους της διατομής από ένα επίπεδο με κλίση 2V:3H.

Οι επιχωματώσεις θα γίνουν με τα κατάλληλα υλικά (κοκκώδη ) με έναν μέγιστο αριθμό που δεν θα ξεπερνά την 2V:3H κλίση.

Στα πέδιλα των επιχωματώσεων τοίχοι αντιστήριξης των πρανών πρόκειται να κατασκευαστούν με εγκάρσια κατεύθυνση σύμφωνα με τον άξονα του αυτοκινητόδρομου.

Το σύστημα αποστράγγισης των κατασκευών εκσκαφής και επανεπίχωσης που ασχολείται με το νερό της βροχής , η προεξοχή της επιζώσης είναι μια συνέχεια του συστήματος αποστράγγισης της σήραγγας. Στα μέρη που έχουν κατασκευαστεί κάτω από τα προυποστηλωμένα πλαίσια οι πλαϊνοί σωλήνες αποστράγγισης Φ400 παρέχονται και στις δυο πλευρές της κατασκευής προστατευόμενοι από υλικό πλήρωσης.

Τα λήμματα του οδοστρώματος της σήραγγας ανατολικά και δυτικά είναι τα ίδια με αυτά που έχουν ήδη παρουσιαστεί στο υπόγειο κομμάτι του τελικού σχεδιασμού της σήραγγας. Το σύστημα στο δυτικό cut and cover τελειώνει στη δεξαμενή κατακράτησης που επρόκειτο να κατασκευαστεί ακριβώς έξω από την πύλη.

### 3.3 Βασικά χαρακτηριστικά:

#### 3.3.1 Τυπική διατομή

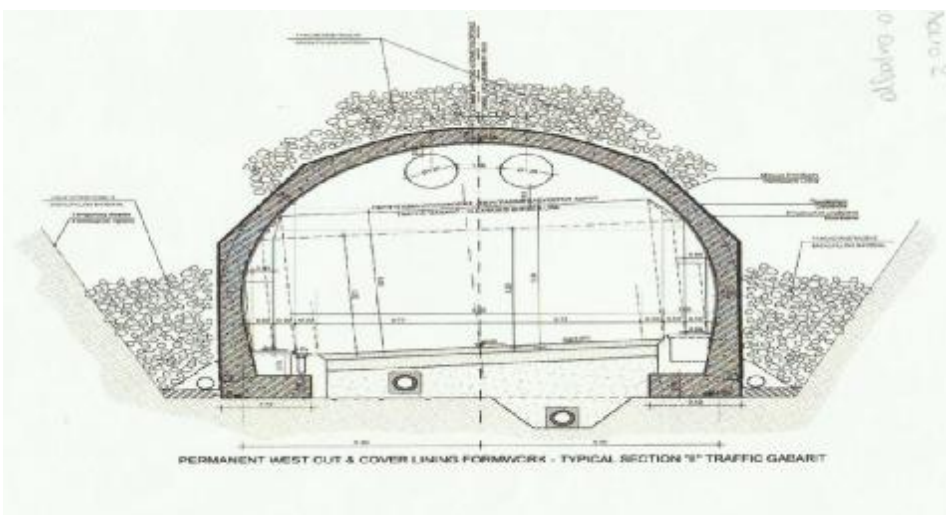
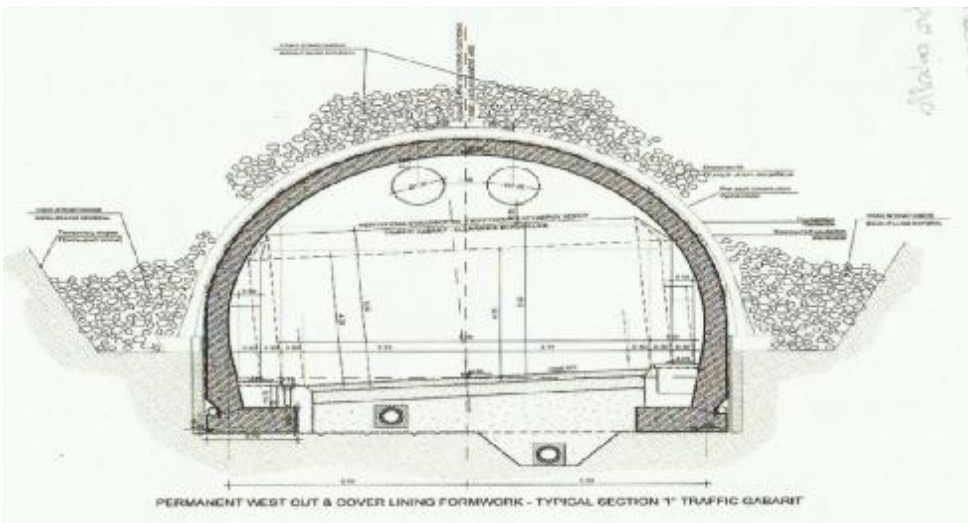
- πλάτος οδοστρώματος 8,5 μέτρα το οποίο αποτελείται από δυο λωρίδες κυκλοφορίας ανοίγματος 3,5 μέτρα και αντερείσματα οδού 2\*0,5 μέτρα
- κατακόρυφο ύψος πάνω από τη λωρίδα κυκλοφορίας ίσο με 5 μέτρα.
- Πεζοδρόμια με ελάχιστο πλάτος 1 μέτρο και κατακόρυφη απόσταση από πάνω τους 2,5 μέτρα
- το επίπεδο της στέγης είναι στο υψόμετρο +7.33 μέτρα σύμφωνα με το υψόμετρο της ερυθράς. Έτσι παρέχεται ένα ελεύθερο τμήμα για την εγκατάσταση αεριωθούμενων ανεμιστήρων εξαερισμού ή αλλού CBM με μέγιστο κατακόρυφο ύψος 2.3 μέτρα.
- Το μέγιστο καθαρό άνοιγμα των τμημάτων είναι 11 μέτρα ενώ το σχετικό ύψος 9 μέτρα.
- Η διαμήκης κλίση της ερυθράς της σήραγγας είναι 0.0169 σε όλο της το μήκος ενώ η πολυγωνική κλίση είναι ίση με - 0.0169. Η επίκλιση κυμαίνεται από 2,5% έως η αντίστροφη 5,5% έως -6,5%.
- ένα τμήμα από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 400 μέτρων λαμβάνεται υπόψη για τάξη υποστηρίξεων C<sub>iv</sub> και C<sub>v</sub> και άλλο ένα 350 μέτρων για C<sub>iii</sub> ( τάξη σκυροδέματος C30/37 )
- Η σήραγγα έχει μια μόνιμη επίκλιση με ενισχυμένα πέδιλα και στις δυο πλευρές. Τα πέδιλα έχουν πλάτος 1,9 μέτρα και ύψος 0,70 μέτρα.
- Οι αγωγοί των καλωδίων έχουν σχεδιαστεί με τις ελάχιστες απαιτούμενες διαστάσεις δηλαδή με πλάτος 0,75 μέτρα και ύψος 0,70 μέτρα. Σύμφωνα με τις διατάξεις του Η/Μ χαμηλής τάσης αγωγοί καλωδίων βρίσκονται στην νότια πλευρά ενώ υψηλής τάσης στην βόρεια πλευρά κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας.
- Το μέγιστο υπερκείμενο κατά μήκος του κύριου μήκους της σήραγγας είναι περίπου 110 μέτρα.

Το μήκος του χαλύβδινου πλαισίου είναι 12,5 μέτρα. Η θέση των αρμών κατά το μήκος της σήραγγας αποφασίστηκε αφού λήφθηκε υπόψη η κατασκευαστική σειρά που είχε οριστεί από τον ανάδοχο. ( κατά μήκος χαλύβδινου πλαισίου , αρχική θέση , γεωμετρία της ευθυγράμμισης ).

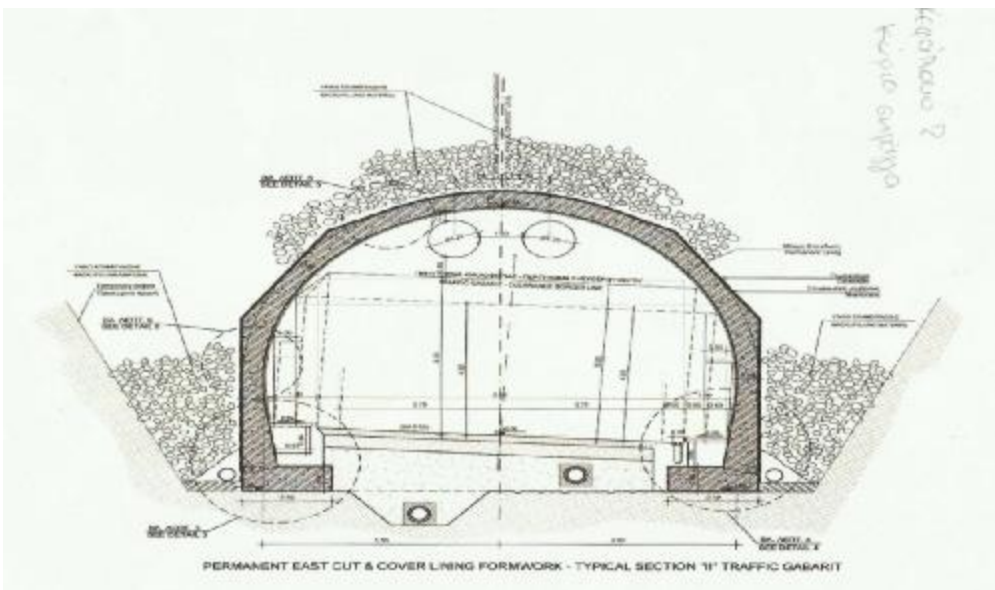
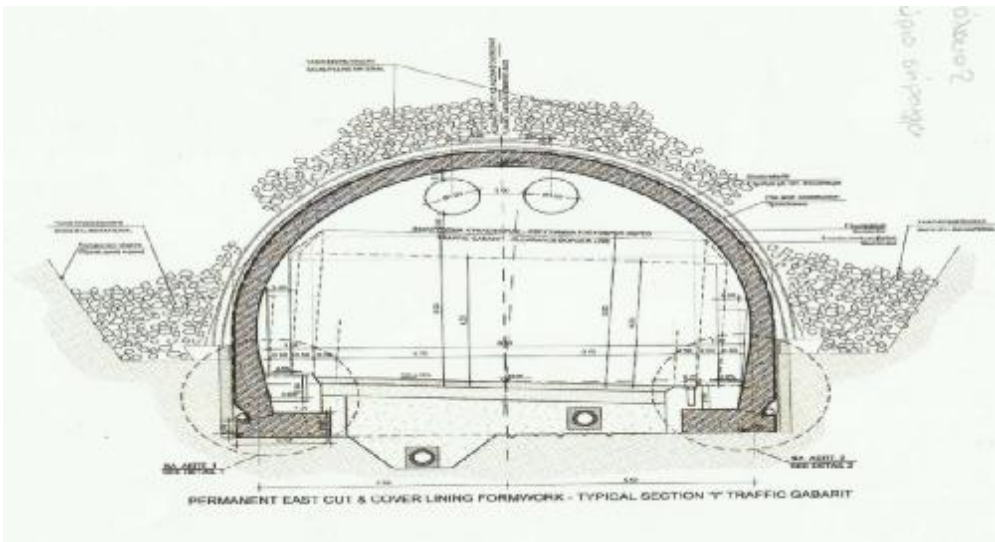
Κάθε σκυροδετημένο μήκος του κύριου κορμού της σήραγγας θα είναι λιγότερο ή ίσο με 12,5 μέτρα ενώ των πέλδων λιγότερο ή ίσο 3\*12,5 μέτρα. Μεταξύ γειτονικών πλαισίων , "κρύες" αρθρώσεις θα δημιουργηθούν εκεί που θα σταματήσει η ενίσχυση σε κάθε άρθρωση όπως φαίνεται στα σχετικά σκαριφήματα.

Στην εσωτερική πλευρά αυτής της σήραγγας σε κάθε "κρύα" άρθρωση θα σχηματίζεται μια ράβδωση ( εσοχή ). (βλέπε σχήματα)

Όπως επίσης για γεωμετρικά στοιχεία της τυπικής διατομής της σήραγγας T8 τάξης Ciii , Civ , Cv.







### 3.3.2 Εσοχές θέσεων :

Εσοχές για πυροσβεστικούς σταθμούς – οι πινάκες έκτακτης ανάγκης και έλεγχου αποχέτευσης τοποθετούνται και στις δυο πλευρές της σήραγγας.

- Εσοχής E1 για πυροσβεστικούς σταθμούς – πινάκες έκτακτης ανάγκης ( τηλεφωνικοί σταθμοί ) και αποστραγγιστικά συστήματα , κάθε 50 μέτρα περίπου , στο αριστερό μέρος σύμφωνα με την κατεύθυνση κυκλοφορίας ( ελάχιστες απαιτούμενες διαστάσεις :

μήκος 3,20 x ύψος 2,00 x βάθος 0,60 μέτρα. )

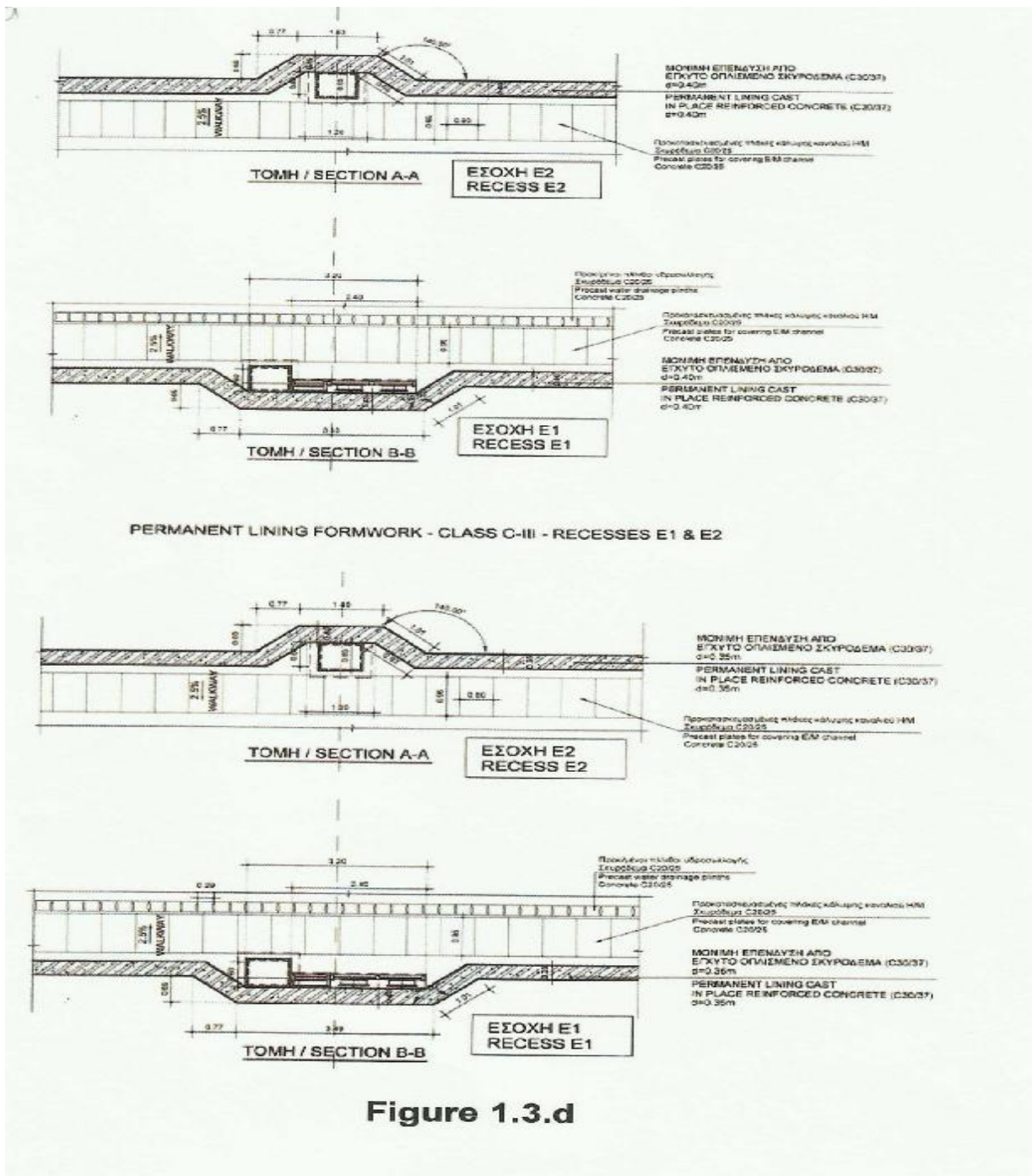
- Εσοχές E2 για ελέγχους του συστήματος αποστράγγισης , κάθε 50 μέτρα το μέγιστο , στο αριστερό μέρος σύμφωνα με την κατεύθυνση ( ελάχιστες απαιτούμενες : μήκος 1,20 x ύψος 1,50 x βάθος 0,60 μέτρα ).

- Εσοχές E1 , E2 ενώ αναφέρονται στην ίδια χ.θ είναι αντίθετες μεταξύ τους.

Η ακριβής θέση (χ.θ.) των εσοχών αποφασίστηκε αφού λήφθηκε υπόψη η κατασκευαστική σειρά που έχει οριστεί από τον ανάδοχο θα εφαρμοστεί κατά το μήκος των χαλύβδινων πλαισίων και η θέση τους κατά μήκος της σήραγγας. Σύμφωνα με αυτές τις θέσεις των αρμών συστολής , οι εσοχές βρίσκονται στο μέσο μήκος ενός χαλύβδινου πλαισίου ( στη μέση των 12,5 μέτρων περίπου ) κρατώντας την απόσταση ανάμεσα στις εσοχές περίπου στα 50 μέτρα. Με αυτόν τον κανονισμό , 13 x E1 εσοχές ( πυροσβεστικοί σταθμοί – πινάκες έκτακτης ανάγκης και έλεγχου ) τοποθετούνται στο βόρειο τμήμα του υπόγειου μέρους της σήραγγας T8.

Για τα γιατρικά στοιχεία του τομέα στην περιοχή των εσοχών στην σήραγγα T8 , τάξεις C-iii , C-iv , C-v

Σύμφωνα με τις οδηγίες ΕΚ/54/2004 παράγραφος 2,1 Annex 1 και σύμφωνα με RABT 06 , οι σταθμοί έκτακτης ανάγκης από φωλιές , πυροσβεστήρες και τηλεφωνά έκτακτης ανάγκης προορίζονται να βρίσκονται κάθε 150 μέτρα. Στην περίπτωση που τα κεντρικά γραφεία συναινούν σε αυτήν την ρύθμιση , οι παραπάνω σταθμοί μπορούν να ακυρωθούν.



### 3.4 Άλλες Απαιτήσεις του Έργου :

Άλλες απαιτήσεις του έργου και τα στοιχεία της κατασκευής που έχουν ληφθέν υπόψη στο παρόν σχεδιασμό είναι :

A) Σύστημα στεγανοποίησης με μεμβράνη και γεωύφυσμα στο θόλο της σήραγγας ως γενική παρατήρηση , που ισχύει για τη σήραγγα T8 , θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα στοιχεία.

- Δεν είχε προβλεφτεί πίνακας νερού στην σχετική γεωλογική μελέτη
- Δεν είχε βρεθεί πίδακας νερού κατά τη διάρκεια της γεωτεχνικής έρευνας διάτρητων γεωτρήσεων ( ούτε κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της γεώτρησης , κατά τη διάρκεια των μέτρων του υδροφόρου ορίζοντα που λαμβάνονται σε μεταγενέστερα χρονικά διαστήματα)
- Δεν είχε προβλεφτεί νερό στην σχετική γεωτεχνική μελέτη.

Όλα τα παραπάνω επιβεβαιώθηκαν από το γεγονός ότι δεν παρατηρήθηκαν εισροές νερού από τη βραχώμαζα κατά τη διάρκεια της εκσκαφής του συνολικού μήκους της σήραγγας. Κατά τις εκσκαφές μέχρι σήμερα , υπήρξαν βαριές περιόδους βροχής και ακόμη καμία εισροή νερού δεν έχει παρατηρηθεί.

Με βάση τα ανωτέρω , φαίνεται ότι όλα τα γεγονότα οδηγούν σε εξέταση "ξηρών" προϋποθέσεων για αυτή τη σήραγγα , έτσι , μπορεί κατ 'εξάιρεση να αποκλίνουν από ορισμένες απαιτήσεις που αναφέρονται σε συμβατικά έγγραφα που είναι ως επί των πλείστων με βάση τις προδιαγραφές των σηράγγων όταν είναι παρόντες υδροφόροι ορίζοντες.

Εξαιτίας λοιπόν των λόγων που αναλύθηκαν προηγουμένως , φραγή ύδατος δεν παρέχεται στις αρθρώσεις κατά μήκος της περιμέτρου της υπερκατασκευής. Αντ' αυτού κάθε φύλλο μεμβράνης θα πρέπει να είναι συγκολλημένο με το επόμενο φύλλο μεμβράνης με 10 cm πάχος καλύμματος με θερμή συγκόλληση. Η ραφή της μεμβράνης θα είναι διπλή προκειμένου να διασφαλίσει τον έλεγχο της στεγανοποίησης της .

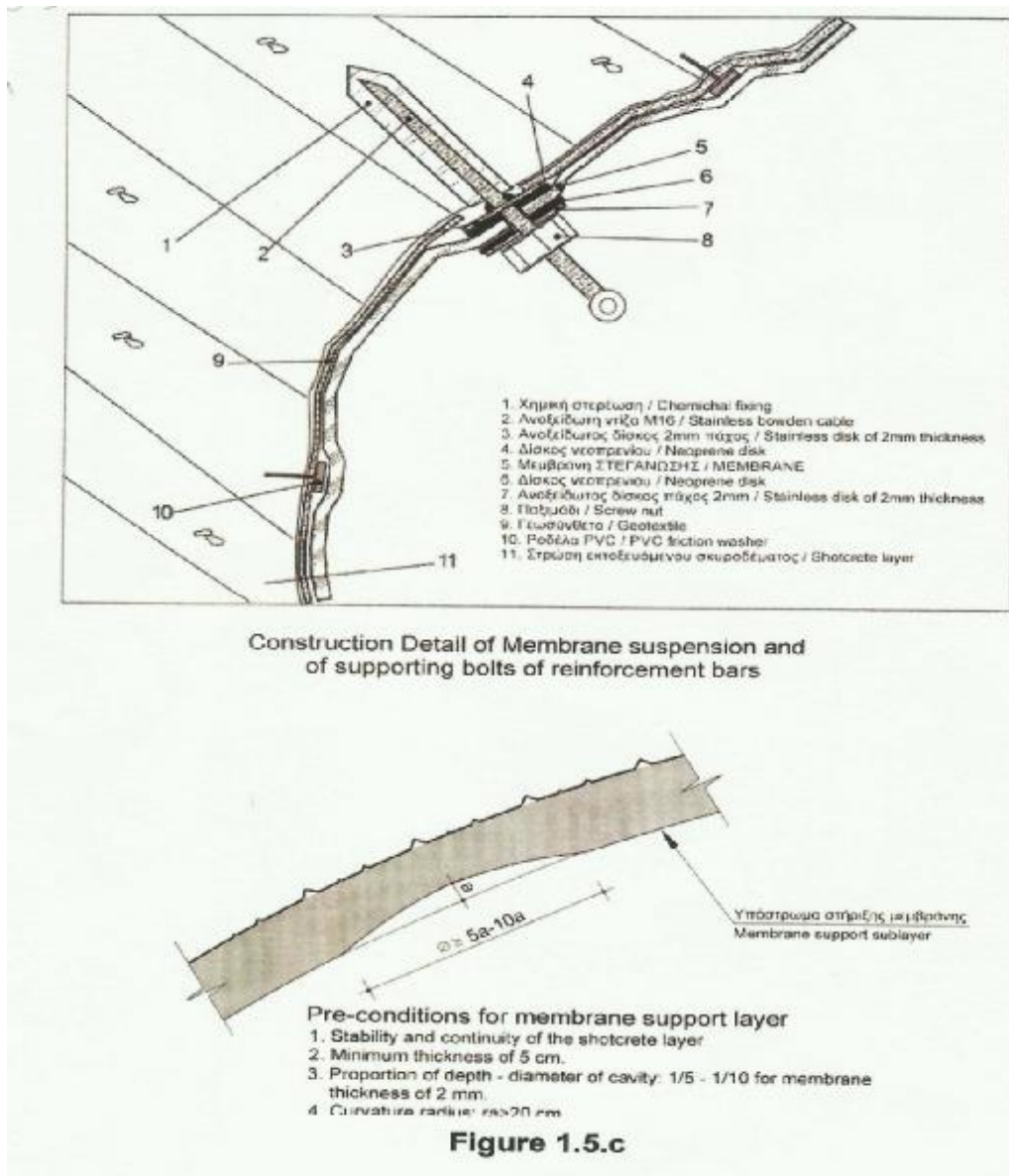
Επιπρόσθετα θα εφαρμόζεται μια λωρίδα 50 εκατοστών PVC κάθε 12,5 μέτρα και η συγκόλληση μεταξύ τους θα γίνει από ειδικά διπλά μηχανήματα ραφής. Ένας πυρήνας θα δημιουργηθεί για να ελέγχει τη συγκόλληση. Ο έλεγχος της ραφής θα πραγματοποιηθεί σύμφωνα με την δόκιμη παράγωγης μεμβράνης και όλα τα στοιχεία θα είναι καταγραφέα στον έλεγχο πρωτοκόλλων των ραφών.

Τονίζεται ότι μεγάλη προσοχή πρέπει να ληφθεί κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης του οπλισμού έτσι ώστε να μην τρυπηθεί ή τραυματιστεί η μεμβράνη.

B) Μόνιμο υπόγειο σύστημα αποστράγγισης για τη σήραγγα.

Γ) Μόνιμο σύστημα αποστράγγισης της οδού για τη σήραγγα.

Δ) Η/Μ στοιχεία επηρεάζουν την μόνιμη επένδυση από μπετόν του κύριου σώματος της σήραγγας, ενσωματώνονται στην παρούσα σχεδίαση και φαίνονται λεπτομερώς στα σχετικά σχέδια. Οι υποδομές Η/Μ εμφανίζονται στον σχεδιασμό των μονίμων δομών της σήραγγας Τ8, βασίζονται εν μέρει σε Η/Μ προμελέτη και εν μέρει στις ειδικές συμπληρωματικές κατευθυντήριες γραμμές που έδωσε το CJV κατά τις συντονιστικές συναντήσεις.



Η σήραγγα διαφυγής Τ8 διασταυρώνεται με την κύρια σήραγγα στην χ.θ. 52+569.00. είναι μια σήραγγα πεζών και έχει συνολικό μήκος περίπου 148,5 μέτρα (υπόγειο μήκος 141,1μετα)

Η περιοχή της σήραγγας διαφυγής έχει αποφασιστεί με σεβασμό στο συνολικό μήκος της κύριας σήραγγας και είναι κατά προσέγγιση τοποθετημένη στο μέσο του μήκους της σήραγγας. Η στάθμη της ερυθράς στη διασταύρωση με τον άξονα της κύριας σήραγγας και τον άξονα της σήραγγας διαφυγής είναι +30.69, ενώ η υποστάθμη του πεζοδρομίου στην συγκεκριμένη τομή είναι 2,50%.

Η ρύθμιση των αρμών συστολής κατά μήκος της σήραγγας έγινε με τρόπο τέτοιο ώστε ο άξονας της σήραγγας διαφυγής να είναι στο μέσο του μήκους του χαλύβδινου πλαισίου. Έτσι οι αρμοί συστολής στη δεξιά και στην αριστερά πλευρά να είναι 6,25 μέτρα μακριά από τον άξονα της σήραγγας διαφυγής.

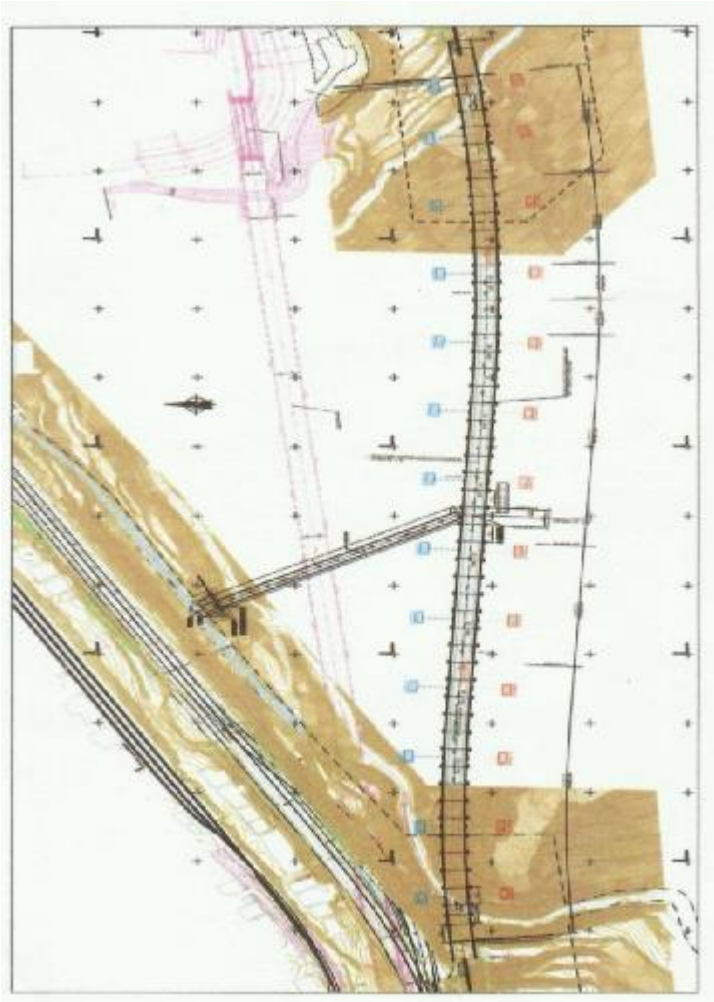


Πτυχιακή Εργασία :Αλεξοπούλου Φ. Παναγιώτα, Τσαρουχάς Ι. Ιωάννης

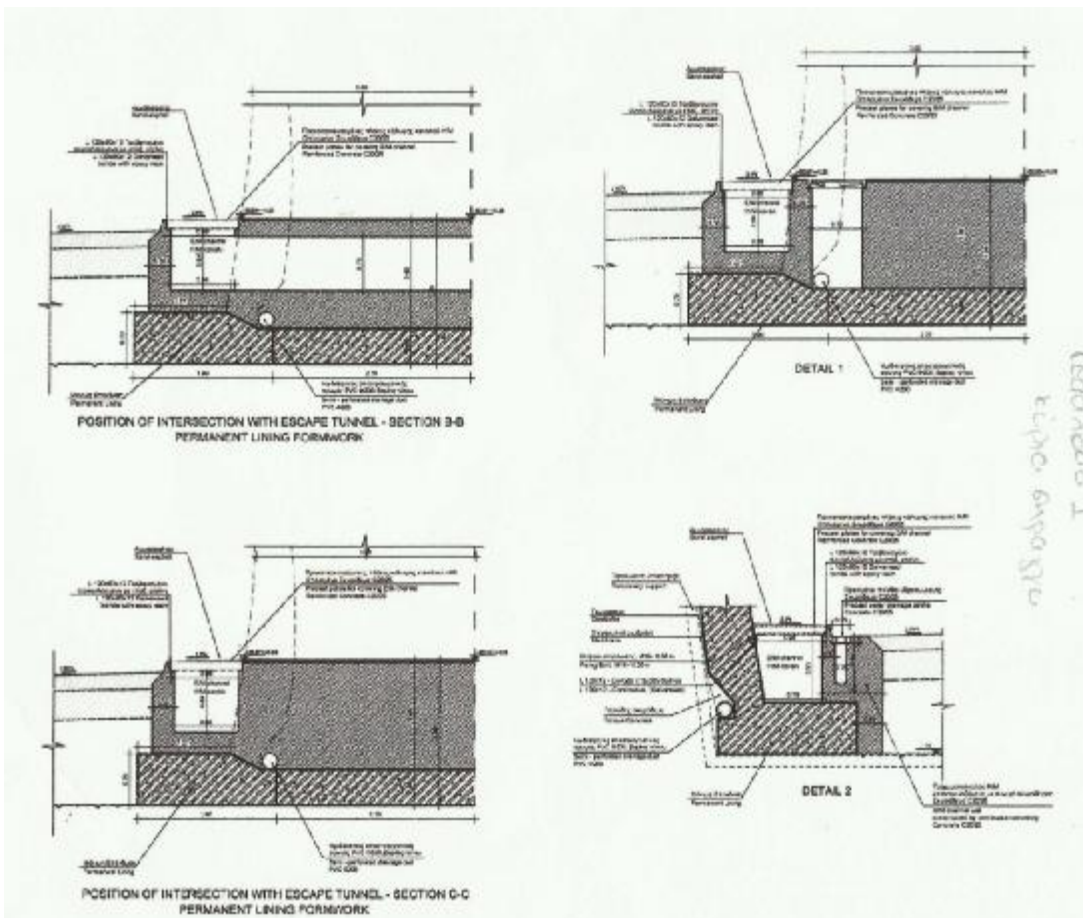
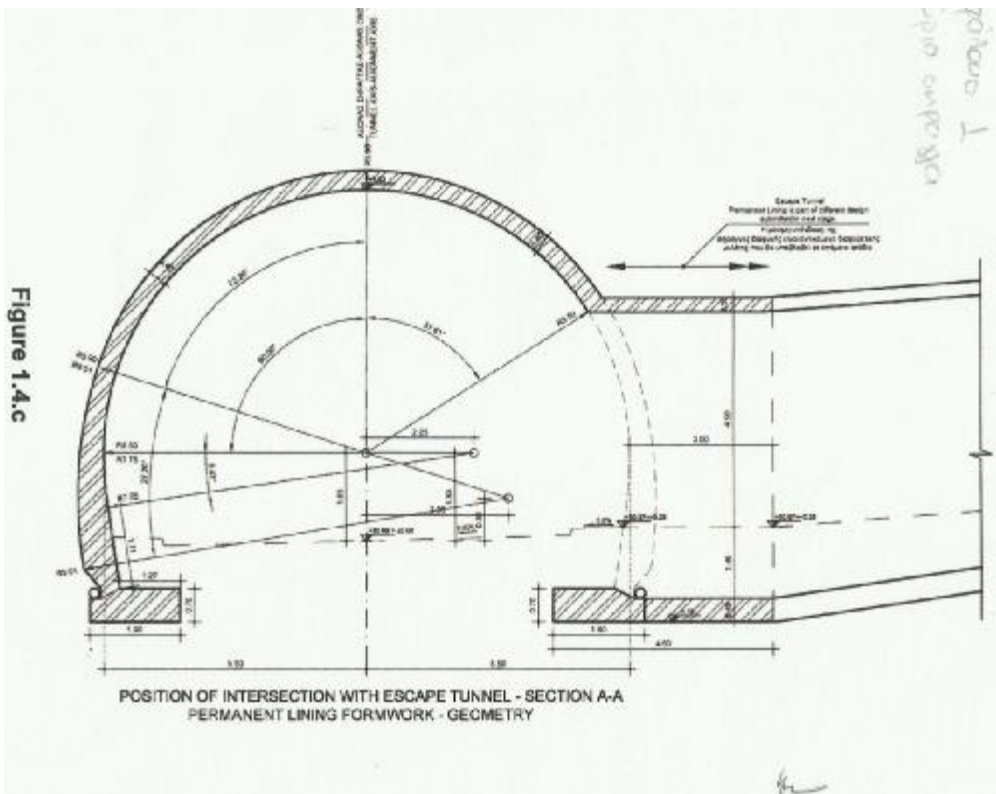
Η σήραγγα διαφυγής T8 σχηματίστηκε από καθέτους τοίχους περίπου 3,50 μέτρων ύψος και εσωτερική ακτίνα στέψης 2,5 μέτρα.

Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας διαφυγής παρουσιάζονται στις παρακάτω σελίδες :

Όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά ( σκυρόδεμα , υδραυλικά , Η/Μ ) έχουν συμπεριληφθει στον υπολογισμό του σχεδιασμού της περιοχής της διασταύρωσης.





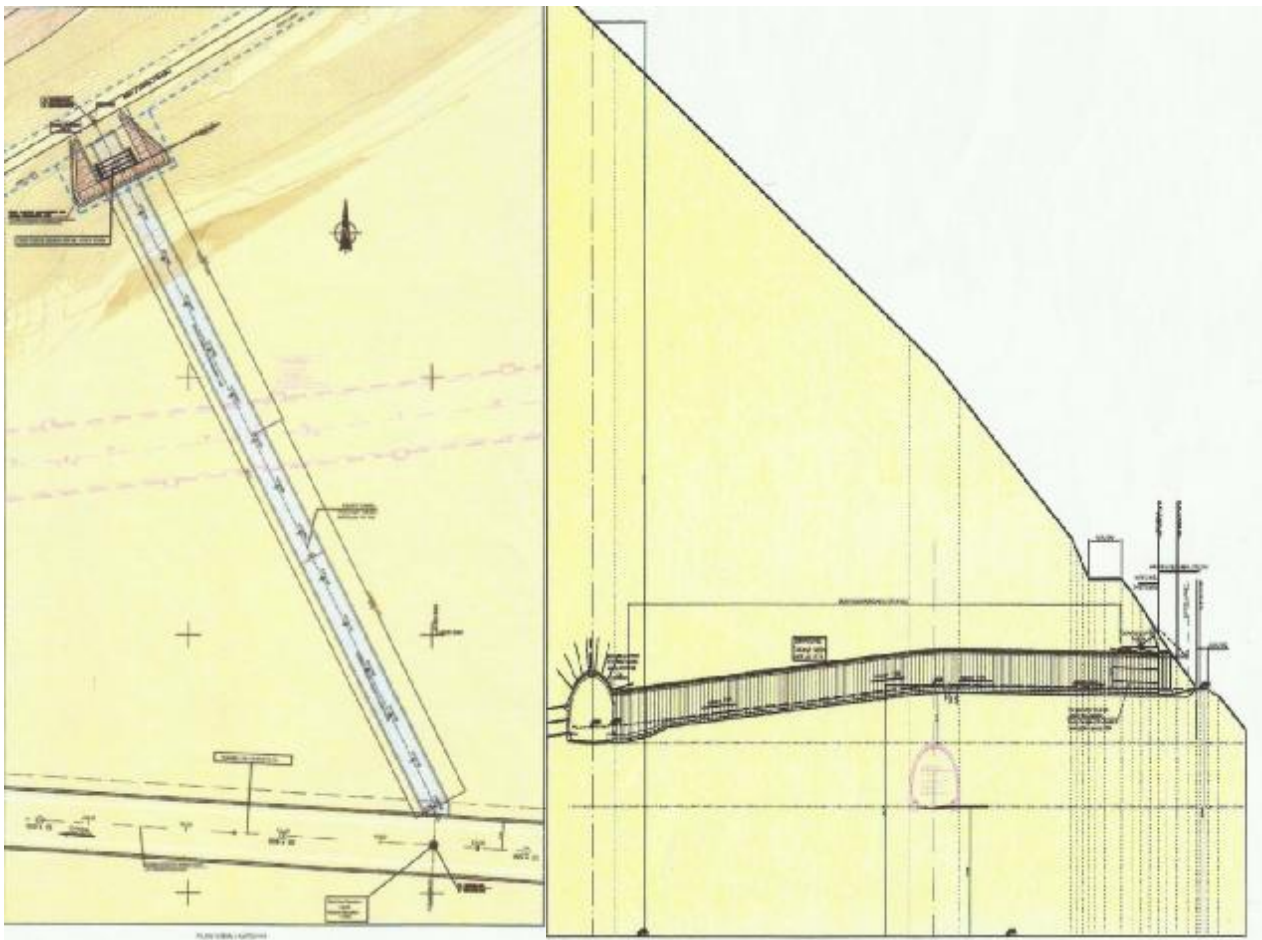


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΣΗΡΑΓΓΑ ΔΙΑΦΥΓΗΣ T8

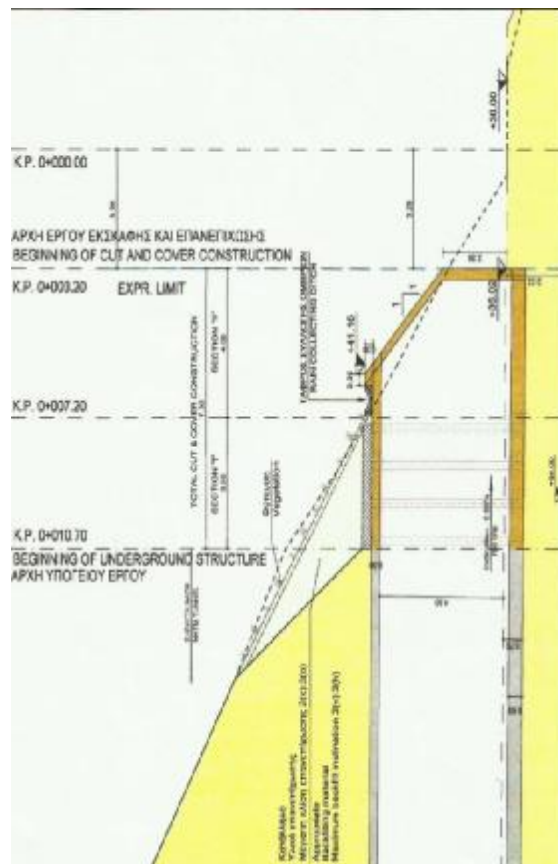
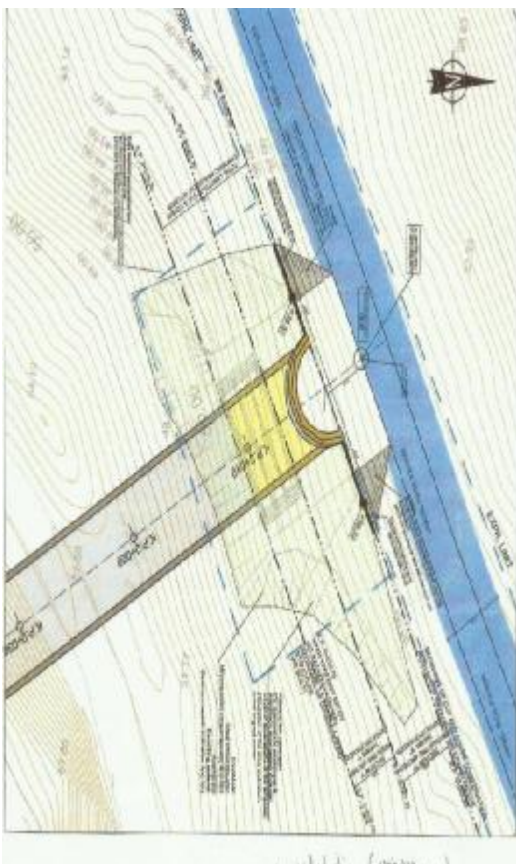
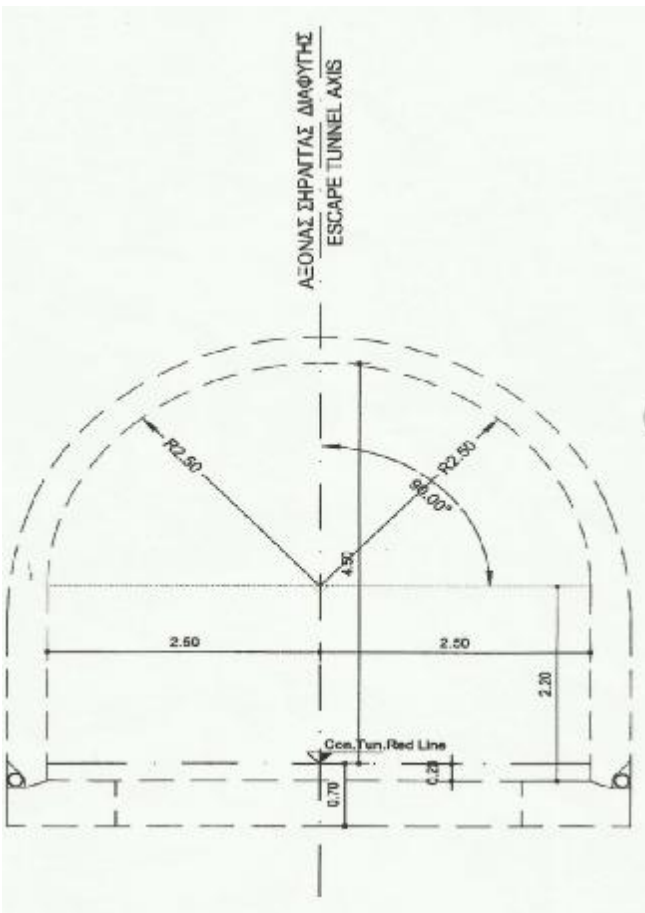
### 4.1 Γενικά χαρακτηριστικά :

Η σήραγγα διαφυγής T8 , για πεζούς , αποτελεί μια διατομή της κύριας σήραγγας αυτοκινητόδρομου T8 στην χ.θ. 52+569.00. Είναι σήραγγα μονής οπής με συνολικό μήκος NATM και cut and cover 148,5 μέτρα περίπου ( χ.θ. 0+003,53 – 0+152,05 ), από τα όποια τα 7,5 μέτρα είναι το μήκος της εκσκαφής και επανεπίχωσης με διαμήκη κλίση 0,98 % . Η αρχή της υπόγειας κατασκευής βρίσκεται στην χ.θ. 0+011,00 ( μετριέται από τον άξονα της σήραγγας διαφυγής ) ενώ το υπόγειο μέρος είναι 139,29 μέτρα. Η σήραγγα αυτή εξυπηρετεί την ανάγκη για μια έξοδο κίνδυνου της σήραγγας T8 και χαρακτηρίζεται ως σήραγγα διαφυγής πεζών η οποία καταλήγει σε μια παράπλευρη υπηρεσιακή οδό SR36R πλάτους 4,5 μέτρα.

(για κάτοψη και κατά μήκος τομή βλέπε σχήμα 1 και 2 )









## 4.2 Μια σύντομη περιγραφή του έργου :

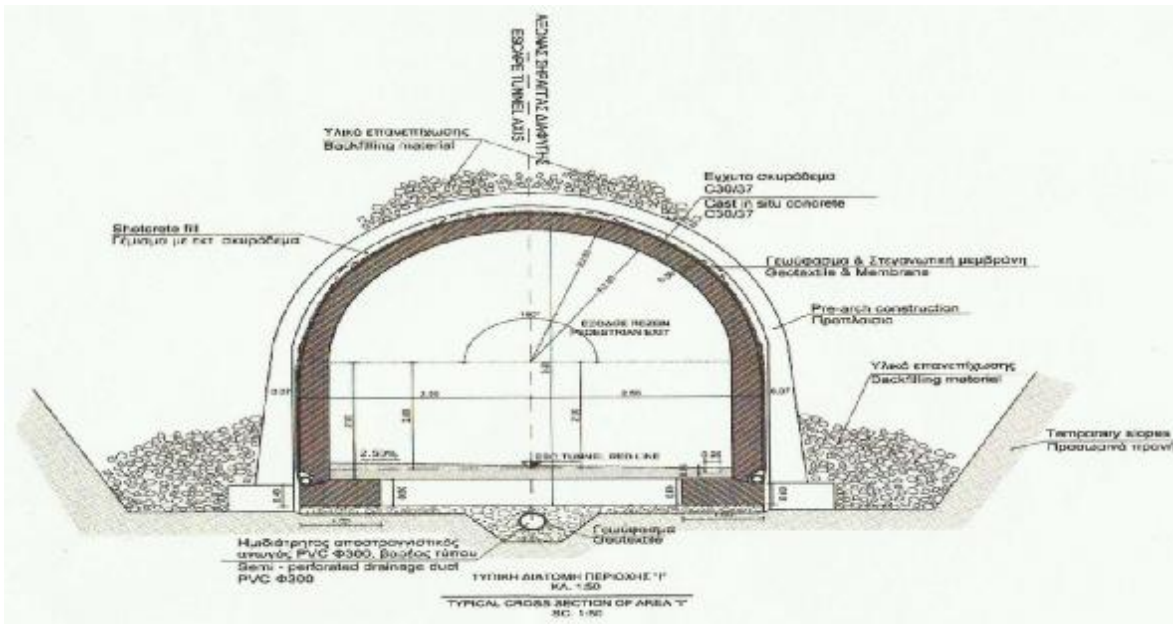
Για το τμήμα εκσκαφής και επανεπίχωσης

Συνολικό μήκος από χ.θ. 0+003,20 έως 0+010,70 ( συνολικό μήκος 7,5 μέτρα ). Όπου από την χ.θ. 0+010,70 έως 0+007,20 ονομάζεται "τομέας 1" και από την χ.θ. 0+007,20 έως 0+003,20 ονομάζεται "τομέας 2"

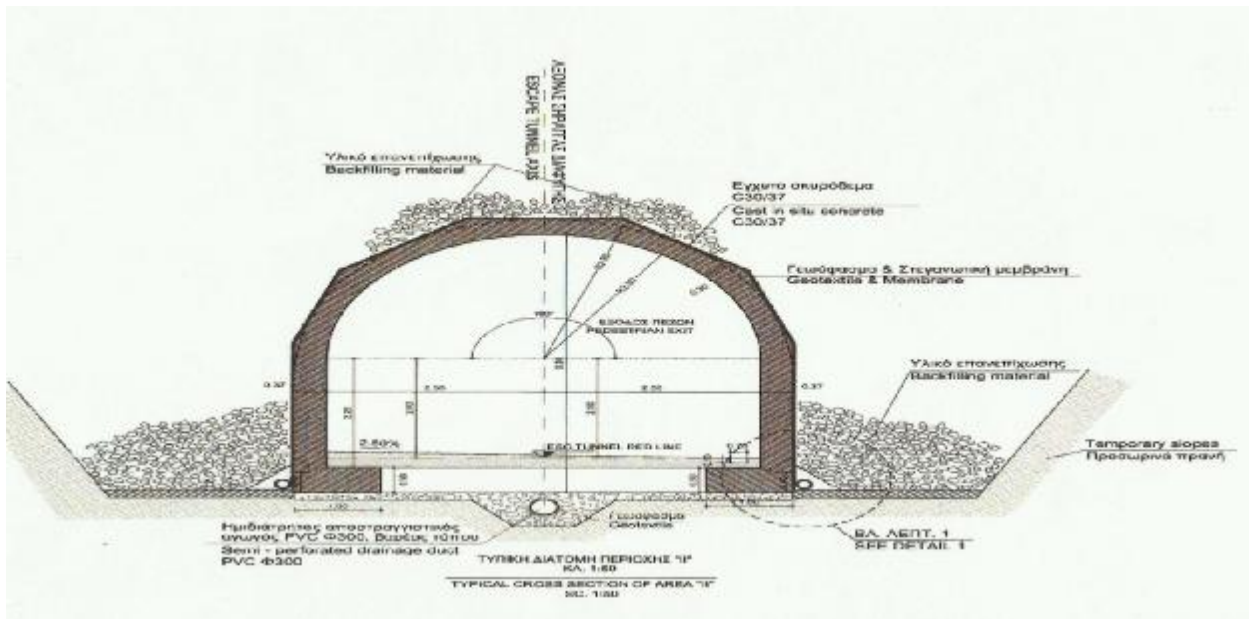
Η εκσκαφή και επανεπίχωση της σήραγγας διαφυγής οδηγεί σε ένα άνοιγμα , επάνω σε μια παράπλευρη υπηρεσιακή οδό SR36R πλάτους 4,5 μέτρα.

Το πρώτο μέρος της κατασκευής πρόκειται να κατασκευαστεί από κάτω από την ήδη υπάρχουσα υποστήριξη από χαλύβδινα πλαίσια ενώ το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρέχεται ακριβώς απ' έξω από το μέτωπο εκσκαφής για προστατευτικούς λόγους κατά την περίοδο κατασκευής.

(ονομάζεται τμήμα εκσκαφής και επανεπίχωσης μετώπου – τομέας 1)



Το υπόλοιπο μήκος κατασκευάζεται σε ανοικτή εκσκαφή και ονομάζεται τμήμα εκσκαφής και επανεπίχωσης μετώπου – τομέας 2.



Η κατασκευή τελειώνει σε μια κεκλιμένη διατομή – διασταύρωση , που προκύπτει μετά την κοπή του κορυφαίου ημικυκλικού μέρους του τμήματος από ένα επίπεδο με κλίση 1V:1H.

Οι επιχωματώσεις θα γίνουν με τα κατάλληλα υλικά ( κοκκώδη ) με έναν μέγιστο αριθμό που δεν θα ξεπερνά την κλίση της τάξεως 2V:3H.

Στα πέδιλα των επιχωματώσεων επρόκειτο να κατασκευαστούν τοίχοι αντιστήριξης των πρανών με κατεύθυνση εγκάρσια σύμφωνα με τον άξονα της σήραγγας διαφυγής.

Το σύστημα αποστράγγισης των κατασκευών εκσκαφής και επανεπίχωσης , που ασχολείται με το νερό της βροχής καθώς και η προεξοχή των επιχωματώσεων αποτελούν συνέχεια του συστήματος αποστράγγισης της σήραγγας διαφυγής με δυο πλευρικούς σωλήνες Φ150 και έναν κεντρικό σωλήνα Φ300. Αυτοί οι σωλήνες οδηγούν το νερό στον ανοιχτό αγροτικό δρόμο.

Η τελική σχεδίαση της περιοχής των πυλών έχει κατά κύριο λόγο βασιστεί στην αρχή της παρεχομένης βελτιωμένης αποκατάστασης της αρχικά υπάρχουσας κατάστασης μετά την ολοκλήρωση των εργασιών , σύμφωνα τόσο με τις περιβαλλοντικές , αισθητικές απαιτήσεις όσο και με τις απαιτήσεις ασφάλειας.

Στις περιοχές που επηρεάζονται από cut and cover κατασκευές η βλάστηση πρέπει να αποκατασταθεί σύμφωνα με τα σχετικά σχέδια φύτευσης χρησιμοποιώντας εγχώρια είδη φυτείας και με τον πιο φυσικό τρόπο για εναρμόνιση με το περιβάλλον.

Η επιχωμάτωση θα πραγματοποιηθεί με τα κατάλληλα ( κοκκώδη ) υλικά με μέγιστο βαθμό κλίσης που δεν ξεπερνά το 2V:3H.

Για την προστασία της επιφάνειας από τις καιρικές συνθήκες θα πρέπει να εγκατασταθεί μια κατάλληλη διάταξη για την εκμετάλλευση και την ανάπτυξη της βλάστησης. Η φύτευση θα πάρει μέρος στην επιφάνεια αυτής της διάταξης ( πράσινος τάπητας και εδαφικό στρώμα που βοηθούν την ανάπτυξη της βλάστησης ).

Στην βάση των πρανών επίχωσης επρόκειτο να κατασκευαστούν οι τοίχοι αντιστήριξης με κατεύθυνση εγκάρσια σε σχέση με τον άξονα της σήραγγας. Οι επονομαζόμενοι τοίχοι w1a και w2b στην αριστερή και στην δεξιά πλευρά της εκσκαφής και επανεπίχωσης, έχουν συνολικό ύψος



### 4.3 Βασικά χαρακτηριστικά :

**4.3.1 Τυπική διατομή.** Η τυπική διατομή της σήραγγας περιλαμβάνει κάθετα τοιχώματα ύψους 2 μέτρων ( το ύψος μετριέται πάνω από την ερυθρά ) και ακτινωτή τοξωτή στέψη μέγιστου ύψους 2,5 μέτρων. Οι τοίχοι έχουν πλάτος 0,37 μετρά και η στέψη 0,30. Οι εσωτερικές διαστάσεις της σήραγγας είναι οι ακόλουθες :

- Μέγιστο καθαρό εσωτερικό άνοιγμα 5 μέτρα ( > 2,30 ελάχιστο που απαιτείται σύμφωνα με τον ΟΜΟΕ παρ 5.43 )
- Επίπεδη στέψη σε υψόμετρο +4,50 μέτρα σύμφωνα με την ερυθρά του υψόμετρου . ( ως εκ τούτου εξωτερικό ύψος 4,5 μέτρα > 2,5 μετρά που είναι το ελάχιστο που απαιτείται σύμφωνα με τον ΟΜΟΕ παρ. 5.43 ).
- Απόσταση ερυθράς στο ανώτερο σημείο των πέλδλων θεμελίωσης 0,20 μετρά.
- Διαστάσεις πέλδλων θεμελίωσης 0,50 μέτρα ύψος x 1,0 μέτρα πλάτος
- Διαμήκης κλίση της ερυθράς της σήραγγας : από την θέση τομής με την κυρία σήραγγα μέχρι την χ.θ. 0+ 68,91 είναι 7,65 % προς την κυρία σήραγγα ( > 10 % που είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο σύμφωνα με τον ΟΜΟΕ παρ. 5.43 ) και από την χ.θ. 0+ 68,91 μέχρι την έξοδο της σήραγγας διαφυγής είναι 0.98 % προς την έξοδο ( που είναι > 0.50 που είναι το που είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο σύμφωνα με τον ΟΜΟΕ παρ. 5.43 )
- Μόνης όψης υπερήψωση 2,50 %

### 4.3.2 Το μήκος της σήραγγας διαφυγής χωρίζεται σε τρία κύρια τμήματα :

Τμήμα Α : Από την θέση τομής της κύριας σήραγγας μέχρι την χ.θ. 0+ 138,03

Τμήμα Β : Από την χ.θ. 0+ 138,03 μέχρι την χ.θ. 0+ 016,00

Τμήμα Γ : Από την 0+ 016,00 μέχρι την χ.θ. 0+ 011,00

(όλες οι χ.θ. μετριούνται στον άξονα της σήραγγας διαφυγής )

Χαρακτηριστικά κάθε τμήματος :

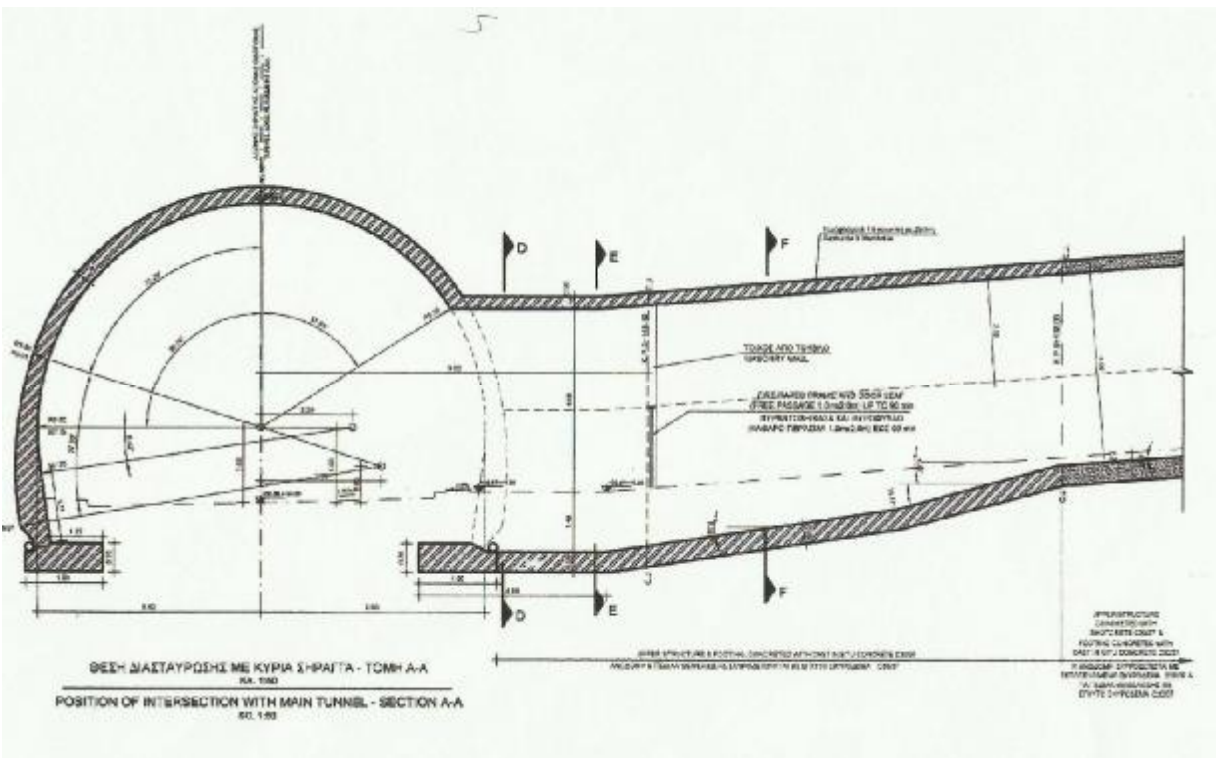
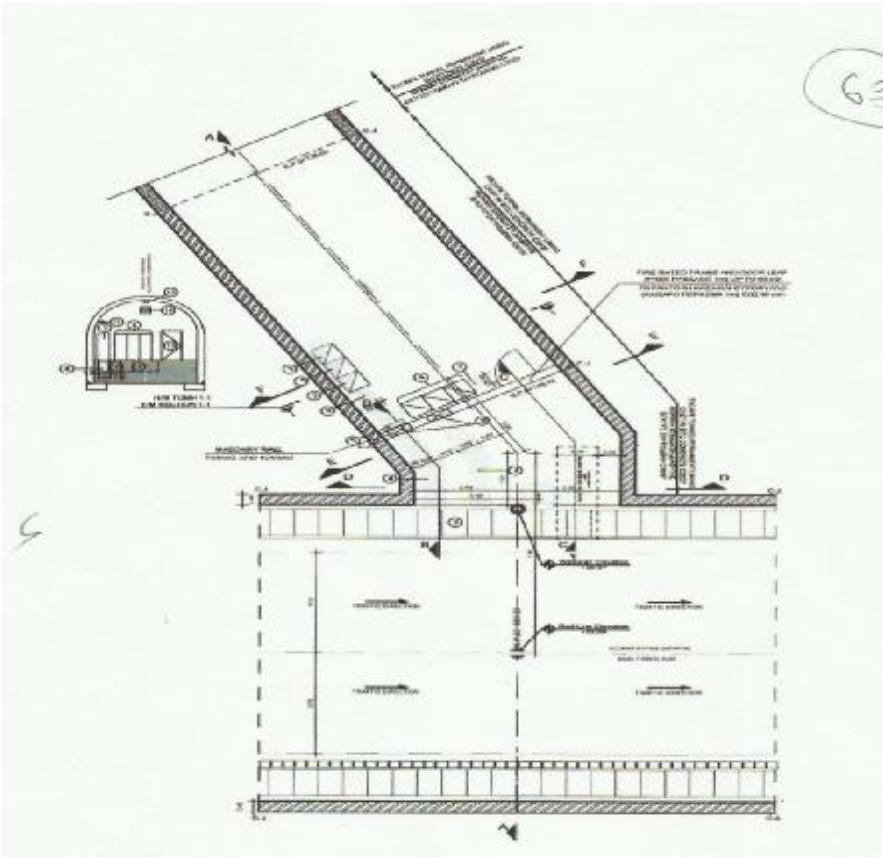
#### 4.3.2.Α Τμήμα Α :

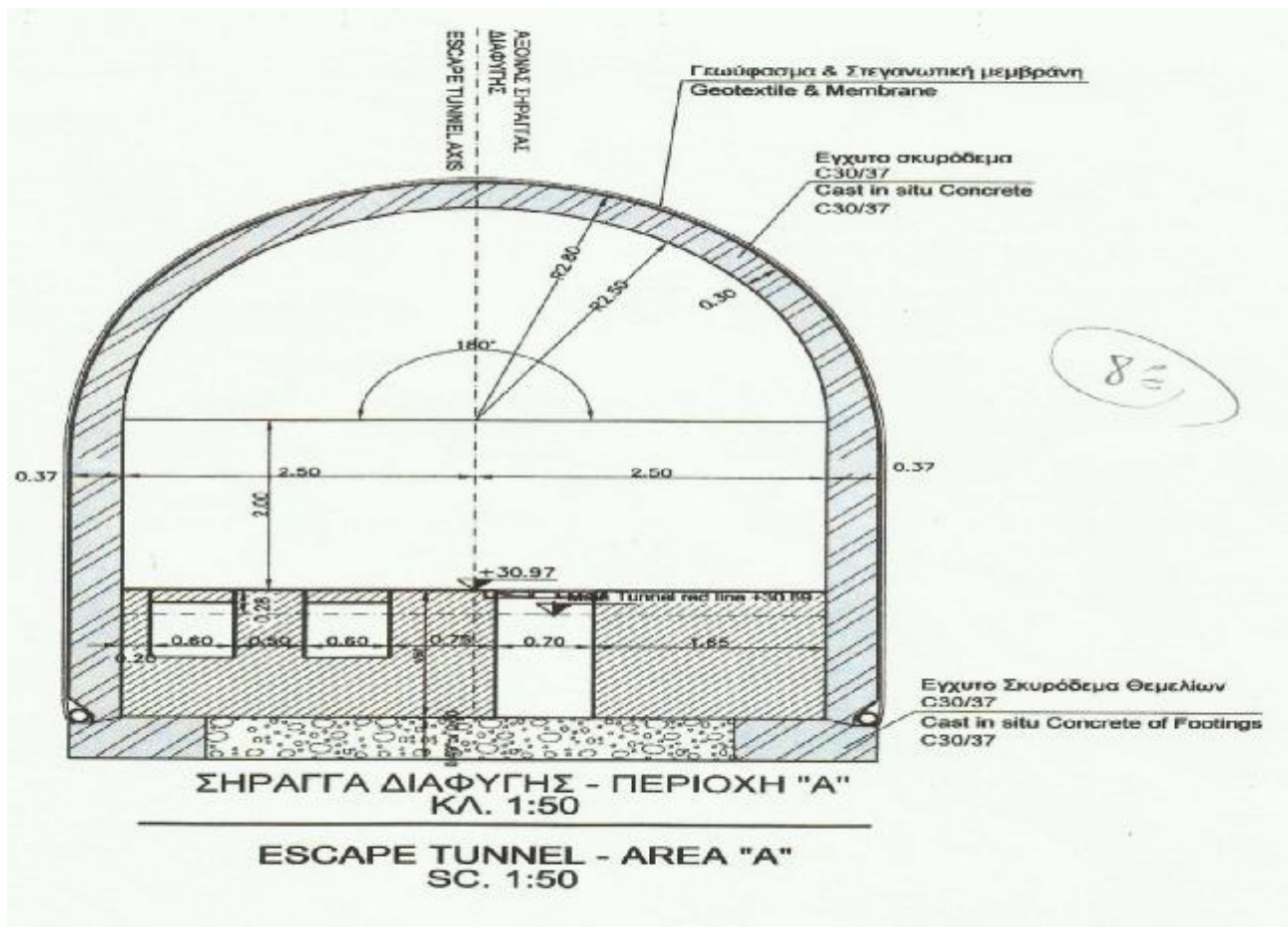
Αναφέρεται στην περιοχή της τομής με την κυρία σήραγγα Τ8. Η περιοχή αυτή επρόκειτο να κατασκευαστεί με επιτόπου έγχυση σκυροδέματος κατηγορίας C30/37 ( και τα πέδιλα). Το γεωύφυσμα και η αδιάβροχη μεμβράνη παρέχονται ως ένα μέρος του υδατοστεγούς συστήματος που χρειάζεται ώστε να προστατεύουμε τις Η/Μ εγκαταστάσεις που βρίσκονται μέσα στη σήραγγα. Τα κάθετα τοιχώματα πάνω από την ερυθρά και τη στέψη της διατομής του τμήματος Α είναι όπως έχουν περιγραφεί προηγουμένως για την τυπική διατομή. Το ύψος , ανάμεσα στην ερυθρά και το υψηλότερο επίπεδο των πέλδλων κυμαίνεται από 1,48 μέτρα μέχρι το τυπικό 0,20μέτρα , αφού σ' αυτήν την διατομή παρέχεται διάστημα για Η/Μ κανάλια κάτω από την ερυθρά. Η σήραγγα διαφυγής διαχωρίζεται από την κυρία σήραγγα με θύρα κατασκευασμένη από πυρίμαχα υλικά. Οι



ελάχιστες διαστάσεις αυτής της θύρα είναι ένα μέτρο πλάτος επί δυο μέτρα ύψος και η ελάχιστη αντοχή της στην φωτιά θα είναι της τάξεως των 90 λεπτών.

Ο τοίχος και η θύρα βρίσκονται 3 μέτρα μακριά από το κύριο τοίχωμα της σήραγγας. Το δάπεδο σύμφωνα με τον ΟΜΟΕ παρ. 5.43 πρέπει να είναι οριζόντιο.





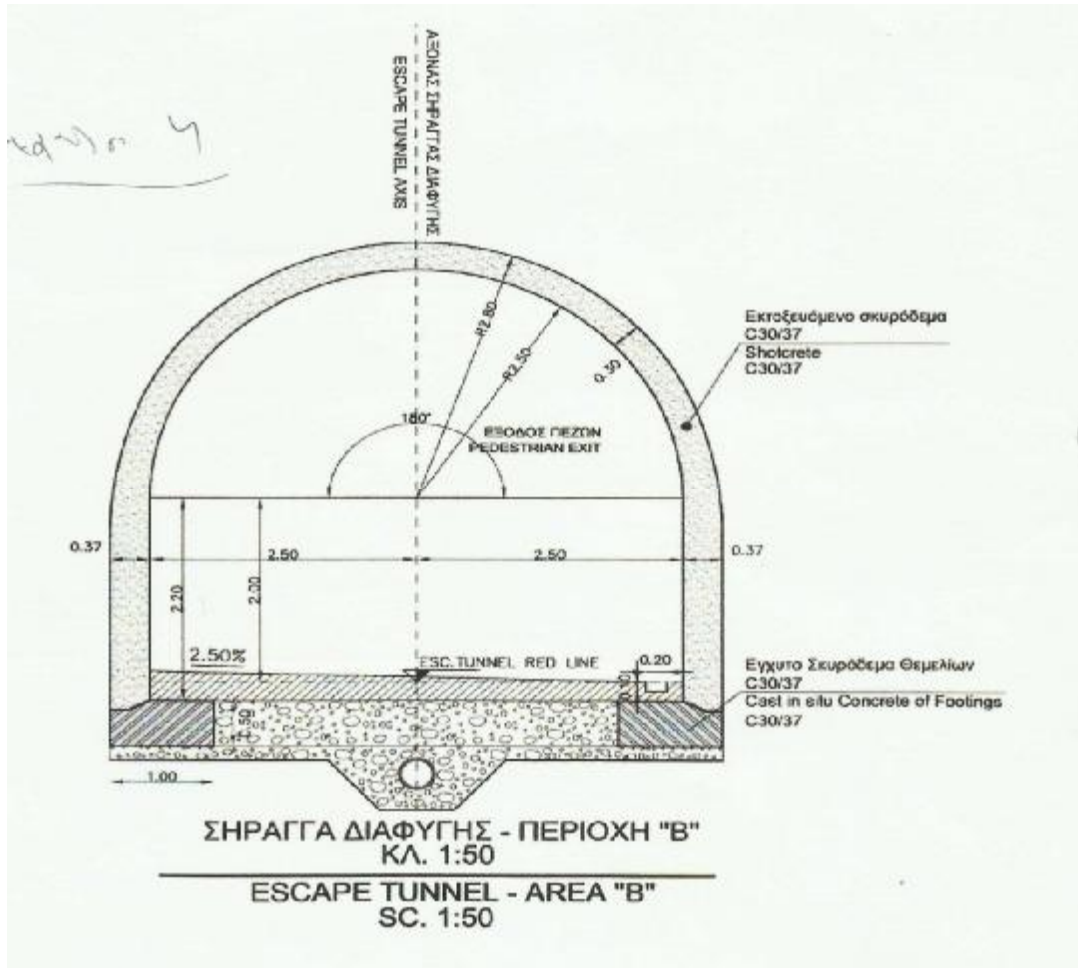
#### 4.3.2.B Τμήμα Β :

Αναφέρεται στην περιοχή από την χ.θ. 0+ 138,03 έως χ.θ. 0+ 016,00 και προσδιορίζει το τμήμα το οποίο επρόκειτο να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο κύριο τοίχωμα της σήραγγας και στη στέψη, και επιτόπου έγχυση σκυροδέματος στα πέδιλα της σήραγγας. (το σκυρόδεμα είναι κατηγορίας C30/37).

Η κατασκευή της μόνιμης επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε σήραγγες διαφυγής και σε αλλά συνοδευτικά υπόγεια έργα είναι επιτρεπτό σύμφωνα με τον ΟΜΟΕ παρ. 8.17 υπό την προϋπόθεση ότι το πάχος του σκυροδέματος δεν θα είναι λιγότερο από 20 cm, όπου η έξοδος κινδύνου είναι σχεδιασμένη τουλάχιστον 30 cm στο στέμμα και 37 cm στα τοιχώματα. Τα γεωμετρικά δεδομένα της τομής του τμήματος Β είναι όπως περιγράφει πιο πάνω στην τυπική διατομή.

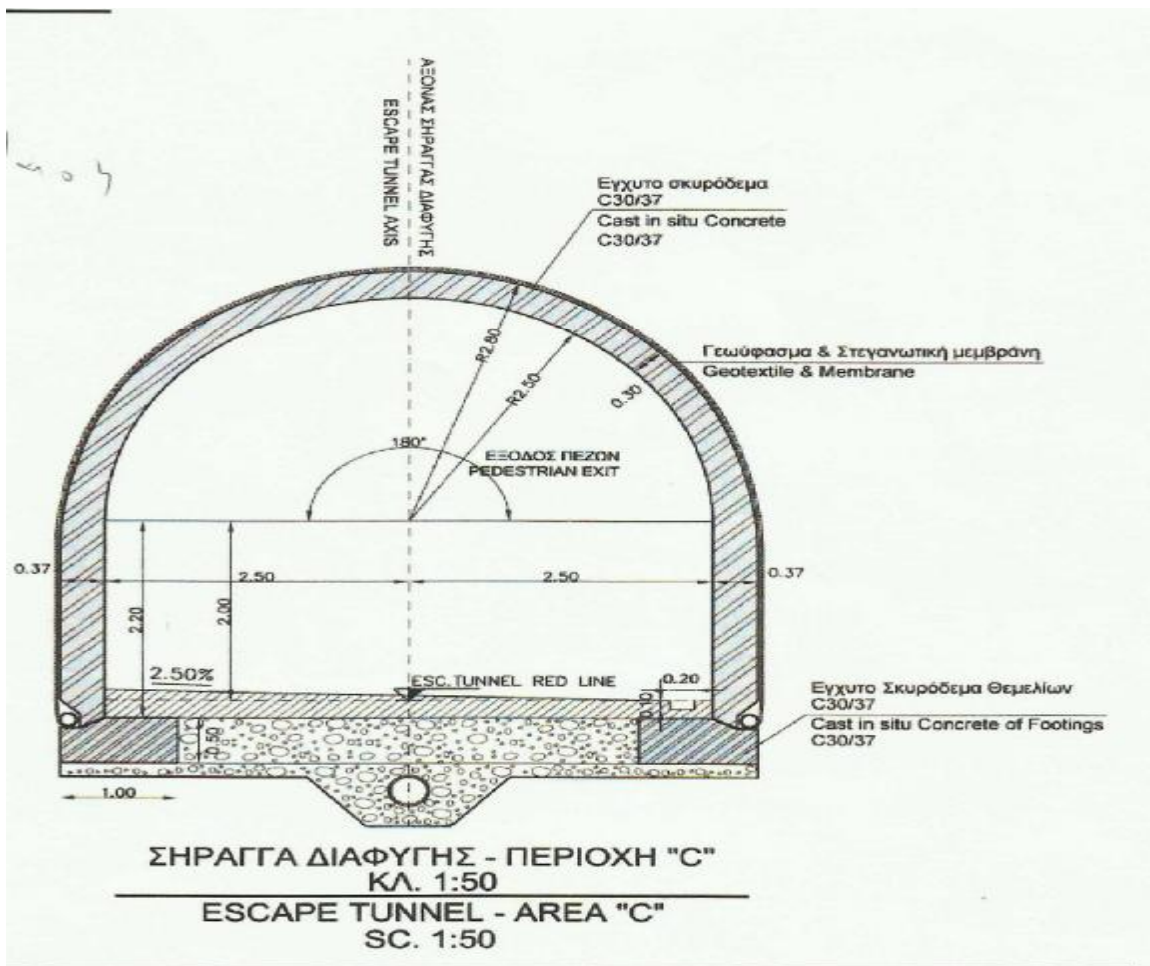
Το μέρος αυτό της σήραγγας δεν θα στεγανοποιηθεί. Σύμφωνα με τον ΟΜΟΕ παρ. 8.10 οι γενικές απαιτήσεις στέγνωσης μπορούν να μην εφαρμοστούν σε εξόδους κινδύνου και άλλες συνοδευτικές υπόγειες εργασίες. Σύμφωνα με το ΤCC ο βαθμός στεγάνωσης και επέκτασης των έργων στεγανοποίησης προσδιορίζεται με βάση την ελάχιστη ποσότητα νερού που μπορεί να ανεχτεί από τον ανάδοχο του έργου και ως εκ τούτου οι απαιτήσεις στεγανοποίησης ποικίλουν ανάλογα με την περίπτωση. Είναι επίσης γεγονός ότι από τις μέχρι τώρα εκσκαφές της σήραγγας διαφυγής δεν έχουν παρατηρηθεί εισροές νερού από τις βραχώμαζες το οποίο συνάδει με την απουσία νερού στην κυρίως σήραγγα Τ8. Έτσι το στάγδην μικρής ποσότητας νερού είναι αποδεκτό εφόσον είναι ελεγχόμενο και οδηγείται ασφαλώς στην έξοδο. Στο σχέδιο ένας κεντρικός διάτρητος σωλήνας

συλλογής PVC Φ300 τυλιγμένος με γεωύφυσμα παρέχεται σε όλο το μήκος της σήραγγας κάτω από τα επίπεδα των πέδινων ( των πέδινων 1,15 κάτω από την ερυθρά στο κέντρο της σήραγγας και η κλίση του σωλήνα σύμφωνα με την ερυθρά ) με σκοπό να οδηγεί την πιθανή και ενδεχόμενη ύπαρξη υπόγειου νερού στην έξοδο με κλίση 0,98 % και στον άξονα που βρίσκεται στην διασταύρωση με την κυρία σήραγγα με κλίση 7,55 %. Στο κατώτερο επίπεδο του 2,5 % του μονής όψης εσωτερικού δαπέδου μια τάφρος με διαστάσεις 20cm x 10 cm και με κλίση σύμφωνη της ερυθράς τοποθετείται για να οδηγεί τη μικρά ποσότητα νερού ανάμεσα στο υπόγειο έργο ( το μισό από αυτό ) στην έξοδο ( και το υπόλοιπο μισό ) στο φρεάτιο που βρίσκεται στην τομή με την κυρία σήραγγα μέσω ενός συνδετικού σωλήνα Φ100.



#### 4.3.2.Γ Τμήμα Γ :

Αναφέρεται στην περιοχή από την χ.θ. 0+ 016,00 έως την χ.θ. 0+11,00 ( τα τελευταία 5 μετρά του υπόγειου μέρους της σήραγγας διαφυγής ). Αυτή η περιοχή πρόκειται να κατασκευαστεί με επιτόπου έγχυση σκυροδέματος της ποιότητας C30/37 ( και στα πέδιλα και στη σήραγγα ). Το γεωύφυσμα και η αδιάβροχη μεμβράνη τοποθετούνται όπως και στο Τμήμα Α. Τα γεωμετρικά στοιχεία του Τμήματος Γ είναι όπως έχουν προαναφερθεί στην τυπική διατομή.





#### 4.4 Γεωλογικά – γεωτεχνικά δεδομένα :

Βασιζόμενοι στην γεωλογική μελέτη , τις διαθέσιμες γεωτρήσεις καθώς και τα μέχρι σήμερα σχετικά δεδομένα από το Α στάδιο ανασκαφής της κύριας σήραγγας T8 , έχουν αναγνωρισθεί οι ακόλουθοι σχηματισμοί στην περιοχή της μελέτης.

- Συμπαγές συσσωρευμένο τσιμέντο. Ανοιχτό γκρι , μαζικό , πολυγεννητικό , ετερογενών δραστηριοτήτων , με ασβεστολιθικό καλούπι (μήτρα) και μεγάλα στρογγυλεμένες κροκάλες έως 10 cm διάμετρο. Εμφανίζονται σε υψηλότερες τοπογραφικές περιοχές και είναι εναποθετημένα στην κορυφή των υπολοίπων σχηματισμών. Είναι λεπτά μέχρι 7,5 μέτρα και βυθίζονται ελαφρά προς τα κάτω με κλίση προς τα ανατολικά. Προς την επιφάνεια αναπτύσσουν έναν διαβρωμένο μανδύα που αποτελείται από κόκκινη αργιλώδη άμμο και κροκάλες . Θραύσματα και ογκόλιθοι αυτού του σχηματισμού φαίνεται να σκεπάζονται σε διαφορές περιοχές κυρίως στις πύλες εξόδου ( δυτικά ) της σήραγγας T7 και T8 όπως επίσης και στην πύλη εισόδου ( ανατολικά ) της σήραγγας T8.
- Ασθενές συσσωρευμένο τσιμέντο. Ωχρό γκρι τσιμέντο με επιμηκές ή στρογγυλεμένο θαλάσσιο χαλίκι και κροκάλες με μεταβλητό αλλά με γενικά χαμηλή περιεκτικότητα σε αμμώδες και λασπώδες υλικό καλουπιού. Η θεμελίωση παρουσιάζει έντονη διαστρωμάτωση απόθεσης και κροκάλες προσανατολισμένης απόθεσης και σχηματίζει τα ψηλά βράχια της κοιλάδας του Δερβενιώτη και γύρω από την πύλη εξόδου της σήραγγας T8. Αντιπροσωπευτικά είναι τα ιζήματα του δέλτα του ποταμού καθώς περιέχουν θαλασσιά και λιμναία απολιθώματα τα οποία προς την επιφάνεια αναπτύσσουν μια λεπτή επιφάνεια , πιο συμπαγή από το εσωτερικό υλικό η οποία θραύεται εύκολα με το γεωλογικό σφυρί. Περιέχονται επίσης λεπτά αμμώδη στρώματα λάσπης ενώ σε τοπικό επίπεδο παρατηρούνται μεγάλα κανάλια ( αυλάκια ) διαύρωσης χαλαρότερου υλικού αναμιγμένου με αναποδογυρισμένα και ασταθή μαζικά θραύσματα ετερογενών δραστηριοτήτων.

Η εμφάνιση του υπόγειου νερού αναμένεται να είναι αμελητέα στο εσωτερικό της ανασκαμμένης μάζας δεδομένου των ξηρών συνθηκών που ανέκυψαν από τις διαθέσιμες γεωτρήσεις. Ωστόσο , μερική εισροή νερού μπορεί να εμφανιστεί κατά τη διάρκεια των υγρών εποχών μέσω του στρώματος μεταβλητής διαπερατότητας. Αυτό θα μπορούσε να είναι υπό μορφή αργής αποστράγγισης του νερού και δεν αναμένεται να προκαλέσει σημαντικό εμπόδιο στις εργασίες εκσκαφής.

Ο κυρίαρχος σχηματισμός που αναμένεται να συναντηθεί στην περιοχή ενδιαφέροντος και ιδιαίτερα στην υπόγεια εκσκαφή είναι ο συσσωρευμένος σχηματισμός. Ουσιαστικά περιλαμβάνει το ασθενώς συσσωρευμένο τσιμέντο που έχει αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό στην περιοχή. Παρόλο που η λιθολογία του φαίνεται να είναι εύλογη , ο βαθμός τσιμεντοποίησης και επομένως η ποιότητα της βραχομάζας , η αντοχή αλλά και η παραμόρφωση του σχηματισμού θα ποικίλλουν.

Τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν από την γεωλογική μελέτη , από τις διαθέσιμες γεωτρήσεις και από τη χαρτογράφηση του μετώπου της μέχρι τώρα ανασκαμμένης σήραγγας T8 , επαρκούν προκειμένου να αξιολογηθούν οι γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή της σήραγγας διαφυγής T8. Προκειμένου να απεικονιστεί η μεταβλητότητα της μηχανικής συμπεριφοράς καθώς και οι πιθανές αβεβαιότητες , ορίζονται τρεις πιθανές κατηγορίες για την ποιότητα της βραχομάζας.

Οι συνολικές συνιστώμενες γεωτεχνικές ιδιότητες για το σχεδιασμό της σήραγγας συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα, ενώ τα κριτήρια αναγνώρισης και εφαρμογής της κάθε κατηγορίας είναι τα ίδια όπως αυτά που ήδη, επιτυχώς, εφαρμόζονται στην μέχρι τώρα ανεσκαμμένη κύρια σήραγγα T8λ.

Οι συνιστώμενες τιμές του  $K_0$  ( συντελεστής πίεσης γαιών σε χαλάρωση για τον σχεδιασμό της σήραγγας σε αυτήν την περιοχή) είναι  $K_0 = 0.5-1.0$ .

Για τους υπολογισμούς η αντοχή της βραχομάζας θεωρείται ίση με 0,8-0,9 MPa για κατηγορία C-III, 0,4 για C-IV και 0,3 για C-V.

Συσσωρεύματα	Τυπικά Υπερκείμενα Της Σήραγγας	Τυπικά Υπερκείμενα Της Σήραγγας
$\gamma = 22.5 \text{ KN/m}^3$	H = 80 m	H = 20 m
C-III	$c' = 200 \text{ kPa}$  $\phi' = 35^\circ$  $E = 1200 \text{ MPa}$	—
C-IV	$c' = 100 \text{ Kpa}$  $\phi' = 35^\circ$  $E = 450 \text{ MPa}$	—

	$c' = 60 \text{ kPa}$	$c' = 40 \text{ kPa}$
C-V	$\varphi' = 35^\circ$	$\varphi' = 35^\circ$
	$E = 250 \text{ Mpa}$	$E = 250 \text{ Mpa}$

#### Πινάκας

συνιστώμενες παράμετροι σχεδιασμού για ετερογενών δραστηριοτήτων κατηγορίες βραχομάζας Ciii , Civ , Cv.

#### 4.5 Περιγραφή των συνθηκών – τάξεων υποστήριξης και αναγνώριση κριτηρίων – έννοια σχεδιασμού :

Οι παράμετροι κατάταξης της εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας για τον προσδιορισμό των κατηγοριών των τάξεων παρουσιάζονται στο σχετικό κεφάλαιο στο οποίο αναλύονται οι προσωρινές κατασκευές υποστήριξης της κύριας σήραγγας T8.

Η λίστα με αυτά τα κριτήρια λειτουργεί σαν σύνδεσμος καθώς κανένα από αυτά τα κριτήρια δεν είναι αρκετό για να μπορέσουμε να αναγνωρίσουμε την κατηγορία της σήραγγας.

Στην περίπτωση παρατήρησης δυσμενών συνθηκών κατά την διάρκεια των εκσκαφών (πιο δυσμενών από αυτές που αναμένονται για την συγκεκριμένη τάξη της σήραγγας ) τότε θα πρέπει να κινητοποιηθούν μηχανισμοί μέτρων έκτακτης ανάγκης προτού αλλαχτεί η κατηγορία της τάξης εκσκαφής και υποστήριξης του υπόγειου έργου.

#### 4.6 Παραδοχές και έννοια σχεδιασμού :

Η εκσκαφή καθώς και το σύστημα στήριξης έχουν βασιστεί στις εξής κύριες παραδοχές :

- Η τομή της σήραγγας έχει πλάτος περίπου 6.5 μέτρα
- Τα υπερκείμενα είναι χαμηλά , κοντά στην πύλη και περίπου 97 μέτρα στη τομή της

σήραγγας διαφυγής με την κύρια σήραγγα.

- Η συμπεριφορά του κυρίαρχου σχηματισμού παρουσιάζεται γενικά με διαφόρους βαθμούς τσιμεντοποίησης. Ο σχηματισμός αποτελείται κυρίως από χονδρό υλικό το οποίο υπερισχύει του χαμηλού ποσοστού του λεπτού υλικού.

Η παρουσίαση αδύναμων στρωμάτων ωστόσο δεν μπορεί να αποκλειστεί, παρόλο που δεν είναι κυρίαρχη στην όψη, αν βρίσκονται στην κορυφή της στέψης ή στην βάση της εκσκαφής ή στα πλαϊνά.

- Η δυνατότητα εκσκαφής του σχηματισμού αναμένεται να ποικίλει από σχετικά εύκολη σε δύσκολη με κοινό μηχανικό εξοπλισμό. Σε καλύτερη ποιότητα υλικού η χρήση δυνατότερου εξοπλισμού μπορεί να χρειαστεί.
- Η ευστάθεια της όψης της στέψης και των πλαϊνών τοίχων θεωρείται δυσμενής για τα κατώτερα όρια της κλίμακας σχεδιασμού και βελτιώνεται για τα πιο συνεκτικά, τσιμεντοποιημένα υλικά.
- Σημαντικές εισροές νερού δεν αναμένονται στην ανασκαφή. Στην χαλαρή συσσώρευση, ωστόσο, κατά τη διάρκεια υγρών μηνών αυξημένη υγρασία ή πιθανό στάξιμο ή συνθήκες ελαφρώς ροής μπορεί να ανακύψουν λόγω της μερικής διάσπασης του σχηματισμού.

Βάσει των παραπάνω σχεδιαστήκαν τρεις βασικές τάξεις στήριξης όπου για κάθε μια θα ακολουθήσει πολύ – σταδιακή μέθοδος εκσκαφής. Αυτές οι κατηγορίες είναι C-III, C-IV, C-V.

Λεπτομερής περιγραφή των μέτρων στήριξης της κάθε κατηγορίας προσφέρονται στις επόμενες σελίδες.

Για να λάβουμε υπόψη τις δυσμενείς συνθήκες της περιοχής της τομής της σήραγγας διαφυγής T8 με την κύρια έχουν αναλυθεί παραπάνω μοντέλα.

Για να υπολογίσουμε την κατανομή των τάσεων σε αυτή την περιοχή πριν και μετά την εκσκαφή και την προσωρινή υποστήριξη της κύριας σήραγγας, οι τάσεις των αντιστοιχών σταδίων των πεπερασμένων στοιχείων της κύριας σήραγγας θεωρούνται. Αυτές οι τάσεις έχουν παρθεί από υπολογισμούς των υψηλά υπερκείμενων βραχομαζών CV και  $K_0=0.5$  στις πιο κρίσιμες συνθήκες.

Η διάφορα των τάσεων ανάμεσα στα σταδία ( κοντά στη στέψη όπου οι δυο σήραγγες τέμνονται ) διαφέρει όπως φαίνεται και στα ακόλουθα σκαριφήματα. Η μέση τιμή λήφθηκε υπόψη (  $\Delta\sigma_y = 400$  kPa ) και προστέθηκε στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, στο ύψος του στέμματος της σήραγγας για την περιοχή τομής των δυο αυτών σηράγγων.



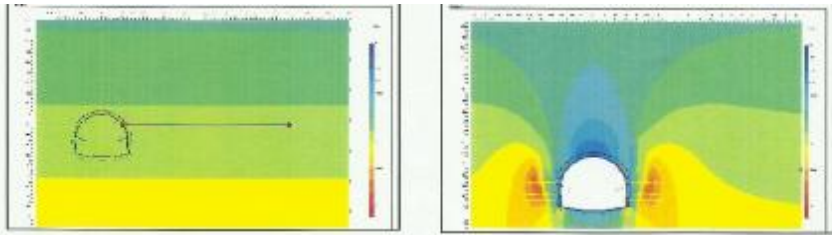


Figure 2.1 – Stresses around main tunnel, before and after excavation and temporary support

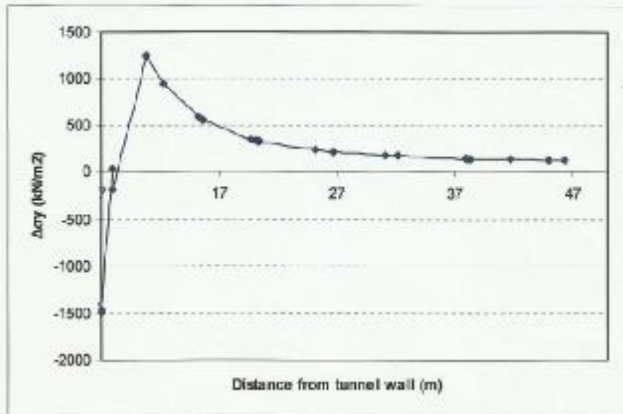


Figure 2.2 – Difference of stresses around main tunnel ( $\Delta\sigma_y$ ), before and after excavation and temporary support

#### **4.7 Περιγραφή του συστήματος υποστήριξης και της κατασκευαστικής ακολουθίας :**

Βασισμένη στα κριτήρια και στην ιδέα που ήδη έχουν περιγραφεί η κατασκευή της σήραγγας θα ακολουθήσει μια μέθοδος πολλαπλών σταδίων εκσκαφής. Τα προσωρινά μέτρα στήριξης ακολουθούν την ίδια φιλοσοφία για όλες τις γεωτεχνικές κατηγορίες. Τα αγκύρια αντικαθίστανται από έγχυση σκυροδέματος στην γεωτεχνική κατηγορία C-V. Το σύστημα υποστήριξης που προτείνεται είναι ενισχυμένο από δομικό πλέγμα και συρματοπλέγμα σε δυο στρώσεις. Η εκσκαφή της σήραγγας θα εκτελεστεί σε μια φάση για όλες τις γεωτεχνικές κατηγορίες C-III , C-IV και C-V .

Η υποστήριξη του δομικού πλέγματος στη βάση κάθε φάσης επιτυγχάνεται μέσω της εγκατάστασης αγκυρίων.

Η εκσκαφή χαρακτηρίζεται από το ακόλουθο μέγεθος εκσκαφής :

Σήραγγα διαφυγής : εκσκαφή – μέσο εμβαδόν διατομής 36 μέτρα περίπου

μέσο ύψος περίπου 6,25 μέτρα.

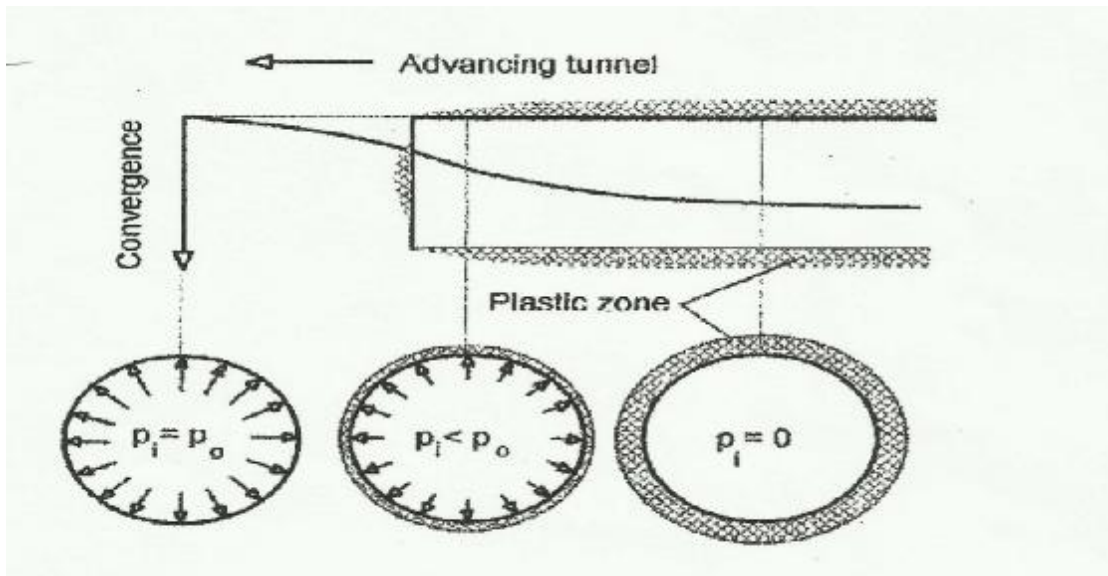
Σήραγγα διαφυγής στην τομή της με την κύρια σήραγγα :

εκσκαφή - μέσο εμβαδόν διατομής 46 μέτρα περίπου

μέσο ύψος περίπου 7,70 μέτρα.

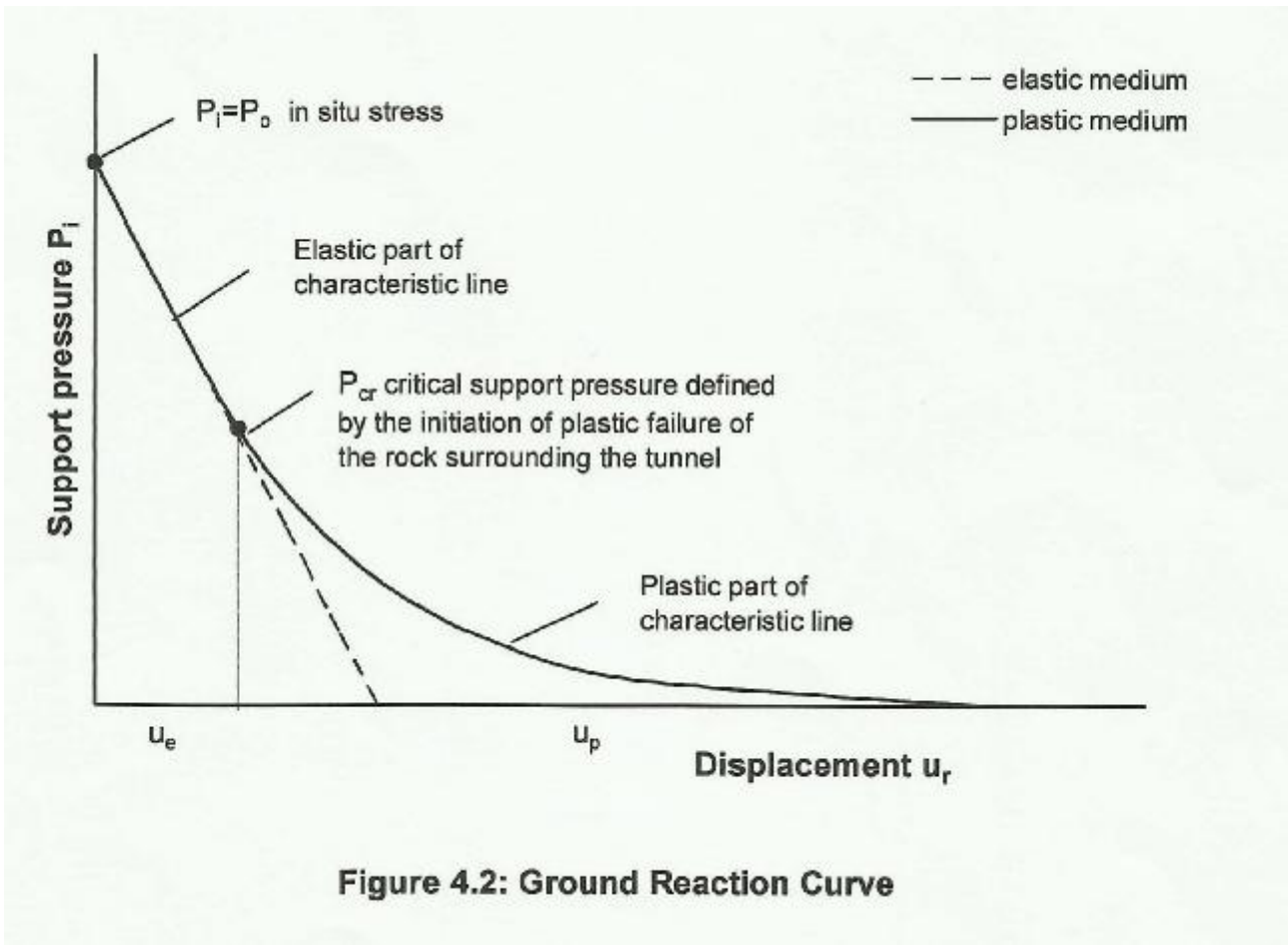
#### **4.8 Μεθοδολογία ανάλυσης και υπολογισμών :**

Ο βέλτιστος σχεδιασμός του προσωρινού συστήματος υποστήριξης βασίζεται όχι μόνο στα προτεινόμενα μέτρα στήριξης αλλά και τον χρόνο της εφαρμογής τους. Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για τον σχεδιασμό ενός προσωρινού συστήματος υποστήριξης είναι η μεταβολή του υποστηριζόμενου φορτίου στο εσωτερικό της σήραγγας (χαλάρωση) , η οποία εξαρτάται από την απόσταση μπροστά ή πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας , τις ιδιότητες του εδάφους και τον τύπο του προσωρινού συστήματος στήριξης.



Επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο έναν ελεγχόμενο βαθμό παραμορφώσεων, το σύστημα προσωρινής υποστήριξης θα λάβει φορτία σημαντικά μικρότερα, από εκείνα που θα λάμβανε αμέσως μετά την εκσκαφή. Από την άλλη πλευρά, η αντοχή των σημαντικών παραμορφώσεων θα παράγει μείωση των μηχανικών αντιδράσεων της βραχομάζας που οδηγούν πιθανώς σε δυσμενείς συνθήκες φόρτισης σε μακροπρόθεσμη βάση.

Η χαλάρωση των τάσεων μπορεί να εκφραστεί από τη σταδιακή μείωση του αρχικού επίπεδου των τάσεων κατά μήκος της περιμέτρου της σήραγγας (επιτόπου φόρτιση).



$$P_i = (1 - \lambda) P_o$$

όπου  $P_o$  είναι το αρχικό πεδίο τάσεων σε ένα σημείο της περιμέτρου της σήραγγας και  $\lambda$  ο συντελεστής χαλάρωσης. Από την άλλη, η σύγκλιση της σήραγγας μπορεί να σχετίζεται με τις επί τόπου τάσεις που ενεργούν κατά μήκος της περιμέτρου της σήραγγας με την χρήση της καμπύλης αντίδρασης του εδάφους.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η παραμόρφωση της βραχομάζας είναι ελαστική στην αρχή και ο ρυθμός χαλάρωσης των αρχικών τάσεων είναι σημαντικός. Όταν η τάση  $P_i$  φτάσει την κρίσιμη τιμή  $P_{cr}$ , υπάρχει μια μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή με μείωση του ρυθμού χαλάρωσης και ταυτόχρονη αύξηση του ρυθμού παραμόρφωσης. Τελικά, η αλληλεπίδραση μεταξύ της βραχομάζας και των μέτρων στήριξης, εξαρτώνται από τις παρακάτω παραμέτρους:

- Η ακαμψία του συστήματος στήριξης , η οποία καθορίζει επίσης το μέγεθος των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων.
- Το μέγιστο φορτίο που το σύστημα στήριξης μπορεί να φέρει.
- Η αναπτυσσόμενη παραμόρφωση πριν την εφαρμογή του προσωρινού συστήματος στήριξης.

#### 4.9 Μοντέλα :

Με βάση την πρόβλεψη των αναμενόμενων συνθηκών και συμπεριφορών του εδάφους καθώς και την διάκριση μεταξύ των διαφόρων των υψών των υπερκείμενων εξετάζονται στις αναλύσεις οι ακόλουθες περιπτώσεις.

Design Ground	Overburden	Ko	Model
Ciii	High	0.5	Esc_Ciii_High_Ko05
		1.0	Esc_Ciii_High_Ko1
Civ	High	0.5	Esc_Civ_High_Ko05
		1.0	Esc_Civ_High_Ko1
Cv	Low	0.5	Esc_Cv_Low_Ko05
		1.0	Esc_Cv_Low_Ko1
	High	0.5	Esc_Cv_High_Ko05
		1.0	Esc_Cv_High_Ko1
Civ at intersection	High	0.5	Esc_Int_High_Ko05
		1.0	Esc_Int_High_Ko1

TABLE 4.1

GROUND CONDITIONS AND CORRESPONDING NUMERICAL MODELS

#### Πινάκας

Το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων σε όλα τα μοντέλα καλύπτει μια ευρεία περιοχή προκειμένου να αποφευχθεί η επίδραση από τα όρια του μοντέλου. Το έδαφος εισάγεται μέσω του δικτύου και έχει τις ιδιότητες και τις παραμέτρους της αντοχής και παραμορφωσιμότητας των αναμενόμενων γεωμετρικών προφίλ. Το έδαφος μοντελοποιείται ως ιστροπικά ελαστικό – τέλεια πλαστικό υλικό , το οποίο υπακούει στο κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb. Οι γεωστατικές τάσεις καθορίζονται από τις τιμές του "Ko".



#### 4.10 Υπολογισμοί τοίχων αντιστήριξης :

Οι τοίχοι αντιστήριξης που παρουσιάστηκαν είναι κατασκευασμένοι στην είσοδο της σήραγγας διαφυγής T8 με εγκάρσια κατεύθυνση σύμφωνα με τον άξονα της σήραγγας. Έχουν συνολικό ύψος 3 μέτρα περίπου ( ελεύθερο ύψος πάνω από την ερυθρά 2.3 μέτρα ). Είναι τοίχοι σχήματος L και η τυπική τους γεωμετρική διατομή παρουσιάζεται στο σχετικό κεφάλαιο.

Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό PROCAN ( Retaining Wall Design Module ). Περιλαμβάνουν υπολογισμούς συνιστάμενων τάσεων , αναλύσεις ευσταθείας ( ασφάλεια σε ολίσθηση και ανατροπή ) και έλεγχο της εφαπτόμενης τάσης στο επίπεδο θεμελίωσης.

Ενεργητικές και παθητικές ωθήσεις γαιών που εξετάζονται έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τη θεωρία Coulomb για περίπτωση στατικής φόρτισης ενώ παράλληλα η σεισμική φόρτιση υπολογίζεται σύμφωνα με την μέθοδο Mononobe – Okabe.

Η σεισμική επιτάχυνση λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό ως 0.24 g και ο συντελεστής  $q_w = 1.50$  ( $0.24 \text{ g} * 1.5 = 0.36 \text{ g}$  )

Οι υδροστατικές πιέσεις είναι αποτέλεσμα του υδροφόρου ορίζοντα με ύψος 1.10 μέτρα το οποίο το μετρείται από την κορυφή της θεμελίωσης , όπου το σύστημα αποστράγγισης εγκαθίσταται , έχει ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς σε περίπτωση δυσλειτουργίας του συστήματος.

Τα αποτελέσματα των στατικών και σεισμικών αναλύσεων είναι επισυναπτόμενα στο παράρτημα 1 και 2 αντίστοιχα.

#### 4.11 Ανάλυση και μεθοδολογία υπολογισμών :

##### 2-D Ανάλυση

Η 2-D ανάλυση έγινε χρησιμοποιώντας το SOFISTIK CODE το οποίο περιλαμβάνει διαφορές ενότητες – υποπρογράμματα , οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω , που εκτελεί σε κάθε κομμάτι της ανάλυσης.

##### 4.11.1 AQUA – Υλικά και διατομές

Το AQUA υπολογίζει τις προϋποθέσεις των διατομών οποιουδήποτε σχήματος φτιαγμένο από οποιοδήποτε υλικό. Οι προϋποθέσεις των διατομών καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά μεγέθη για μια στατική ανάλυση καθορίζονται για τον υπολογισμό των ορθών και διατμητικών τάσεων. Οι διατομές χρειάζεται να οριστούν πριν εισαχθούν στο στατικό σύστημα ή στην διαστασιολόγηση με το AQB.

Μετά τον προσδιορισμό με το AQUA , οι διατομές μπορούν να αναπαραχθούν γραφικά με το AQUP. Όλες οι στατικές προδιαγραφές των διατομών προσδιορίζονται επιτόπου. Οι τιμές των περιοχών διατμητικών παραμορφώσεων και η αντοχή σε τάση περιλαμβάνονται.

#### **4.11.2 SOFIMSHA – Εισαγωγή και εξαγωγή των πεπερασμένων στοιχείων και κατασκευή δοκών.**

Οποιαδήποτε κατασκευή όπως για παράδειγμα μια επίπεδη κατασκευή πρέπει να ερμηνευτεί σε γενικές γραμμές ως μια απείρως απροσδιόριστη. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για να μετατρέψει αυτό το άπειρο σύστημα σε πεπερασμένο , ( να το διακριτοποιήσει ).

Μια διακριτή λύση αποτελούμενη από  $n$  αγνώστους υπολογίζεται στη θέση μιας συνεχούς λύσης. Για την στατική ανάλυση αυτοί οι άγνωστοι είναι για παράδειγμα η μετατόπιση συγκεκριμένων στοιχείων τα επονομαζόμενα κομβικά στοιχεία. Αυτοί οι κομβοί είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους μέσω μηχανικών απλοποιημένων μελών τα επονομαζόμενα στοιχεία. Μπορεί κανείς να υπολογίσει τις μετατοπίσεις μιας ολόκληρης περιοχής μέσω μιας παρεμβολής κομβικών τιμών στο εσωτερικό των στοιχείων. Η συνεχής επίπεδη κατασκευή είναι έτσι παρουσιασμένη από έναν μεγάλο αλλά και πεπερασμένο αριθμό στοιχείων.

Η δύναμη των πεπερασμένων στοιχείων εξετάζεται στην καθολική τους εφαρμογή σε οποιοδήποτε γεωμετρικό σχήμα μέσα στα στοιχεία. Αυτό έχει αποφευχθεί από την ακόλουθη αρχή των οικοδομικών τετραγώνων.

Τα εξατομικευμένα στοιχεία τα οποία περιγράφουν κομμάτια της κατασκευής με έναν υπολογιστικά προσανατολισμένο τρόπο , είναι προσαρμοσμένα σε πλήρη δομή. Οι συνήθεις κατασκευές πλαισίων οφείλουν να κατανοηθούν σαν μια ξεχωριστή περίπτωση αυτής της αρχής κατά την οποία ένας πεπερασμένος αριθμός κόμβων οδηγεί σε μια ακριβή λύση.

Το έργο του SOFIMSHA είναι να εξάγει ή να εισάγει το συνολικό όγκο των κόμβων και στοιχείων με μεγάλη αποτελεσματικότητα. Οι δυνατότητες παράγωγης αφήνονται περισσότερο στις πιθανότητες του CADINP.

Ακριβώς μια βάση δεδομένων είναι διαθέσιμη για κάθε ένα σύστημα στην οποία κάθε υποπρόγραμμα έχει απεριόριστη πρόσβαση. Ένα σύστημα αποτελείται ολοκληρωτικά από τα κομμάτια που σχηματίζουν μια δομή ή έναν σκελετό τα οποία συνεργάζονται στατικά κατά τη διάρκεια ζωής των συστημάτων. Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού μερικά συστήματα μπορούν να αναλυθούν ξεχωριστά.

#### 4.11.3 SOFILOAD – Γεννήτρια φορτίων για πεπερασμένα στοιχεία και έργα

##### πλαισίου.

Το SOFILOAD παράγει φορτία για όλα τα υποπρογράμματα SOFISTIK. Τα φορτία είναι οργανωμένα σε περιπτώσεις φορτίων τα οποία είναι μέλη μιας μοναδικής δράσης. Οι περιπτώσεις φορτίων απευθύνονται δια μέσω ενός αριθμού ενώ η δράση έχει οριστεί μέχρι 4 χαρακτήρες και έχουν κρατηθεί 48 συνδυασμοί για πιστοποιημένους τύπους δράσεων. Ο συνδυασμός των περιπτώσεων των φορτίων μέσω των δράσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολύ γενικό τρόπο, ωστόσο υπάρχουν τρεις προκαθορισμένες μέθοδοι συνδυασμών: η μόνιμη, η προορατική, η αποκλειστική. Ο τελευταίος συνδυασμός των δράσεων γίνεται, τελικά, με τα υποπρογράμματα MAXIMA ή AQB δια μέσω συντελεστών συνδυασμού ( $\psi$ ) και παράγοντες ασφάλειας ( $\gamma$ ), οι οποίοι μπορεί να διαφέρουν σε αξία από μια περίπτωση φορτίων σε μια άλλη, αλλά πάντα θα εφαρμόζονται με το ίδιο είδος του παράγοντα.

Τα φορτία του FEM-mesh μπορούν να προσδιοριστούν ξεχωριστά. Το SOFILOAD θα χειριστεί την μετάβαση από γεωμετρικό μοντέλο σε πιο συγκεκριμένα κομβικά ή επί των στοιχείων φορτία. Τα φορτία είναι είτε ήδη στη βάση δεδομένων είτε μπορούν να προσδιοριστούν μέσω του SOFILOAD.

Αν το πλέγμα των στοιχείων αλλάξει το SOFILOAD οφείλει να επαναλάβει την εκχώρηση στοιχείων. Πέρα από τα κομβικά ή τα επί των στοιχείων φορτία θα μπορούσαν να προσδιοριστούν από άλλα συστήματα πεπερασμένων στοιχείων. Αυτά τα φορτία, όμως, θα διαγραφούν αν το πλέγμα των στοιχείων αλλάξει ή λάβει μέρος μια ρητή επαναπροσδιόριση. Υπάρχουν επίσης πιθανότητες να παραχωθούν φορτία από τα αποτελέσματα στη βάση δεδομένων. Αυτές είναι ειδικές υποστηρικτικές δυνάμεις που έχουν μετατραπεί σε φορτία, ατέλειες, παραμορφώσεις ερπυσμού ή επιδράσεις προέκτασης.

#### 4.11.4 ASE – Γενική στατική ανάλυση της δομής των πεπερασμένων στοιχείων :

Το ASE υπολογίζει τα στατικά και δυναμικά αποτελέσματα των γενικών φορτίσεων οποιουδήποτε τύπου κατασκευής. Για να αρχίσουν οι υπολογισμοί ο χρήστης διαιρεί την κατασκευή που επρόκειτο να αναλυθεί σε συγκρότημα μεμονωμένων στοιχείων διασυνδεδεμένου στους κόμβους (μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων). Πιθανοί τύποι των στοιχείων αυτών είναι: ελατήρια, καλώδια, στοιχεία δικτύωματος, επίπεδο τριγωνικό ή τετράπλευρο στοιχείο κελύφους και τρισδιάστατα συνεχόμενα στοιχεία.

Το πρόγραμμα χειρίζεται κατασκευές με άκαμπτους ή ελαστικούς τύπους υποστήριξης. Μια ελαστική υποστήριξη μπορεί να εφαρμόζεται σε μια περιοχή, σε μια γραμμή ή στα κομβικά σημεία.

Τα άκαμπτα στοιχεία ή οι πλάγιες υποστηρίξεις μπορούν να ληφθούν υπόψη. Το ASE υπολογίζει τα αποτελέσματα κομβικών γραμμικών και δικτυωτών φορτίων. Τα φορτία μπορούν να υπολογίσουν ανεξάρτητα από ένα πλέγμα στοιχείων. Η γενιά των φορτίων από τις πιέσεις μιας πρωταρχικής περίπτωσης φορτίων επιτρέπει την εξέταση αποτελεσμάτων των σταδίων κατασκευής, αναδιανομής και ερπυσμού.

Οι μη γραμμικοί υπολογισμοί επιτρέπουν στον χρήστη να λάβει υπόψη του την αποτυχία συγκεκριμένων στοιχείων όπως για παράδειγμα : καλώδια σε συμπίεση, ανύψωση υποστηριζόμενων πλακών, αποδίδοντας αποτελέσματα τριβών ή ρωγμών για ελατήρια και στοιχεία θεμελίωσης. Μη γραμμικά υλικά είναι διαθέσιμα για τρισδιάστατα και κουφωτά στοιχεία. Γεωμετρικοί, μη γραμμικοί υπολογισμοί επιτρέπουν την διεύρυνση αποτελεσμάτων της δεύτερης και της τρίτης κατά σειρά θεωρίας από καλώδια, δοκούς και κελυφώδες κατασκευές.

Στην περίπτωση των κατασκευών δοκών το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίσει την στρέβλωση στρέψης με έως 7 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο.

Η βασική έκδοση του ASE εκτελεί τη γραμμική ανάλυση των δοκών, καλωδίων, δικτυωμάτων κ.α ενώ οι εκτεταμένες του μορφές παρέχουν την δυνατότητα υπολογισμού επιφανειών επιρροής, μη γραμμικών αναλύσεων, στοιχεία μεμβράνης κ.α.

#### **4.11.5 AQB – Σχεδιασμός διατομών και από προεντεταμένο σκυρόδεμα και συνθετών διατομών**

Το AQB χρησιμοποιείται για ανάλυση τάσεων και σχεδιασμό διατομών που δημιουργήθηκαν με το AQUA. Η ενισχυμένη έκδοση AQBS επιτρέπει την εξέταση των ειδικών χαρακτηριστικών του προεντεταμένου σκυροδέματος και σύνθετων κατασκευών (προεντεταμένοι τένοντες, δευτερεύουσες επιβληθείσες τάσεις, ερπυσμός και συρρίκνωση). Οι δυνάμεις και οι προεντεταμένοι τένοντες μπορούν να προσδιοριστούν απευθείας ή να εισαχθούν από την βάση δεδομένων για δοκούς, υποστυλώματα ή καλωδιωτά στοιχεία. Μια ολόκληρη σειρά από εργασίες σχεδιασμού μπορούν να διεξαχθούν με τις επιλεγμένες δυνάμεις.

Αυτές είναι:

- Ερπυσμού και συρρίκνωσης (AQBS μόνο)
- Προσδιορισμός των μέγιστων τάσεων σε μια διατομή σύμφωνα με την θεωρία της ελαστικότητας
- Προσδιορισμός της απαραίτητης ενίσχυσης ή εσωτερικός παράγοντας ασφάλειας για άοπλο, οπλισμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα στις διατομές. Το AQB μπορεί να σχεδιάσει διατομές είτε από οπλισμένο είτε από προεντεταμένο σκυρόδεμα με βελτιστοποιημένη κατανομή των ενισχύσεων για αξονική δύναμη και διαξονική κάμψη. Διεθνείς κώδικες μπορούν να ληφθούν υπόψη.
- Προσδιορισμός των μέγιστων τάσεων και των πραγματικών δυσκαμψιών για τα

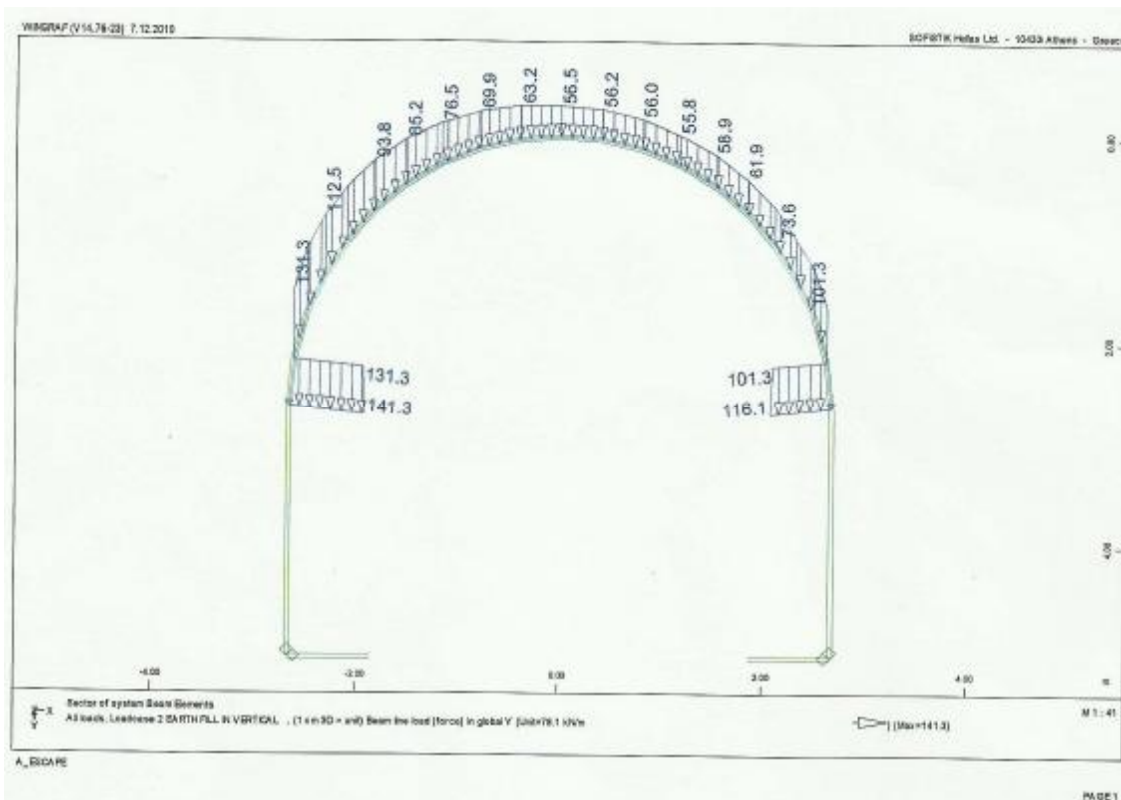
προκαθορισμένα υλικά. Το AQBS προσδιορίζει τις τάσεις και τις επί των στελεχών διανομές βασισμένες στην συμπεριφορά των υλικών.

Οι υπολογισμένες τάσεις, υποστηρίξεων και δυσκαμψιών μπορούν να αποθηκευθούν πίσω στην βάση δεδομένων, και μπορούν και οι δυο να αναπαριστούν γραφικά ή να διευθετηθούν από αλλά υποπρογράμματα.

Μόνιμα φορτία : Η μονάδα βάρους του οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να ληφθεί ίση με 25 Kp / m<sup>3</sup> σύμφωνα με τους Ελληνικούς Κανονισμούς του Οπλισμένου Σκυροδέματος ( παρ 2.2. ). Αυτή η αξία ενσωματώνεται αυτόματα στην ανάλυση.

#### 4.12 Κάθετες πιέσεις εδάφους :

Οι κάθετες πιέσεις του εδάφους λόγω της επίκλισης υπολογίζονται ως  $\gamma \cdot h$  όπου  $\gamma$  είναι η μονάδα βάρους του εδάφους και  $h$  είναι το ύψος του υπερκείμενου εδάφους που περιβάλλει την κατασκευή. Το ύψος του υπερκείμενου εδάφους μετά την απήχηση, την οποία την παίρνουμε ίση με 2,51 μέτρα, υπολογίζεται για την πιο δυσμενή θέση, η οποία είναι ο τομέας κοντά στην πύλη της υπόγειας σήραγγας. Λόγω του γεγονότος ότι η φυσική κλίση δεν είναι τελείως οριζόντια και οι αρχικές συνθήκες θα αποκατασταθούν υποθέτουμε ότι η επίκλιση θα ακολουθητέ την ίδια κλίση, η οποία ούτε και αυτή θα είναι οριζόντια. Έτσι στα αριστερά η πίεση θα έχει μεγαλύτερη τιμή ενώ στα δεξιά όχι. Η κατανομή των φορτίων δεν είναι γραμμική λόγω της καμπυλότητας του στέμματος.





Βιβλιογραφία :

<http://www.popularmechanics.com>

<http://www.historyofbridges.com>

<http://www.ametro.gr/page/default.asp?id=61&la=1>

<http://www.iefimerida.gr>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Tunnel>

[http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/4918/6/Nimertis\\_Mpalta%28geo%29.pdf](http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/4918/6/Nimertis_Mpalta%28geo%29.pdf)