

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΤΗ "ΜΕΘΟΔΟ NATM"

5.1 Γενικά

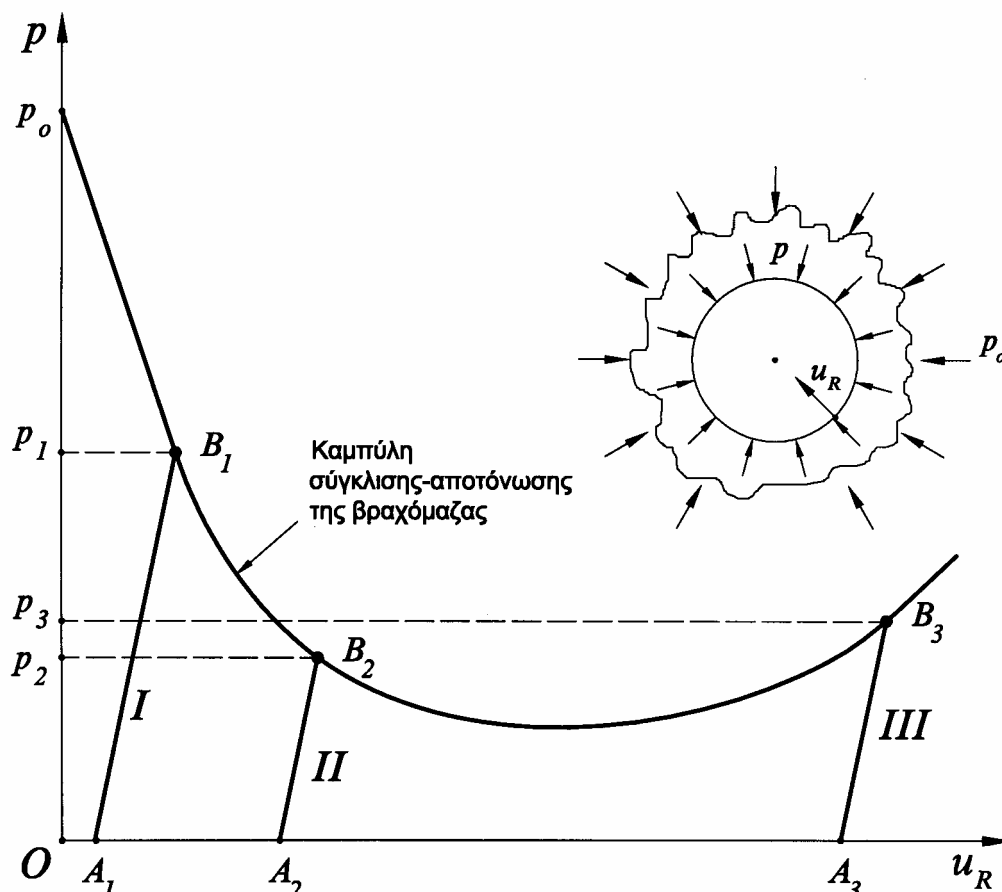
Η λεγόμενη "Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων" (New Austrian Tunnelling Method - NATM) ουσιαστικώς δεν αποτελεί μια "μέθοδο" αλλά περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων οι οποίες εφαρμόστηκαν συστηματικά κατά τη διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Οι τεχνικές αυτές είχαν εφαρμοσθεί και πριν το 1960 τόσο στην Αυστρία όσο και σε άλλα μέρη του κόσμου αλλά η συστηματοποίηση και ονομασία¹ τους (NATM) έγινε από Αυστριακούς Μηχανικούς (Rabcewicz, Mueller, Brunner και Pacher) περί το 1960. Έτσι, αν και η "Μέθοδος NATM" όταν προτάθηκε δεν ήταν ούτε "Νέα" ούτε "Αυστριακή" (αφού είχε εφαρμοσθεί και στο παρελθόν σε άλλες χώρες) αλλά ούτε και "Μέθοδος" (αφού ουσιαστικά αποτελείται από ένα σύνολο τεχνικών οι οποίες μάλιστα αλλάζουν με την πρόοδο της τεχνολογίας), διατήρησε διεθνώς μέχρι σήμερα το όνομά της.

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. Σύμφωνα με τα ανωτέρω, οι εναλλακτικοί τρόποι διάνοιξης σηράγγων που δεν υπάγονται στη μέθοδο NATM είναι:

1. Διάνοιξη με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBM), επειδή κατά τη μέθοδο αυτή η κοπτική κεφαλή του μηχανήματος ασκεί πίεση επί του μετώπου εκσκαφής.
2. Διάνοιξη με προστατευτική ασπίδα (shield) επειδή η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας γίνεται μέσω της ασπίδας και όχι με εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή αγκυρίων.
3. Οποιαδήποτε άλλη μέθοδος διάνοιξης κατά την οποία η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας γίνεται χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή αγκύρια, όπως π.χ. με έγχυτο σκυρόδεμα, προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα, μέταλλο ή άλλο υλικό.

Η συνήθης εφαρμογή της μεθόδου NATM είναι η διάνοιξη της διατομής της σήραγγας σε μια ή περισσότερες φάσεις και η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό, ινοπλισμένο, οπλισμένο με χαλύβδινο πλέγμα ή ενισχυμένο με χαλύβδινες νευρώσεις από ράβδους ή διατομές I) και αγκύρια (παθητικά ή προεντεταμένα). Σημειώνεται ότι η υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας μόνον με αγκύρια χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υπάγεται επίσης στην κατηγορία της μεθόδου NATM. Τέλος, κατά τη μέθοδο NATM η ως άνω άμεση υποστήριξη συνήθως ακολουθείται σε μεταγενέστερο χρόνο από την κατασκευή της "τελικής επένδυσης" της σήραγγας η οποία θεωρείται ως φέρον στοιχείο (σε ορισμένες περιπτώσεις δεν κατασκευάζεται τελική επένδυση αλλά η άμεση υποστήριξη σχεδιάζεται ώστε να αναλάβει το σύνολο των φορτίων της περιβάλλουσας βραχώμαζας).

¹ Η ονομασία "New Austrian Tunnelling Method - NATM" εμφανίσθηκε για πρώτη φορά το 1964 σε μια σειρά τριών άρθρων του L. von Rabcewicz στο περιοδικό Water Power. Στα άρθρα αυτά αναφέρεται η κατασκευή μιας σήραγγας στη Βενεζουέλα κατά την περίοδο 1957-58 όπου εφαρμόστηκε υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια.



Σχήμα 1: Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχώμαζας επί της υποστήριξης της σήραγγας.

I: πολύ νωρίς. Η πίεση στην άμεση υποστήριξη (p_1) είναι πολύ μεγάλη.

II: κανονικός χρόνος κατασκευής της άμεσης υποστήριξης. Η πίεση (p_2) έχει μειωθεί σημαντικά.

III: πολύ αργά. Η πίεση (p_3) έχει αυξηθεί λόγω αποδιοργάνωσης (χαλάρωσης της βραχώμαζας, με συνέπεια τον κίνδυνο κατάρρευσης).

5.2 Χαρακτηριστικά της μεθόδου NATM

Η βασική αρχή της μεθόδου NATM είναι ότι η διάνοιξη της σήραγγας και η κατασκευή της άμεσης υποστήριξης γίνονται κατά τρόπο ώστε να ενεργοποιηθεί η αντοχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας (μέσω της ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας) σε ικανό βαθμό ώστε να μειωθούν αρκετά οι πιέσεις επί της άμεσης υποστήριξης αλλά όχι τόσο ώστε να προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχώμαζας με συνέπεια την αύξηση των πιέσεων στην άμεση υποστήριξη και τελικώς την κατάρρευση της διατομής της σήραγγας (βλέπε Σχήμα 1). Δεδομένου ότι ένα σημαντικό ποσοστό της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής (δηλαδή πριν η εκσκαφή φθάσει στη συγκεκριμένη θέση) και επιπλέον ότι η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας αυξάνει με ταχείς ρυθμούς στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής², προκύπτει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η αντοχή της βραχώμαζας έχει ενεργοποιηθεί επαρκώς³ πολύ κοντά στο

² βλέπε σχετικές καμπύλες $x-u_R$ στο Κεφάλαιο 4

³ και συνεπώς οι εδαφικές πιέσεις έχουν μειωθεί σημαντικά

μέτωπο της εκσκαφής και συνεπώς η άμεση υποστήριξη θα πρέπει να κατασκευασθεί κατά το δυνατόν πλησιέστερα στο μέτωπο εκσκαφής.

Η παραπάνω αρχή της μεθόδου NATM εξειδικεύεται ως εξής:

1. Η εκσκαφή της διατομής της σήραγγας συνήθως γίνεται σε περισσότερες της μιας φάσεις. Τυπικές περιπτώσεις φαίνονται στα Σχήματα 2, 3 και 4. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η επιφάνεια του μετώπου της εκσκαφής κάθε φάσης και συνεπώς μειώνεται η συνολική σύγκλιση του τοιχώματος (σε σχέση με την εκσκαφή της διατομής σε μια φάση) και βελτιώνεται η ευστάθεια της διατομής αποφεύγοντας την αποδιοργάνωση της περιβάλλουσας βραχώμαζας.
2. Κατασκευή της άμεσης υποστήριξης της διατομής σε μικρή απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής ώστε να περιορισθεί η περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας και να αποφευχθεί η αποδιοργάνωση της δομής της βραχώμαζας. Τούτο επιτυγχάνεται με την προώθηση της κάθε φάσης εκσκαφής σε μικρά βήματα της τάξεως των 1-2 μέτρων αναλόγως της ποιότητας της βραχώμαζας. Το μήκος του βήματος εκσκαφής μειώνεται όσο πτωχότερη είναι η ποιότητα της βραχώμαζας (επειδή στις περιπτώσεις αυτές η αποδιοργάνωση της δομής της βραχώμαζας είναι ταχύτερη).
3. Η άμεση υποστήριξη της διατομής θα πρέπει να αναλάβει φορτία κατά το δυνατόν ταχύτερα ώστε να περιορισθεί η περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας και συνεπώς η αποδιοργάνωση της δομής της βραχώμαζας. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πλεονεκτεί ως προς την άποψη αυτή επειδή βρίσκεται σε απόλυτη επαφή με την περιβάλλουσα βραχώμαζα (και συνεπώς η παραμικρή σύγκλιση του τοιχώματος προκαλεί τη φόρτισή του) και επιπλέον έχει μικρό χρόνο πήξεως (μερικές ώρες). Η χρήση αγκυρίων βράχου σε κανονικό κλίμα οπλίζει την περιβάλλουσα βραχώμαζα και συντελεί στην καλύτερη ανάπτυξη της λειτουργίας τόξου στη βραχώμαζα. Πράγματι, η τάση της βραχώμαζας να παραμορφωθεί διαμηκικά προκαλεί (μέσω της διασταλτικότητας) την ανάπτυξη εφελκυσμού στα αγκύρια και συνεπώς θλίψης στη βραχώμαζα. Η θλίψη της βραχώμαζας αυξάνει την αντοχή της και μειώνει την παραμορφωσιμότητά της λόγω εγκιβωτισμού (λειτουργία ανάλογη με αυτή του σπειροειδούς οπλισμού στα υποστηλώματα).
4. Ολοκλήρωση του δακτυλίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο σύνολο της διατομής (δηλαδή και στο δάπεδο). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας κλειστός δακτύλιος με πολύ μικρή παραμορφωσιμότητα ώστε να περιορίζονται οι περαιτέρω συγκλίσεις του τοιχώματος. Η δημιουργία κλειστού δακτυλίου με την ταχεία σκυροδέτηση του δαπέδου (early invert closure) συντελεί τα μέγιστα στη μείωση της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας και στην ευστάθεια της διατομής. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση βραχώμαζας με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά συχνά δεν είναι απαραίτητο να ολοκληρώνεται ο δακτύλιος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, δηλαδή δεν επενδύεται με σκυρόδεμα το δάπεδο της σήραγγας.
5. Στην περίπτωση διάνοιξης σηράγγων σε βραχώμαζα με πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά ή σε εδαφικούς σχηματισμούς, είναι συνήθης η εμφάνιση φαινομένων αστάθειας του μετώπου της εκσκαφής (face instability). Τα φαινόμενα αυτά προκαλούν αύξηση της σύγκλισης και αποδιοργάνωση της δομής της βραχώμαζας με πιθανή κατάληξη την κατάρρευση της σήραγγας. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να ληφθούν μέτρα βελτίωσης της ευστάθειας του μετώπου, όπως αύξηση του αριθμού των φάσεων εκσκαφής (ώστε να μειωθούν οι διαστάσεις του μετώπου), διαμόρφωση του μετώπου με κλίση ως προς την κατακόρυφο (δηλαδή αφήνοντας έναν εδαφικό τάκο στον πόδα του μετώπου),

ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια, ενίσχυση της οροφής με ράβδους (spiles) ή δοκούς προπορείας (forepoling), κατασκευή τσιμεντενέσεων, επένδυση του μετώπου με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλπ.

6. Η πυκνότητα των μέτρων άμεσης υποστήριξης προσαρμόζεται στις επιτόπου συνθήκες. Ειδικότερα, η μέθοδος NATM βασίζεται σε μετρήσεις της συμπεριφοράς του τμήματος της σήραγγας που έχει ήδη διανοιχθεί (όπως μετρήσεις της σύγκλισης του τοιχώματος, της πίεσης της βραχώμαζας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, της θλιπτικής τάσης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλπ). Με τον τρόπο αυτό, οποιαδήποτε απόκλιση από την προηγούμενη συμπεριφορά θα πρέπει να αξιολογείται και να ερμηνεύεται, στη συνέχεια δε να αντιμετωπίζεται με κατάλληλη προσαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

Ως εκ της φύσεως της μεθόδου, ο σχεδιασμός της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης της σήραγγας θα πρέπει να είναι ευπροσάρμοστος στις επιτόπου συνθήκες. Για το σκοπό αυτό ο σχεδιασμός γίνεται ως εξής:

1. Με βάση τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών ερευνών η βραχώμαζα που αναμένεται να συναντηθεί κατά μήκος της σήραγγας κατατάσσεται σε 3-5 κατηγορίες (με βάση τα μηχανικά χαρακτηριστικά). Οι κατηγορίες αυτές συνήθως βασίζονται στα γνωστά συστήματα κατατάξεως (RMR, GSI, Q).
2. Μορφώνονται 3-5 τυπικές διατομές διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης της σήραγγας οι οποίες διαφέρουν ως προς το είδος των μέτρων υποστήριξης (π.χ. εάν διαθέτουν ενίσχυση με χαλύβδινα πλαίσια) και την πυκνότητά τους (π.χ. διάσταση του κανάβου των αγκυριών ή πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος). Οι τυπικές διατομές μπορεί να διαφέρουν και ως προς τον αριθμό των φάσεων εκσκαφής. Κατά τη μόρφωση των διατομών λαμβάνεται υπόψη ότι θα πρέπει να είναι κατασκευαστικά δυνατή η αλλαγή της διατομής της σήραγγας από τον ένα τύπο στον άλλο με σχετική ευχέρεια.
3. Διατυπώνεται ένα σύνολο κριτηρίων με βάση τα οποία θα είναι δυνατή η επιλογή της εφαρμοστέας τυπικής διατομής κατά την κατασκευή της σήραγγας. Τα κριτήρια αυτά συνήθως βασίζονται σε ένα συνδυασμό παραγόντων όπως η ποιότητα της βραχώμαζας, το πάχος των υπερκειμένων γαιών, ο προσανατολισμός των ασυνεχειών της βραχώμαζας, τα αποτελέσματα των μετρήσεων συμπεριφοράς του έργου σε προηγούμενες διατομές ή σε προηγούμενη φάση εκσκαφής στη συγκεκριμένη θέση κλπ.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η άμεση υποστήριξη της σήραγγας ακολουθείται από την κατασκευή της τελικής επένδυσης η οποία αναλαμβάνει μέρος (ή το σύνολο) των φορτίων της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Η τελική επένδυση συνήθως κατασκευάζεται μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του συνόλου του μήκους της σήραγγας αλλά οπωσδήποτε αφού η σήραγγα ισορροπήσει με την άμεση υποστήριξη, δηλαδή αφού πρακτικώς μηδενισθούν οι ρυθμοί εξέλιξης των μετακινήσεων, εντάσεων κλπ. Η τελική επένδυση συνήθως σχεδιάζεται για να αναλάβει τα εξής φορτία:

1. Το φορτίο που αναλαμβάνεται από τα αγκύρια στην περίπτωση προσωρινών αγκυριών ή στην περίπτωση βραχώμαζας με έντονα ερπυστική συμπεριφορά.
2. Μέρος του φορτίου που αναλαμβάνεται από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ώστε το απομένον φορτίο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ασφαλείας μόνιμου έργου (δεδομένου ότι κατά την άμεση υποστήριξη της σήραγγας το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να λειτουργεί με μειωμένο συντελεστή ασφαλείας προσωρινού έργου).

3. Τυχόν αυξημένα μακροχρόνια φορτία της βραχόμαζας λόγω ερπυσμού.
4. Τυχόν υδατικές πιέσεις λόγω πλημμελούς αποστράγγισης ή απρόβλεπτης απόφραξης του συστήματος αποστράγγισης.
5. Τυχόν φορτία από μελλοντικές κατασκευές που φορτίζουν τη σήραγγα.
6. Τυχόν σεισμική επιφόρτιση της σήραγγας.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM σε σχέση με τις εναλλακτικές μεθόδους (διάνοιξη με TBM ή ασπίδα) είναι τα εξής:

1. Προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβαλλόμενες γεωτεχνικές συνθήκες.
2. Προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβολές της γεωμετρίας της διατομής και στη διάνοιξη μή-κυκλικών διατομών.
3. Περιλαμβάνει μηχανικό εξοπλισμό σχετικώς μικρού κόστους και συνεπώς πλεονεκτεί οικονομικά σε σήραγγες μικρού μήκους.
4. Επιτρέπει ευκολότερη στεγάνωση της σήραγγας με συνθετική μεμβράνη (η οποία συνήθως τοποθετείται μεταξύ της άμεσης και της τελικής επένδυσης).

5.3 Φάσεις εκσκαφής

Η εκσκαφή σήραγγων με τη μέθοδο NATM συνήθως γίνεται σε περισσότερες της μιας φάσεις. Τα κυριότερα συστήματα εκσκαφής είναι:

1. Εκσκαφή μετώπου-βαθμίδας (top heading and bench).

Η εκσκαφή της σήραγγας γίνεται από πάνω προς τα κάτω. Η πρώτη φάση εκσκαφής (top heading) μπορεί να εκσκαφεί και σε περισσότερες υποφάσεις κατά το πλάτος της σήραγγας. Στην περίπτωση αυτή η πρώτη φάση ουσιαστικά αποτελεί σήραγγα-πυλώνα που χρησιμεύει και για τη διερεύνηση των συνθηκών που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

2. Εκσκαφή με πλευρικές στοές (side-wall drifts).

Η μέθοδος εφαρμόζεται σε σήραγγες μεγάλου εύρους σε βραχόμαζες με σχετικώς πτωχά χαρακτηριστικά ή στις περιπτώσεις όπου είναι κρίσιμος ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος (π.χ. σε αστικές περιοχές). Περιλαμβάνει την υποδιαίρεση της διατομής κατά το πλάτος και διάνοιξη πρώτα της μιας πλευράς και στη συνέχεια της άλλης πλευράς. Σε ιδιαίτερες δύσκολες συνθήκες η μέθοδος μπορεί να περιλάβει δυο πλευρικές στοές και ενδιάμεσο πυλώνα (twin side-wall drifts with central pillar). Στην περίπτωση αυτή πρώτα διανοίγονται οι πλευρικές στοές και στο τέλος διανοίγεται ο κεντρικός πυλώνας.

5.4 Μέτρα άμεσης υποστήριξης

5.4.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete)

Ο όρος χρησιμοποιείται για σκυροδέματα που συνίστανται από τσιμέντο, νερό και λεπτόκοκκα αδρανή (συνήθως έως 10 mm) τα οποία εφαρμόζονται με εκτόξευση (με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα). Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρασκευάζεται είτε ως ξηρό μίγμα (dry mix) με προσθήκη νερού στο στόμιο εκτοξεύσεως είτε ως υγρό μίγμα (wet mix) όπου η ανάμιξη με νερό γίνεται στον αναδευτήρα κατά την παρασκευή του μίγματος. Το υγρό μίγμα χρησιμοποιείται συχνότερα στις περιπτώσεις κατανάλωσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε μεγάλες ποσότητες. Κατά την παρασκευή εκτοξευόμενου σκυροδέματος η αναλογία ανάμιξης είναι η εξής (για την παραγωγή ενός κυβικού μέτρου βάρους 2250-2350 kg):

- Τσιμέντο: 400-450 kg

- Αδρανή (διάσταση κόκκου έως 10mm): 1600-1700 kg
- Παιπάλη πυριτίου (micro-silica): 30-50 kg
- Επιταχυντής πήξεως: 10-15 kg
- Νερό: 200-250 kg

Η παιπάλη πυριτίου είναι μια λεπτόκοκκη ποζουλάνη η οποία αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) που παράγεται κατά την ενυδάτωση του τσιμεντού και συντελεί στην αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος και τη μείωση της διαπερατότητάς του. Επιπλέον με την προσθήκη της ποζουλάνης επιτυγχάνεται μείωση της αναπήδησης (rebound) κατά την εκτόξευση, βελτίωση της πρόσφυσης στη βραχώμαζα και δυνατότητα αύξησης του πάχους της στρώσης του νωπού σκυροδέματος (λόγω αύξησης του ιξώδους και της πρόσφυσης) έως και σε 200mm.

Η αντοχή και η πλαστιμότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μπορούν να αυξηθούν με την προσθήκη μεταλλικών ινών (steel fibres) οι οποίες δρουν ως οπλισμός. Η προσθήκη μεταλλικών ινών ως οπλισμού του εκτοξευόμενου σκυροδέματος τείνει να αντικαταστήσει την όπλιση με μεταλλικά πλέγματα (wire mesh reinforcement). Η συνήθης αναλογία μεταλλικών ινών είναι 40-60 kg ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος. Η προσθήκη μεταλλικών ινών πλεονεκτεί ως προς τη χρήση μεταλλικού πλέγματος και για τους εξής λόγους:

1. Δεν προκαλεί αυξημένη αναπήδηση (rebound) του σκυροδέματος όπως το μεταλλικό πλέγμα.
2. Δεν υπόκειται σε ηλεκτρολυτική διάβρωση (corrosion) επειδή οι ίνες δεν είναι συνεχείς όπως το μεταλλικό πλέγμα.
3. Η χρήση των ινών είναι ταχύτερη και κατασκευαστικά ευκολότερη απ' ό,τι η χρήση μεταλλικού πλέγματος ιδίως στην περίπτωση που η επιφάνεια της βραχώμαζας είναι αρκετά ανώμαλη.

5.4.2 Αγκύρια βράχου

Τα αγκύρια βράχου διακρίνονται σε δυο κατηγορίες:

- (α) Προεντεταμένα αγκύρια, (tensioned cables) που αποτελούνται από χαλύβδινους τένοντες (strands) και βασίζονται στην ενεργητική φόρτιση της βραχώμαζας λόγω της προέντασης.
- (β) Παθητικά αγκύρια (rock-bolts) των οποίων η λειτουργία βασίζεται στη φόρτισή τους λόγω της παραμόρφωσης της βραχώμαζας.

Τα παθητικά αγκύρια διακρίνονται σε αγκύρια συνεχούς πρόσφυσης (fully bonded) και πρόσφυσης άκρου (end anchored).

Τα αγκύρια πρόσφυσης άκρου είναι συνήθως τύπου διαστελόμενης κεφαλής.

Στα αγκύρια συνεχούς πρόσφυσης ανήκουν οι εξής τύποι:

- (α) Οι ηλώσεις βράχου (grouted nails) που αποτελούνται από μια χαλύβδινη ράβδο (τυπικά ράβδο οπλισμού St1V διαμέτρου 20-25mm) η οποία τοποθετείται εντός οπής στη βραχώμαζα (διαμέτρου 38-50mm) που πληρούται με ένεμα (τσιμεντένεμα ή ένεμα συνθετικής ρητίνης). Οι ηλώσεις αυτές είναι συνήθως προσωρινές (δηλαδή έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής) μπορούν όμως να λειτουργήσουν και ως μόνιμες με κατάλληλη προστασία από τη διάβρωση (double corrosion protection).
- (β) Οι ηλώσεις χωρίς ενεμάτωση τύπου Swellex (που παράγονται από την εταιρεία Atlas-Corpc) ή τύπου Split-Set (που παράγονται από την εταιρεία Ingersoll-Rand). Οι ηλώσεις αυτές αποτελούνται από κοίλη μεταλλική διατομή και αποκτούν συνεχή πρόσφυση με τη βραχώμαζα με εισπίεση νερού στο εσωτερικό της διατομής που προκαλεί τη διόγκωσή της. Λόγω έλλειψης προστασίας από τη

διάβρωση αλλά και λόγω της λεπτότοιχης διατομής τα αγκύρια αυτά έχουν μικρή διάρκεια ζωής. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι ότι αναλαμβάνουν φορτία πολύ γρήγορα επειδή δεν απαιτούν την πήξη του ενέματος για την επίτευξη πρόσφυσης με την περιβάλλουσα βραχόμαζα.

5.4.3 Χαλύβδινες νευρώσεις

Οι χαλύβδινες νευρώσεις λειτουργούν κυρίως ως οπλισμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την αύξηση της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητάς του αλλά και για τη βελτίωση της δυνατότητας ανάληψης φορτίων. Οι χαλύβδινες νευρώσεις τοποθετούνται κατά τη διατομή της σήραγγας και είναι των εξής τύπων:

1. Τυποποιημένες διατομές, συνήθως πλατύπελμες HEB100-160.
2. Δικτυωτά πλαίσια (lattice girders) που αποτελούνται από ράβδους οπλισμού και συνδετήρες με τη μορφή χωροδικτυώματος.
3. Συστοιχίες χαλύβδινων ράβδων οπλισμού (π.χ. 4-6 ράβδοι Φ28 σε παράλληλη διάταξη συνδεδεμένες με εγκάρσιους συνδετήρες σε αποστάσεις της τάξεως του μέτρου).

5.4.4 Σχεδιασμός των μέτρων άμεσης υποστήριξης

Ο σχεδιασμός των μέτρων άμεσης υποστήριξης μπορεί να γίνει με αναλυτικές μεθόδους από τις οποίες υπολογίζονται τα φορτία στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας και στη συνέχεια ελέγχεται η επάρκεια των μέτρων υποστήριξης για την ανάληψη των φορτίων αυτών. Έχουν αναπτυχθεί και εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης των απαιτούμενων μέτρων άμεσης υποστήριξης. Μια τέτοια μέθοδος είναι η μέθοδος NGI (βλέπε Σχήμα 5) που βασίζεται στο σύστημα Q.

5.5 Παρακολούθηση της συμπεριφοράς σηράγγων

5.5.1 Γενικά

Η επιτυχής διάνοιξη και προσωρινή υποστήριξη σηράγγων με τη μέθοδο NATM βασίζεται σε σημαντικό βαθμό στη συστηματική παρακολούθηση της συμπεριφοράς της σήραγγας και στη συνεχή προσαρμογή των χαρακτηριστικών της διάνοιξης και υποστήριξης με βάση τα αποτελέσματα της παρακολούθησης (π.χ. τροποποίηση του βήματος εκσκαφής και της διαδικασίας τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, πύκνωση ή αραιώση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, τροποποίηση του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, τροποποίηση του μήκους των αγκυρίων, προσθήκη αγκυρίων σε χαρακτηριστικές θέσεις κλπ). Η παρακολούθηση της συμπεριφοράς της σήραγγας γίνεται μέσω συστηματικών μετρήσεων και κατάλληλης αξιολόγησής των.

Κατά τη διάνοιξη και υποστήριξη σηράγγων συνήθως μετρούνται τα εξής:

1. Μετακινήσεις: του τοιχώματος της σήραγγας, της βραχόμαζας που περιβάλλει τη σήραγγα και της επιφάνειας του εδάφους.
2. Πιέσεις: της βραχόμαζας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, υδατικές πιέσεις στο έδαφος που περιβάλλει τη σήραγγα.
3. Δυνάμεις: εφελκυσμός στα αγκύρια, θλίψη/κάμψη στα χαλύβδινα πλαίσια.
4. Παροχή διηθήσεων υπογείων υδάτων.

Στα επόμενα περιγράφονται συνοπτικά οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις ανωτέρω μετρήσεις. Σημειώνεται ότι το είδος των

μετρήσεων, οι θέσεις τοποθέτησης των οργάνων μέτρησης, η συχνότητα των μετρήσεων, οι τρόπος της αξιολόγησής τους, τα αποδεκτά όρια των μετρήσεων και, τέλος, οι ενέργειες που θα πρέπει να αναλαμβάνονται σε περίπτωση που οι μετρήσεις υπερβούν τα αποδεκτά όρια θα πρέπει να αποτελούν αντικείμενο ειδικής μελέτης. Δεν είναι σπάνια η περίπτωση που οι μετρήσεις γίνονται μεν αλλά δεν αξιολογούνται ή δεν είναι γνωστά τα μέγιστα αποδεκτά όρια ή, τέλος, δεν έχουν αποφασισθεί οι ενέργειες σε περίπτωση υπέρβασης των αποδεκτών ορίων.

5.5.2 Μετρήσεις των μετακινήσεων

5.5.2.1 Μετακινήσεις του τοιχώματος της σήραγγας

1. Τοπογραφική αποτύπωση της μετακίνησης σε τρεις άξονες (3-D convergency). Αμέσως μετά την εκσκαφή της σήραγγας τοποθετούνται στο τοίχωμα (με κατάλληλα βλήτρα) οπτικοί ανακλαστήρες (reflex targets). Οι συντεταγμένες στο χώρο των ανακλαστήρων μετρούνται σε τακτά διαστήματα με τοπογραφικό όργανο (total station). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να παρακολουθείται η χρονική εξέλιξη της μετακίνησης ενός σημείου του τοιχώματος της σήραγγας ή η σχετική απόσταση μεταξύ δυο σημείων του τοιχώματος. Η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από την απόσταση σκόπευσης, την ακρίβεια του οργάνου αλλά και άλλους παράγοντες όπως η θερμοκρασία του αέρα και η παρουσία καυσαερίων στη σήραγγα. Η συνήθης ακρίβεια τέτοιων μετρήσεων είναι 2-4mm.
2. Χωροσταθμική υψομετρική αποτύπωση (levelling). Με τοπογραφικό όργανο (χωροβάτη) μετράται το υψόμετρο στόχων που τοποθετούνται στο δάπεδο και τις παρειές της σήραγγας. Η συνήθης ακρίβεια των μετρήσεων αυτών είναι 1-2mm.
3. Μέτρηση της απόστασης μεταξύ δυο σημείων στο τοίχωμα της σήραγγας με μεταλλική μετροταινία (tape extensometer). Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξεως του 0.5mm.

5.5.2.2 Μετακινήσεις της βραχόμαζας

1. Εκτασιόμετρα ράβδου τοποθετούμενα εντός γεωτρήσεων (multi-point rod extensometers). Εντός γεώτρησης τοποθετούνται μεταλλικές ράβδοι των οποίων το ένα άκρο πακτώνεται εντός της γεώτρησης (με κάποιο σύστημα αγκύρωσης) και το άλλο άκρο προεξέχει ελαφρώς από το στόμιο της γεώτρησης. Στην ίδια γεώτρηση μπορούν να τοποθετηθούν περισσότερες της μιας ράβδοι που πακτώνονται σε διάφορα βάθη. Με το όργανο αυτό μετράται η σχετική μετακίνηση του σημείου πακτώσεως της ράβδου ως προς το στόμιο της γεώτρησης (δηλαδή ως προς το τοίχωμα της σήραγγας, εφόσον οι γεωτρήσεις γίνονται από το εσωτερικό της σήραγγας).
2. Μαγνητικά εκτασιόμετρα τοποθετούμενα εντός γεωτρήσεων (magnetic probe extensometers). Εντός γεώτρησης τοποθετείται πλαστικός σωλήνας ο οποίος φέρει μεταλλικούς δακτυλίους σε τακτά διαστήματα (π.χ. ανά 0.50m). Ο σωλήνας πακτώνεται εντός της γεωτρήσεως με τσιμεντένεμα. Κατά τη μέτρηση, εισάγεται στο σωλήνα μια βολίδα η οποία με μαγνητική μέθοδο μετρά την απόσταση μεταξύ των δακτυλίων. Η σχετική μετακίνηση των δακτυλίων δίνει την παραμόρφωση της βραχόμαζας αφού οι δακτύλιοι παρακολουθούν τη μετακίνηση της βραχόμαζας.
3. Ολισθαίνοντα εκτασιόμετρα (sliding micrometer). Εντός γεώτρησης τοποθετείται ειδικός πλαστικός σωλήνας ο οποίος σε τακτά διαστήματα φέρει μεταλλικούς δακτυλίους κατάλληλου σχήματος (measuring marks). Ο σωλήνας πακτώνεται

εντός της γεώτρησης με τσιμεντένεμα. Κατά τη μέτρηση εισάγεται στο σωλήνα μεταλλικό στέλεχος που ολισθαίνει κατά μήκος του σωλήνα και σταματά (κλειδώνει) στις θέσεις των μεταλλικών δακτυλίων. Με τον τρόπο αυτό μετράται η σχετική απόσταση μεταξύ των δακτυλίων με μεγάλη ακρίβεια (της τάξεως του 0.01mm). Η σχετική μετακίνηση των δακτυλίων δίνει την παραμόρφωση της βραχόμαζας αφού οι δακτύλιοι παρακολουθούν τη μετακίνηση της βραχόμαζας.

4. Αποκλισιόμετρα (inclinometers). Εντός γεώτρησης τοποθετείται (και πακτώνεται με τσιμεντένεμα) ειδικός πλαστικός σωλήνας. Κατά τη μέτρηση εισάγεται εντός του σωλήνα ειδική βολίδα η οποία εφαρμόζει ακριβώς και ολισθαίνει κατά μήκος του σωλήνα. Η βολίδα διαθέτει ένα ηλεκτρονικό σύστημα (ηλεκτρονικό εκκρεμές) με το οποίο καταγράφεται η απόκλιση από την κατακόρυφο της βολίδας σε κάθε θέση. Με ολοκλήρωση των αποκλίσεων μπορεί να υπολογισθεί η μετακίνηση του σωλήνα σε διεύθυνση εγκάρσια προς τον άξονά του. Τα αποκλισιόμετρα συνήθως τοποθετούνται από την επιφάνεια του εδάφους σε κατακόρυφη διεύθυνση και μετρώνται οι οριζόντιες αποκλίσεις του σωλήνα με την πάροδο του χρόνου.

5.5.2.3 Μετακινήσεις (βυθίσεις) της επιφάνειας του εδάφους

Οι βυθίσεις (καθιζήσεις) της επιφάνειας του εδάφους λόγω της κατασκευής υπογείων έργων μπορούν να μετρηθούν με τα εξής όργανα:

1. Με χωροσταθμική υψομετρική αποτύπωση (levelling) με χρήση χωροβάτη.
2. Με οριζοντίως διατεταγμένα αποκλισιόμετρα (electro-levels). Με τα όργανα αυτά μετράται η απόκλιση από την οριζόντια διεύθυνση σε διάφορα σημεία μιας πρακτικώς οριζόντιας γραμμής (π.χ. κατά μήκος του δαπέδου ενός κτιρίου). Με ολοκλήρωση των αποκλίσεων μπορεί να υπολογισθούν οι βυθίσεις των σημείων της αρχικώς οριζόντιας γραμμής.
3. Με όργανα μέτρησης του ανοίγματος ρωγμών (crack meters). Τέτοια όργανα τοποθετούνται π.χ. στη μεσοτοιχία γειτονικών κτιρίων με σκοπό να μετρηθεί η σχετική απομάκρυνσή τους.

5.5.3 Μετρήσεις των πιέσεων

1. Οι εδαφικές πιέσεις στην επένδυση της σήραγγας μπορούν να μετρηθούν με κύτταρα πιέσεως (pressure cells) που τοποθετούνται στη διεπιφάνεια κατά την κατασκευή της επένδυσης.
2. Οι υδατικές πιέσεις στο έδαφος γύρω από μια σήραγγα μπορούν να μετρηθούν με πιεζόμετρα. Τα πιεζόμετρα είναι διαφόρων τύπων: υδραυλικά (stand-pipe), ηλεκτρικά (vibrating wire, strain gauge) ή πνευματικά (pneumatic).

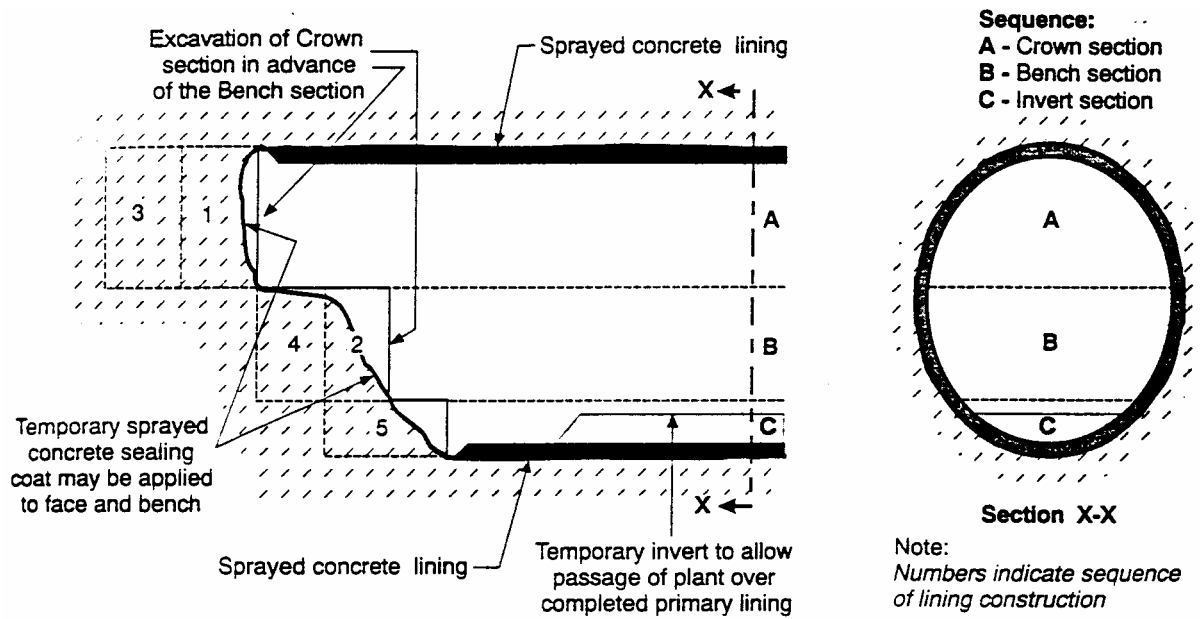
5.5.4 Μετρήσεις δυνάμεων

1. Φορτία εφελκυσόμενων ή θλιβόμενων στοιχείων (π.χ. αγκύρια, χαλύβδινα πλαίσια κλπ) μπορούν να μετρηθούν με την τοποθέτηση ηλεκτρομηκυσιομέτρων (strain gauges) ή μετρητών φορτίου (load cells) κατά την κατασκευή των φορτιζόμενων στοιχείων. Στην περίπτωση που είναι επιθυμητή η μέτρηση του φορτίου σε ένα φορτιζόμενο στοιχείο στο οποίο δεν έχει τοποθετηθεί εκ των προτέρων σύστημα μέτρησης, η συνηθέστερη μέθοδος είναι η μέθοδος της αποφόρτισης με δειγματοληψία (overcoring). Κατά τη μέθοδο αυτή ανοίγεται μια μικρή οπή στο φορτιζόμενο στοιχείο, τοποθετείται ένα σύστημα τριών ηλεκτρομηκυσιομέτρων τα οποία στη συνέχεια πακτώνονται εντός της οπής με εποξειδική ρητίνη. Στη

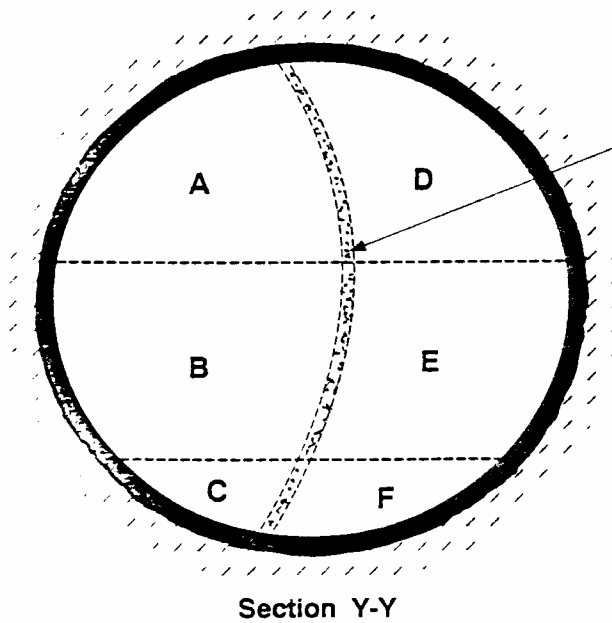
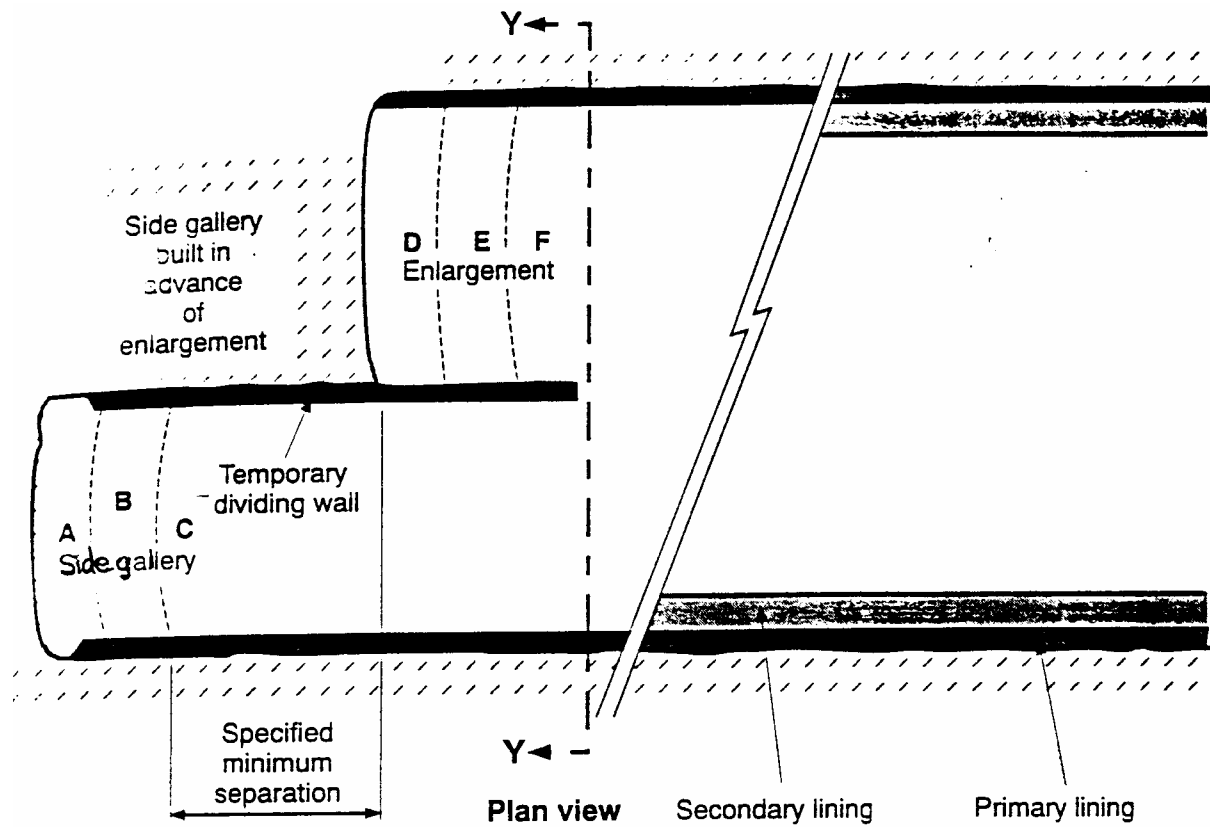
συνέχεια αφαιρείται ένα αρκετά μεγάλο τμήμα του φορτιζόμενου στοιχείου που περιλαμβάνει και τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα. Κατά την αφαίρεση (overcoring) το στοιχείο αποφορτίζεται και τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα φορτίζονται με φορτίο ίσο και αντίθετο με το φορτίο του στοιχείου πριν αφαιρεθεί.

5.5.5 Μετρήσεις παροχών

Η μέτρηση υδατικών παροχών εντός της σήραγγας γίνεται με παροχόμετρα ή με σύστημα ελεγχόμενης υπερχειλίσισης.



Σχήμα 2: Διάνοιξη σήραγγας σε τρεις φάσεις καθ' ύψος (top heading-bench-invert)



Side gallery:

A - Crown section Side gallery

B - Bench section Side gallery

C - Invert section Side gallery

Enlargement:

D - Crown section Enlargement

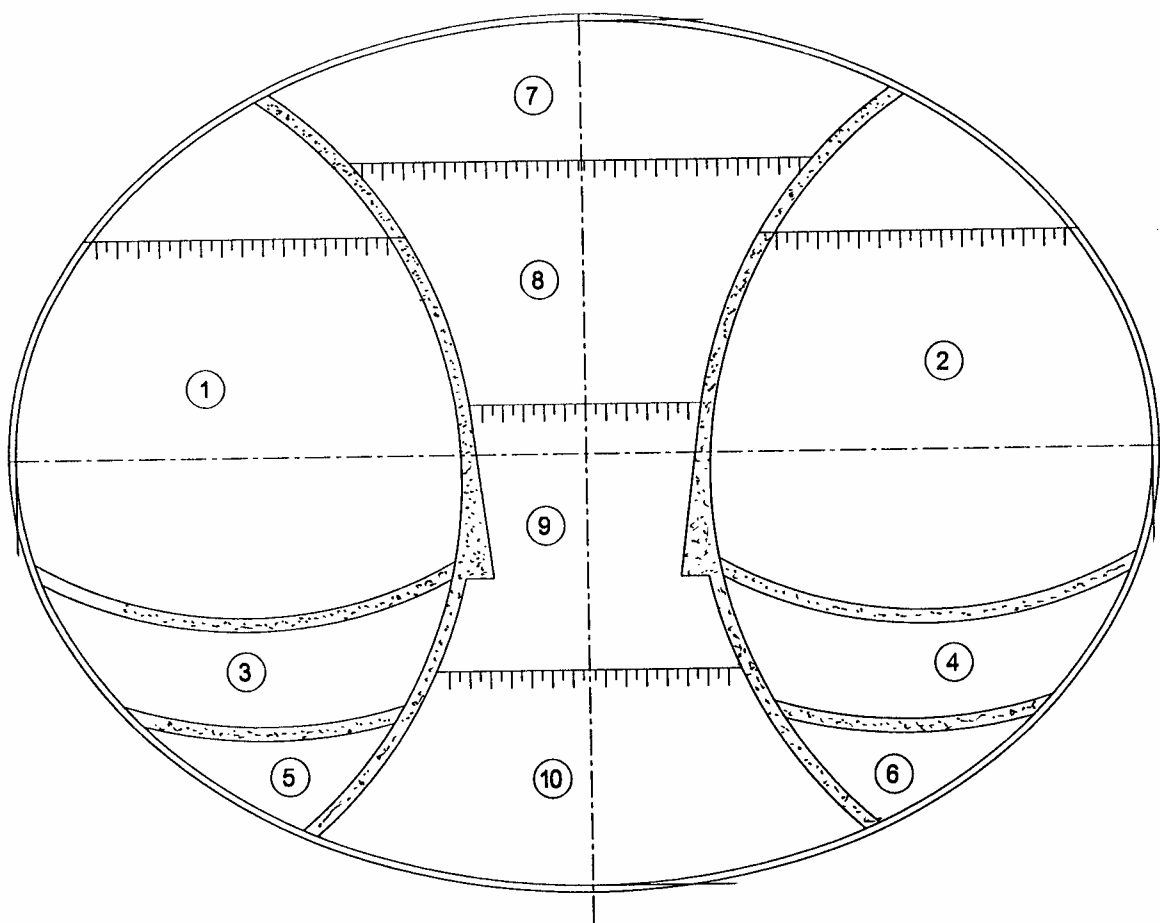
E - Bench section Enlargement

F - Invert section Enlargement

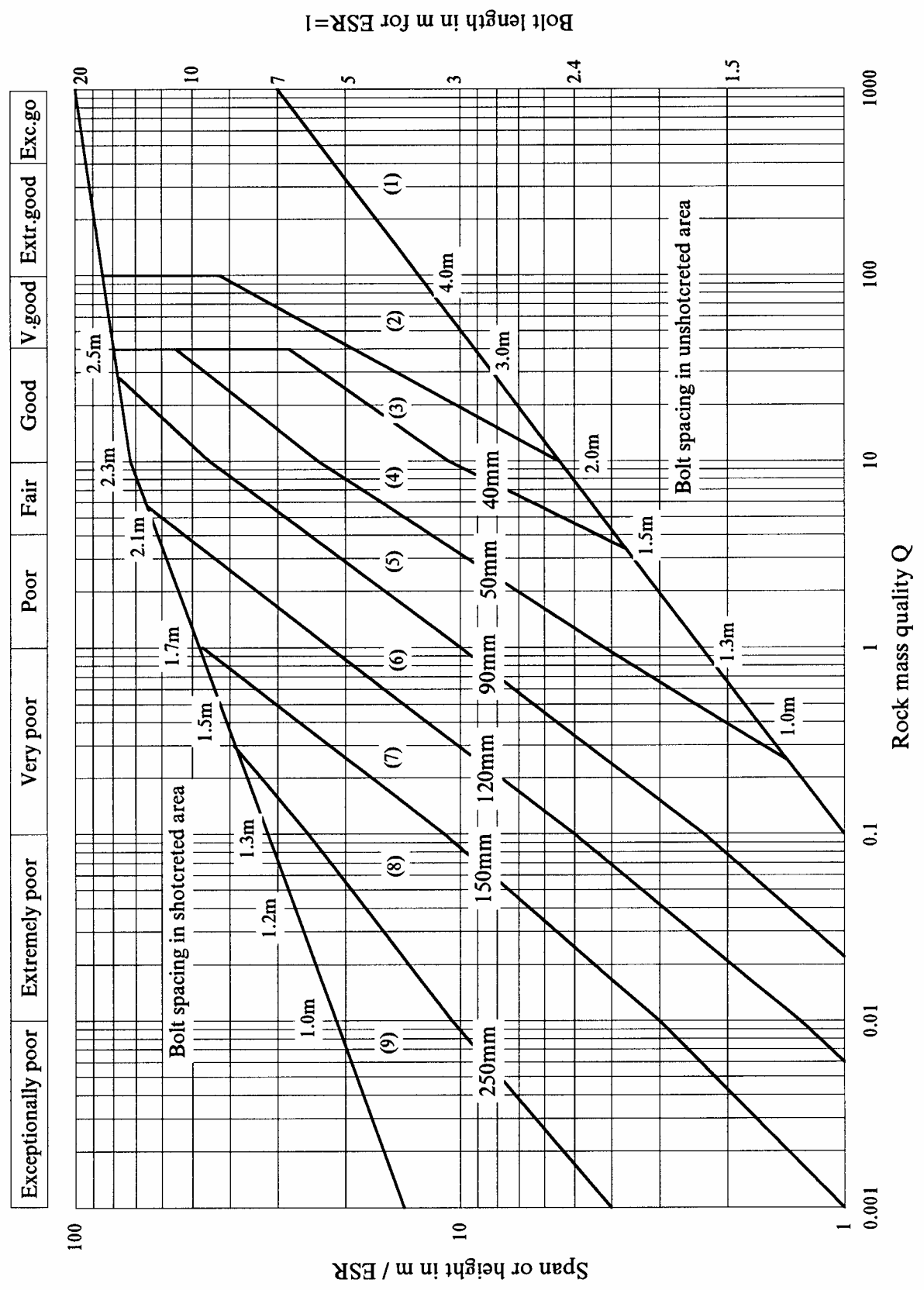
Note :

The temporary wall is normally removed after the full ring (section A-F) has been completed

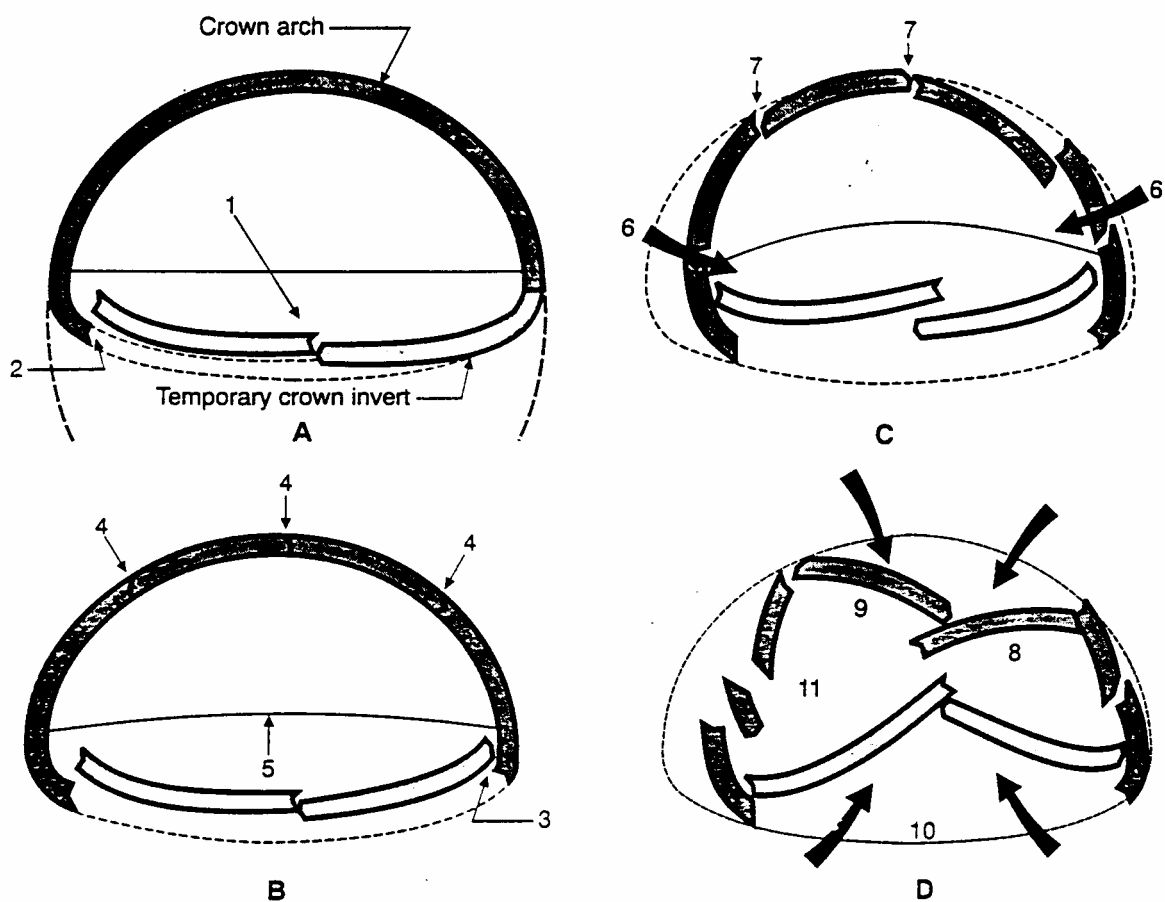
Σχήμα 3: Διάνοιξη σήραγγας σε έξι φάσεις (δύο κατά πλάτος και τρεις καθ' ύψος)



Σχήμα 4: Διάνοιξη σήραγγας με δυο πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα



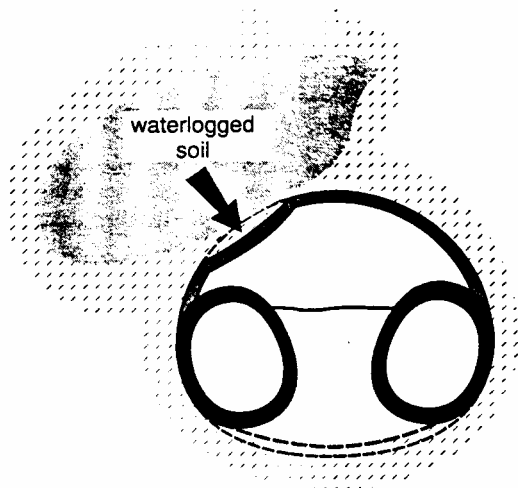
Σχήμα 5: Εκτίμηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης κατά το σύστημα Q (NGI)



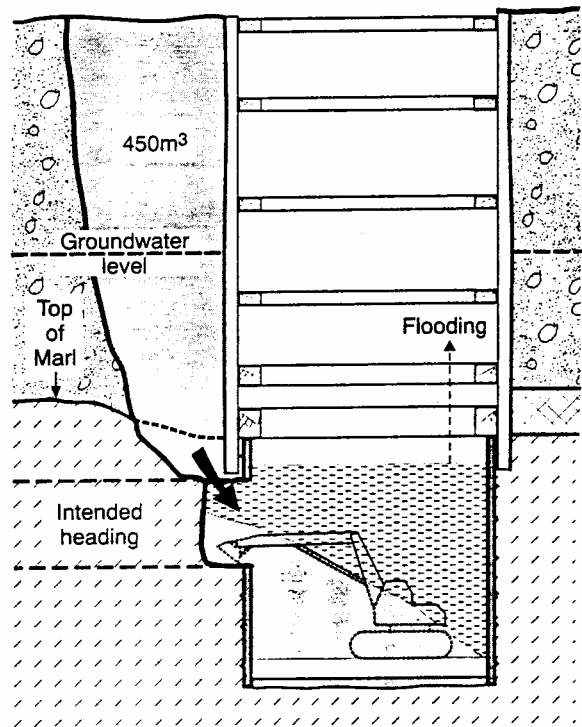
- | | |
|--|--|
| <p>A. 1. Overstressing of the temporary inverted arch to the crown section.
 2. Shear failure of the temporary invert to the crown section west.</p> <p>B. 3. Shear failure of the temporary invert to the crown section east.
 4. Shear and bending cracks in the crown lining.
 5. Heaving of the crown invert</p> | <p>C. 6. Horizontal movement of the crown footings.
 7. Opening of cracks in crown arch.</p> <p>D. 8. Collapse of the eastern sidewall.
 9. Collapse of the western sidewall.
 10. Arching up of the tunnel invert.
 11. Fragmented elements of the crown.</p> |
|--|--|

Incident at Landrucken tunnel, Germany
(after John, Wogan & Heissel, 1987)

Σχήμα 6: Τύποι αστοχίας σηράγγων



Incident at Krieburg tunnel, Germany.
(after Leichnetz & Schlitt, 1987)



Incident at Munich, Germany
(after Weber, 1987)

Σχήμα 7: Τύποι αστοχίας σηράγγων