



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΣΧΟΛΗ: ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ: ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ

ΑΙΤΙΕΣ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ »

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ-ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Βγενοπούλου Ειρήνη

Καθηγήτρια

ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΕΣ:

Μουργελά Άννα

Νάτση Μαρία

ΠΑΤΡΑ 2022

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με την αστοχία τμημάτων των σηράγγων κατά την διαδικασία κατασκευής τους. Αναφέρονται αρχικά οι τρόποι κατασκευής των σηράγγων και γίνεται εστίαση στις συνθήκες και τα αίτια κατάρρευσης, μερικής ή ολικής, κατά την διάρκεια της κατασκευής του έργου. Τέλος, συγκεντρώνονται και ομαδοποιούνται οι κυριότερες αιτίες αστοχίας.

Για την ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας σημαντική βοήθεια αποτέλεσε η συνεργασία από πρόσωπα του Ιδρύματος. Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτρια Βγενοπούλου Ειρήνη, για την εμπιστοσύνη και την συμπαράσταση που μας έδειξε σε όλη την διάρκεια της εργασίας καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια που προσέφερε σε όλα τα στάδια της εργασίας. Οι παρατηρήσεις της κατά την διάρκεια συγγραφής της εργασίας ήταν εποικοδομητικές και συνέλαβαν στην διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με τις πιθανές αιτίες αστοχιών σηράγγων κλειστών διανοίξεων που μπορούν να προκληθούν κατά την διάρκεια της κατασκευής από διάφορες παραμέτρους, με συνέπεια την κατάρρευση της σήραγγας και τον κίνδυνο της ανθρώπινης ζωής.

Το 1^ο κεφάλαιο μιλάει για τις μεθόδους κατασκευής οδικών σηράγγων.

Το 2^ο κεφάλαιο αναφέρει τις μεθόδους κατασκευής μικρών σηράγγων.

Το 3^ο κεφάλαιο αναφέρει τα κατασκευαστικά στοιχεία σηράγγων, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της.

Το 4^ο κεφάλαιο αναφέρει κάποιες περιπτώσεις αστοχιών σηράγγων, πως μπορεί μια σήραγγα να αστοχήσει και να προκαλέσει κατάρρευση.

Το 5^ο κεφάλαιο περιγράφει τους τρόπους αντιμετώπισης αστοχιών για ανακατασκευή της σήραγγας.

ABSTACT

This thesis deals with the possible causes of closed tunnel failures that can be caused during construction by various parameters, resulting in the collapse of the tunnel and the risk of human life.

The 1rd chapter talks about road tunnel construction methods.

The 2rd chapter mentions the construction methods of small tunnels.

The 3rd chapter mentions the construction elements of tunnels, the materials used for its construction.

The 4rd chapter mentions some cases of tunnel failures, how a tunnel can fail and cause a collapse.

The 5rd chapter describes the failure modes for tunnel reconstruction.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT.....	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	9
1.1) ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (CUT AND COVER)	10
1.2) ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ (Bored Tunnel Method)	12
1.2.1 Μέθοδος TBM.....	12
1.2.2 Μέθοδος NATM.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	26
2.1) ΜΕΘΟΔΟΣ Clay Kicking.....	26
2.2) ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΟΥΤΙΟΥ (Box Jacking Method)	27
2.3) ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ (Pipe Jacking Method)	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ NATM.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	69
4.1 ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	153
4.1.1 Αστοχία κατασκευαστικών στοιχείων	153
4.1.2 Συνάντηση σηράγγων με προϋπάρχουσες κατασκευές	154
4.1.3 Αστοχίες με την μέθοδο TBM.....	154
4.1.4 Εισροή υδάτων	156
4.1.5 Αστοχία γεωϋλικού διέλευσης της σήραγγας λόγω τοπικής διαφοροποίησης.....	157
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	161
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	166

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΣΗΡΑΓΓΑ καλείται η υπόγεια διάβαση που επιτρέπει να διασχίσει κανείς ένα βουνό, έναν λόφο ή ακόμα να περάσει κάτω από ένα ποτάμι. Αποτελεί δηλαδή δίοδο για πεζούς, ποδηλάτες και οχήματα.

Μερικές σήραγγες χρησιμοποιούνται ως δημόσια έργα (έργα οδοποιίας, υδραγωγεία, κατασκευασμένες αποκλειστικά για την μεταφορά νερού, για κατανάλωση ή σαν αποχετευτικός αγωγός), ενώ άλλες παρέχουν φιλοξενία τηλεπικοινωνιακών καλωδίων και ως ορυχεία που χρησιμοποιούνται για την διάρκεια εξόρυξης μεταλλευμάτων που επιτρέπουν στους εργάτες και στα μηχανήματα την πρόσβαση σε βαθιά ορυκτά κοιτάσματα. Υπάρχουν ακόμα και σήραγγες που είναι απαραίτητες για την διέλευση ορισμένων σημείων από ζώα υπό εξαφάνιση και για τις κυκλοφοριακές μεταφορές μέσα από βουνά ή κάτω από ποτάμια. Μερικές μυστικές σήραγγες έχουν κατασκευαστεί ως μέσο για την είσοδο ή διαφυγή από μια περιοχή. Αντίθετα υπάρχουν υποβρύχιες σήραγγες όπου η κατασκευή που έχει γίνει κάτω από το νερό για να περάσει μέσα από αυτήν. Εάν η κατασκευή της γέφυρας δεν είναι δυνατή, τότε η κάτω από το νερό σήραγγα είναι καλή επιλογή.



Εικόνα: Υποβρύχια σήραγγα

Στις σήραγγες όπως όλα τα τεχνικά έργα παρατηρούνται κατασκευαστικές αστοχίες. Λόγω της ιδιαιτερότητας του έργου αυτού το οποίο κατασκευάζεται κάτω από την επιφάνεια της γης με αντίξοες διαφορετικές και διαφορετικές κάθε φορά συνθήκες, το ποσοστό των αστοχιών είναι μεγαλύτερο.

ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Για τα δομικά στοιχεία η ελάχιστη διάρκεια ζωής σχεδιασμού για τις υπόγειες κατασκευές σηράγγων είναι 100 ετών. Οι σήραγγες και άλλες υπόγειες κατασκευές δεν απαιτούν δομική συντήρηση καθ' όλη την διάρκεια ζωής σχεδιασμού. Η μελέτη προβλέπει την αποδοτική συντήρηση στοιχείων και την δυνατότητα ασφαλούς για τα οποία δεν μπορεί να επιτευχθεί η ελάχιστη διάρκεια ζωής σχεδιασμού δομικών στοιχείων. Η δαπάνη της συντήρησης αυτής πρέπει να ληφθεί υπόψιν για όλη την διάρκεια ζωής σχεδιασμού.

ΣΚΟΠΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

- Ασφαλής κατασκευή σήραγγας.
- Προσδιορισμός απαραίτητων μέτρων υποστήριξης και χρονισμός τοποθέτησης σε όλο το μήκος της σήραγγας.
- Προσδιορισμός μηκών εφαρμογής κάθε κατηγορίας μέτρων υποστήριξης.
- Προσδιορισμός προβληματικών περιοχών και γεωλογικών (γεωτεχνικών) κινδύνων κατά μήκος της σήραγγας.
- Μέθοδος διάνοιξης και μεθοδολογία εκσκαφής-άμεση υποστήριξη.
- Προετοιμασία σχεδίου και διαδικασιών/ δράσεων για να αντιμετωπισθούν δύσκολες συνθήκες (γεωλογικές/ γεωτεχνικές), συμβάντα και απρόβλεπτα γεγονότα λαμβάνοντας υπόψιν το δυσμενέστερο σενάριο.

Σαν βασική έννοια μια σήραγγα είναι ένας κοίλος σωλήνας που διαπερνά μέσα από το έδαφος ή πέτρα. Πριν την κατασκευή μια σήραγγας αναγκαία είναι η εμπειρική

μελέτη κατάστασης του εδάφους. Αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης της μελέτης είναι κατάλληλη επιλογή μηχανημάτων και των μεθόδων διάνοιξης. Ο προσανατολισμός μια σήραγγας θα βελτιστοποιηθεί με βάση την γεωτεχνική μελέτη ώστε να αποφευχθεί το ασταθές ή πολύ σκληρό έδαφος. Ο όγκος των πετρωμάτων και η ακριβής περιοχή των ελλαττωματικών ζωνών που αποτελούν συμβατικές μέθοδοι της γεωτεχνικής μελέτης δεν παράγουν επαρκείς πληροφορίες για την εκτίμησή τους. Αυτό αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα σε σήραγγες μεγάλης διαμέτρου. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών προτείνεται να κατασκευαστεί μια πιλοτική σήραγγα μικρής διαμέτρου ή φρεάτιο. Η συγκεκριμένη σήραγγα υποστηρίζεται εύκολα όταν προκύψουν απρόβλεπτες συνθήκες.

Οι σήραγγες κατασκευάζονται σε διάφορους τύπους υλικών, από μαλακό πηλό μέχρι και σκληρά πετρώματα και η μέθοδος εκσκαφής εξαρτάται από τις συνθήκες του εδάφους. Μέθοδοι που χρησιμοποιούμε για την κατασκευή υπόγειων έργων και σιράγγων είναι η κλειστή διάνοιξη (TBM), η Cut and Cover σε κατοικημένες και ακατοίκητες περιοχές και η μέθοδος NATM.

Η κατασκευή μιας σήραγγας αποτελεί μια από τις πιο σύνθετες προκλήσεις στον τομέα των έργων του πολιτικού μηχανικού. Παρόλα αυτά αυτό δεν σημαίνει ότι ορισμένα έργα της σήραγγας δεν έχουν συναντήσει σοβαρά εμπόδια. Για παράδειγμα σήραγγες που μαστίζονται από μαζικές υπερβάσεις κόστους ή κατάρρευση οροφής που οδηγεί στον θάνατο. Ένα από τα εμπόδια που παρουσιάζονται στην ολοκληρωμένη κατασκευή έργων προέρχονται από τις αστοχίες σιράγγων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Μια κατασκευή σήραγγας είναι μια υπόγεια διάδοος που παρέχεται κάτω από την επιφάνεια της γης ή το νερό. Στις περισσότερες περιπτώσεις η κατασκευή της σήραγγας είναι δαπανηρή, αλλά εξοικονομεί χρόνο και παρέχει άνεση. Με τη διαθεσιμότητα σύγχρονου εξοπλισμού, η εκσκαφή έχει γίνει ευκολότερη. Οι σήραγγες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δρόμους, σιδηροδρόμους, ακόμη και ως πλωτές οδούς. Σε πολλές πόλεις, τα υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα του μετρό λειτουργούν μέσα σε μια σήραγγα.

Η θεωρητική αντιμετώπιση της συμπεριφοράς των σηράγγων σε πετρώματα όπως είναι γνωστό έχει πολλές αβεβαιότητες. Αυτές που οφείλονται:

- 1) Στην ανισοτροπία του βραχώδους υλικού (διαφορά στη μηχανική συμπεριφορά στις διάφορες διευθύνσεις).
- 2) Στα υπολογιστικά μοντέλα που στηρίζονται σε απλοποιήσεις και δεν λαμβάνουν υπόψη αλληλεπιδράσεις όπως π.χ. εξωτερικού δακτυλίου-βράχου.

Μπορεί να αξιοποιηθεί η μέχρι σήμερα εμπειρία σε κατασκευές σηράγγων αν ομαδοποιηθούν οι διάφορες περιπτώσεις και ποιότητες βράχων. Η ομαδοποίηση των κατηγοριών των πετρωμάτων με ανάλογες ιδιότητες ώστε να αντιστοιχούν παρόμοια μέτρα υποστήριξης, οδήγησε στις λεγόμενες εμπειρικές μεθόδους.

ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κατασκευαστικών τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί για την κατασκευή υπόγειων έργων και σηράγγων. Οι τύποι που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- Μέθοδος ανοικτού ορύγματος (Cut and Cover)
- Μέθοδος κλειστής διάνοιξης (Bored Tunnel Method)

1.1) ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ (CUT AND COVER)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται γενικά για την κατασκευή ρηχών σηράγγων δηλαδή όταν το έργο είναι μικρό σε βάθος. Σε αυτή τη μέθοδο, κόβεται μια τάφρος στο έδαφος και καλύπτεται από κάποιο στήριγμα που μπορεί να φέρει φορτίο σε αυτό. Η κοπή μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Η μία είναι η μέθοδος από κάτω προς τα πάνω κατά την οποία μια σήραγγα ανασκάπτεται κάτω από την επιφάνεια χρησιμοποιώντας υποστήριξη εδάφους (down-up). Η άλλη είναι η μέθοδος από πάνω προς τα κάτω κατά την οποία τα πλευρικά τοιχώματα στήριξης κατασκευάζονται πρώτα με τη μέθοδο της τοιχοποιίας με συνεχή διάνοιξη πασσάλων (up-down). Στη συνέχεια τοποθετείται στέγη στην κορυφή των τοίχων και πραγματοποιείται εκσκαφή. Τέλος, κατασκευάζεται πλάκα βάσης. Οι περισσότεροι από τους σιδηροδρομικούς σταθμούς του υπόγειου μετρό κατασκευάζονται με τη μέθοδο Cut and Cover.

Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος Cut and Cover διακρίνεται σε ακατοίκητες (η κατασκευή γίνεται από κάτω προς τα πάνω) και σε κατοικημένες περιοχές (η κατασκευή γίνεται από πάνω προς τα κάτω).



Εικόνα 1.1: Κατασκευή σήραγγας με την μέθοδο Cut and Cover σε ακατοίκητη περιοχή

• ΜΕΘΟΔΟΣ CUT AND COVER ΣΕ ΑΚΑΤΟΙΚΗΤΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

-Η εκσκαφή γίνεται σε όλο το εύρος μέχρι το βάθος που θα εδρασθεί το έργο.

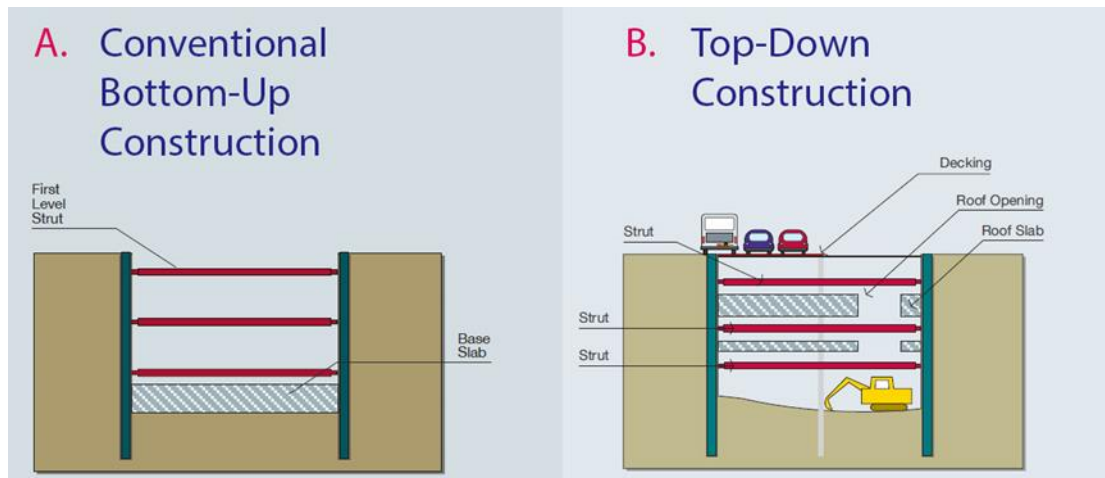
-Δεν γίνεται αντιστήριξη των παρειών αλλά διαμόρφωση των πρανών με την κατάλληλη κλίση.

-Η στάθμη των υπόγειων νερών υποβιβάζεται κατά τη διάρκεια του έργου.

• ΜΕΘΟΔΟΣ CUT AND COVER ΣΕ ΚΑΤΟΙΚΗΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

-Η κατασκευή δεν πρέπει να προκαλέσει ζημιές σε οικοδομές, δίκτυα ύδρευσης, αποχέτευσης, καλώδια κ.λπ.

-Ανάλογα με τις πολεοδομικές ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής εφαρμόζεται η αντιστηριζόμενη εκσκαφή χωρίς κάλυψη και με κάλυψη.



Εικόνα Α: Κατασκευή σήραγγας με την μέθοδο Cut and Cover σε ακατοίκητες περιοχές.

Εικόνα Β: Κατασκευή σήραγγας με την μέθοδο Cut and Cover σε κατοικημένες περιοχές.

1.2) ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ (Bored Tunnel Method)

Η μέθοδος κλειστής διάνοιξης αποτελεί την σύγχρονη τεχνολογία. Χρησιμοποιούνται μηχανές διάνοιξης σήραγγας που λειτουργούν αυτόματα, διευκολύνοντας όλη την διαδικασία διάνοιξης σήραγγας. Αποτελεί την πιο γρήγορη διαδικασία και είναι καλή μέθοδος για την κατασκευή σήραγγας σε περιοχές υψηλής κυκλοφορίας. Η κατασκευή γίνεται σε υπόγεια εκσκαφή χωρίς την διαταραχή της επιφάνειας του εδάφους.

Οι μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη σηράγγων κυκλικής μόνο διατομής. Πραγματοποιούν ταυτόχρονα:

- Διάνοιξη (εκσκαφή του μετώπου).
- Υποστήριξη του μετώπου.
- Αποκομιδή των προϊόντων εκσκαφής.
- Τοποθέτηση της οριστικής επένδυσης.

Υπάρχουν πολλά είδη μηχανημάτων TBM ανάλογα με το είδος του πετρώματος ή του εδάφους στο οποίο πρόκειται να διανοίγει η σήραγγα. Διακρίνεται σε δύο κύριες μεθόδους:

- Μέθοδος TBM
- Μέθοδος NATM

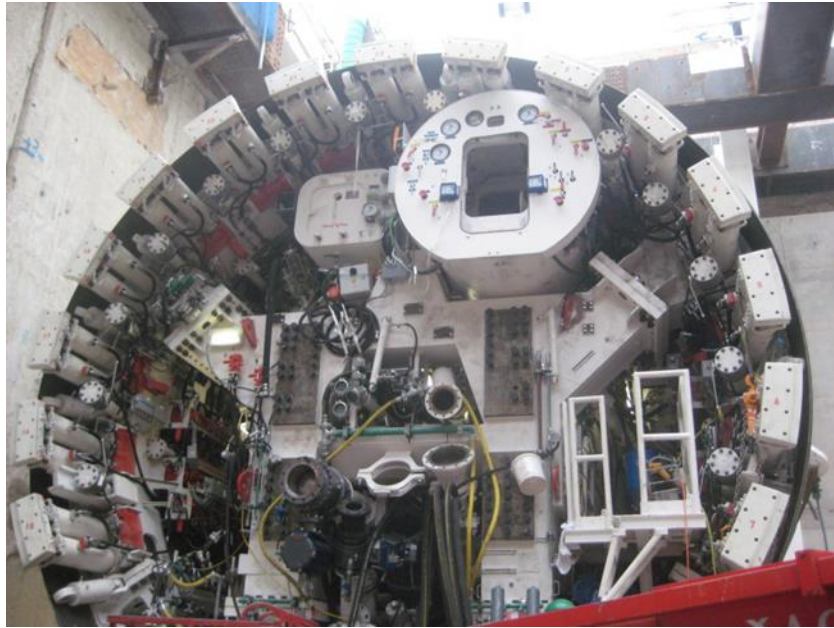
1.2.1 Μέθοδος TBM

Οι μηχανές διάνοιξης σηράγγων TBM διατίθενται σε διαφορετικούς τύπους κατάλληλους για διαφορετικές συνθήκες εδάφους. Αυτά τα μηχανήματα χρησιμοποιούνται σε δύσκολες συνθήκες παραδείγματος χάρη σε κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Στους εργαζόμενους απαγορεύεται να εισέλθουν σε αυτό διαμέρισμα εκτός από εργασίες επισκευής. Η δυσκολία που αντιμετωπίζει η μέθοδος TBM είναι το μεγάλο βάρος του με αποτέλεσμα η μεταφορά να είναι δύσκολη και δαπανηρή. Η κατασκευή σηράγγων με την μέθοδο TBM μπορεί να συμβεί με

διάνοιξη σε βράχο ή σκληρό έδαφος και με διάνοιξη σε μαλακό έδαφος. Τα μηχανήματα διάνοιξης διακρίνονται σε:

- 1) Μηχανήματα συμπιεσμένου αέρα (Compressed air).
- 2) Μηχανήματα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB).
 - Ανοικτού τύπου
 - Ημίκλειστου τύπου
 - Κλειστού τύπου
- 3) Μηχανήματα υγρής υποστήριξης (Slurry).
- 4) Μηχανήματα διάνοιξης μικρών διαμέτρων (Micro-TBM).
- 5) Μηχανήματα διάνοιξης TBM με ασπίδα (Shielded).
- 6) Μηχανήματα διάνοιξης TBM μικτής κεφαλής (Mixed face).
- 7) Μηχανήματα διάνοιξης TBM που χρησιμοποιούν πολτό η υγρά για υποστήριξη (Slurry).
- 8) Μηχανήματα TBM εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB).
- 9) Μηχανήματα TBM για διάνοιξη σε σκληρό βράχο (Hard Rock).
- 10) Μηχανήματα TBM διεύρυνσης οπών (Reamer).
- 11) Μηχανήματα διάνοιξης TBM πολλαπλών κεφαλών (Multi head).
- 12) Στα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBM).
- 13) Στα μηχανήματα σημειακής κοπής.

Στην λειτουργία μηχανήματος συμπιεσμένου αέρα, το μπροστινό μέρος του μηχανήματος ασπίδας από το μέτωπο μέχρι την αίθουσα λειτουργίας είναι εφοδιασμένο με φράγματα αέρα, παράγοντας μια αρκετή ισχυρή πίεση ώστε να κρατήσει το εισρέον υγρό. Γίνεται εφικτή μόνο σε βάθος νερού 30-50 m.



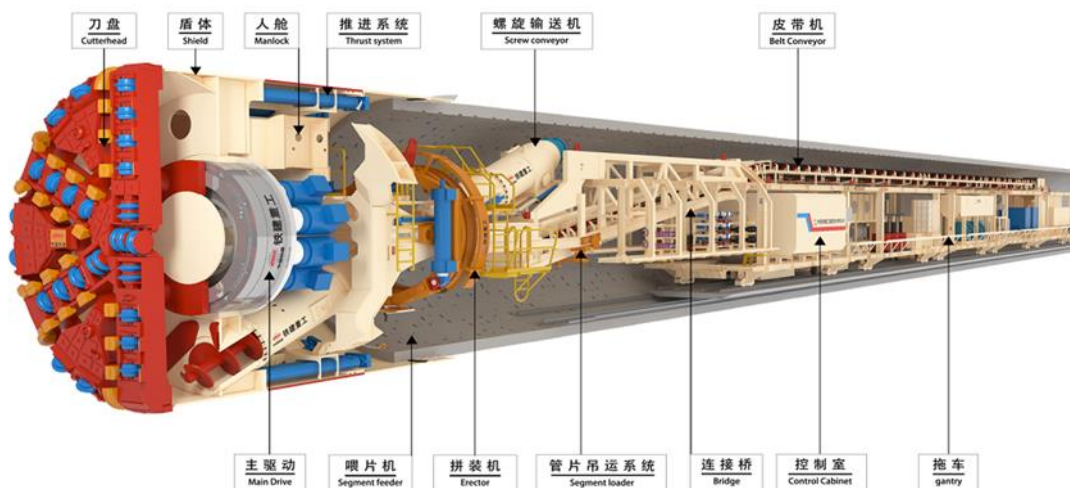
Εικόνα 1.2: Μηχανή συμπιεσμένου αέρα

Αντίθετα στα μηχανήματα υγρής υποστήριξης, η διαφορά αυτού του μηχανήματος σε σχέση με τα άλλα μηχανήματα TBM είναι ότι εγκαθιστούν ένα διάφραγμα πίσω από το μέτωπο όπου χύνεται πολτός μετονίτη με στόχο την σταθεροποίηση του μετώπου όπου γίνεται η αποκοπή. Το εκσκαμμένο υλικό αποτελείται από 10% στερεά και 90% υγρά.



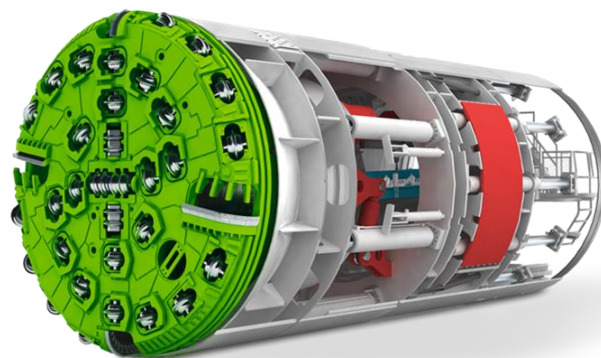
Εικόνα 1.3: Μηχανή υγρής υποστήριξης

Η τεχνολογία EPB στοχεύει στην χρήση ανασκαμμένου εδάφους ως μέσω υποστήριξης στην αίθουσα ανασκαφής. Ο ανοικτός τύπος EPB εφαρμόζεται συνεκτικό έδαφος και σε εδάφη χαμηλής διαπερατότητας ή βραχώδες. Ο ημίκλειστος τύπος EPB εφαρμόζεται σε μαλακό έδαφος με χαμηλή ή υψηλή συνεκτικότητα με εσωκλεισμένη στραγγισμένη άμμο. Ο κλειστός τύπος EPB εφαρμόζεται σε ασταθές μαλακό έδαφος με υψηλές πιέσεις νερού και υψηλή διαπερατότητα ή στον διασπασμένο βράχο όπου υπάρχει υψηλή διείσδυση νερού.



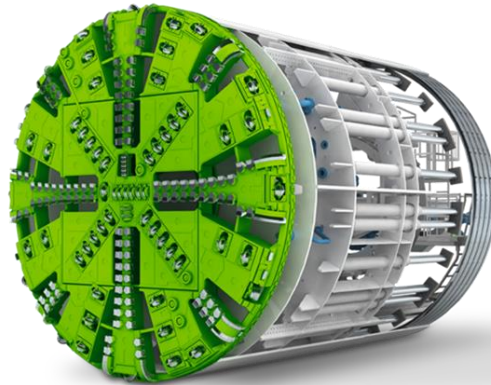
Εικόνα 1.4: Τεχνολογία EPB

Τα μηχανήματα διάνοιξης TBM με ασπίδα (Shielded) χρησιμοποιούνται σε μαλακό έδαφος πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.



Εικόνα 1.5: Μηχανή διάνοιξης με ασπίδα (Shielded)

Τα μηχανήματα διάνοιξης TBM μικτής κεφαλής (Mixed face) χρησιμοποιούνται σε μικτό έδαφος πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.



Εικόνα 1.6: Μηχανή διάνοιξης μικτής κεφαλής (Mixed face)

Τα μηχανήματα διάνοιξης TBM που χρησιμοποιούν πολτό ή υγρά για υποστήριξη (Slurry) βρίσκονται σε χονδρόκοκκο μαλακό έδαφος κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Αντίθετα τα μηχανήματα TBM εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB) βασίζονται σε λεπτόκοκκο μαλακό έδαφος κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Τα μηχανήματα TBM για διάνοιξη σε σκληρό βράχο (Hard Rock) βρίσκονται σε σκληρό βράχο.



Εικόνα 1.7: Μηχανή διάνοιξης σε σκληρό βράχο (Hard Rock)

Τα μηχανήματα TBM διεύρυνσης οπών (Reamer) χρησιμοποιούνται σε σκληρό βρόχο και τα μηχανήματα διάνοιξης TBM πολλαπλών κεφαλών (Multi head) σε όλα τα εδάφη.



Εικόνα 1.8: Μηχανή διάνοιξης πολλαπλών κεφαλών (Multi head)

Στα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBM) όπου τα μηχανήματα αυτά διακρίνονται στα μηχανήματα με ασπίδα και χωρίς ασπίδα και στα μηχανήματα Reamer και τα μηχανήματα σημειακής κοπής όπου τα μηχανήματα αυτά διακρίνονται στα μηχανήματα Road headers και OFS.



Εικόνα 1.9: Μηχανή σημειακής κοπής (Road headers)



Εικόνα 1.10: Μηχανή Reamer

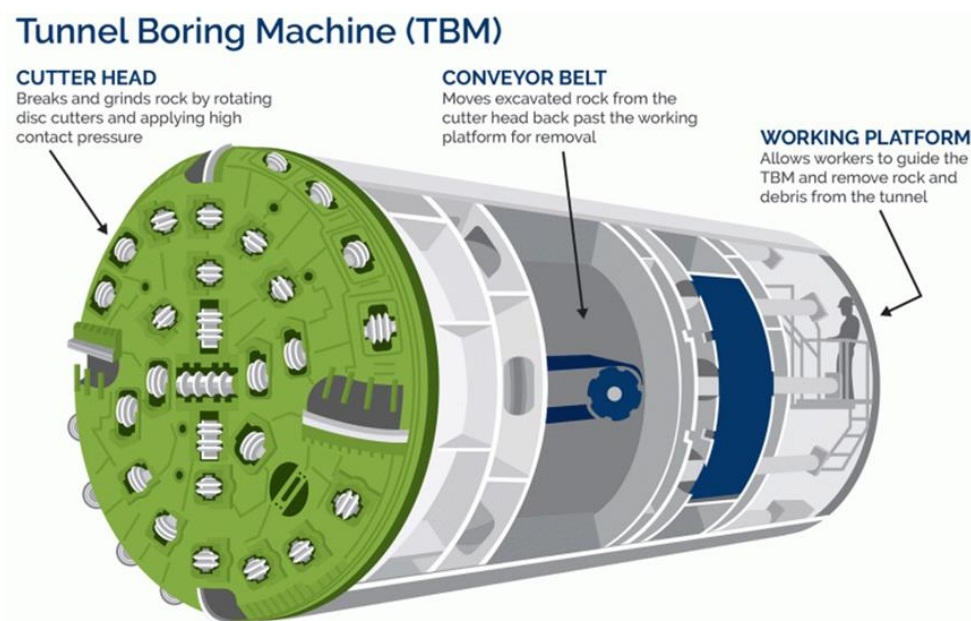
ΔΟΜΗ ΤΩΝ TBM

Γενικά αποτελούνται από τα εξής μέρη:

- Ολομέτωπη κοπτική κεφαλή (τύμπανο προώθησης) εξοπλισμένη με διάφορα κοπτικά εργαλεία ανάλογα με το είδος του προς διάνοιξη υλικού (δίσκοι για πετρώματα, σιαγόνες για εδάφη).
 - Εξασφαλίζει και τη στήριξη του μετώπου (μηχανική, υδραυλική, με πεπιεσμένο αέρα, με εδαφική πίεση, με πολτό).
 - Υπάρχουν ανοίγματα για την αλλαγή των κοπτικών εργαλείων.
 - Περιστρέφεται και προς τις δύο διευθύνσεις για να αυτοκαθαρίζονται οι σιαγόνες.
 - Υπάρχουν ανθρωποθυρίδες για τον έλεγχο του υλικού ώστε να αποφεύγεται η καταστροφή των αρχαιολογικών ευρημάτων.
 - Σε παραλλαγή, αντί της κεφαλής μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκσκαπτικό μηχάνημα το οποίο εργάζεται υπό την προστασία ασπίδας.
- Μεταλλική κυλινδρική ασπίδα για την ακτινική υποστήριξη της σήραγγας (εφόσον το είδος του εδάφους το απαιτεί). Είναι υδατοστεγής.
- Θάλαμο εργασίας πίσω από την κοπτική κεφαλή.

- Ανυψωτική μηχανή που μεταφέρει και τοποθετεί την επένδυση στο πίσω μέρος της ασπίδας.
- Επένδυση που αποτελείται από προκατασκευασμένα θολωτά στοιχεία από μπετόν (θολίτες) τα οποία συνδεόμενα μεταξύ τους σχηματίζουν έναν πλήρη δακτύλιο υποστήριξης (8 θολίτες). Είναι υδατοστεγής.
- Σύστημα αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής. Τα προϊόντα απομακρύνονται με μεταφορική ταινία (ατέρμονα) η οποία τα μεταφέρει σε βαγονέτα τα οποία κινούνται σε σιδηροτροχιές και τα μεταφέρουν έξω από τη σήραγγα.

Οι μηχανές TBM έχουν διάμετρο έως και 12m. Η απόδοσή τους κυμαίνεται από 15 έως 30 m /ημέρα.



Εικόνα 1.11: Μηχανή διάνοιξης με την μέθοδο TBM

ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΤΥΠΟΙ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ TBM (Διάνοιξη και μη κυκλικής διατομής)

Πλεονεκτήματα

- Η ταχύτητα προχώρησης είναι μεγάλη.
- Η διαδικασία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη.
- Επιτυγχάνεται ελάχιστη διαταραχή στα περιβάλλοντα πετρώματα.
- Επίτευξη απολύτως επιθυμητού μεγέθους της διατομής με ελάχιστη υπερεκσκαφή.
- Μεγαλύτερη ασφάλεια Διανοίγει μόνο κυκλικές διατομές.

Μειονεκτήματα

- Απαιτείται μεγάλο κεφάλαιο αρχικής επένδυσης.
- Το μηχάνημα κατασκευάζεται κατά παραγγελία και για συγκεκριμένες συνθήκες.
- Υπάρχει δυσκολία προσαρμογής σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.
- Δεν εφαρμόζεται σε όλα τα πετρώματα.
- Διανοίγει μόνο κυκλικές διατομές.

1.2.2 Μέθοδος NATM

Η μέθοδος NATM αποτελεί μία από τις κλασσικές μεθόδους κλειστής διάνοιξης σηράγγων. Περιλαμβάνει:

- Εκσκαφή με συμβατικά μηχανικά μέσα ή εκρηκτικά.
- Αποκομιδή προϊόντων εκσκαφής με φορτηγά.
- Υποστήριξη εκσκαφής με:
 - Χαλύβδινα τόξα ή/και
 - Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή/και

·Αγκύρια

- Τελική επένδυση σήραγγας με έγχυτο σκυρόδεμα.

Η μέθοδος NATM χρησιμοποιεί βραχώδες υλικό στο τμήμα φέροντα οργανισμού της σήραγγας, χρησιμοποιώντας «αποθέματα» διατμητικής αντοχής με στόχο την αυτουποστήριξη ή την ανάγκη μικρής υποστήριξης.

Με τον τρόπο αυτόν οι εύκαμπτες κατασκευές στήριξης αντικατέστησαν την θέση των αντικοινομικών και άκαμπτων στηρίξεων που υπήρχαν στο παρελθόν. Πριν την διάνοιξη της οπής αναφέρεται η παραδοχή ότι ο βράχος συμπεριφέρεται σαν ελαστικό μέσο. Μετά την διάνοιξης της οπής γίνεται ανακατανομή των δυσμενέστερων τάσεων κοντά στην εκσκαφή.

Η μέθοδος NATM περιλαμβάνει κάποιες παραδοχές μελέτης. Οι παραδοχές μελέτης είναι οι εξής:

·Κυκλική διατομή και οριζόντια σήραγγα.

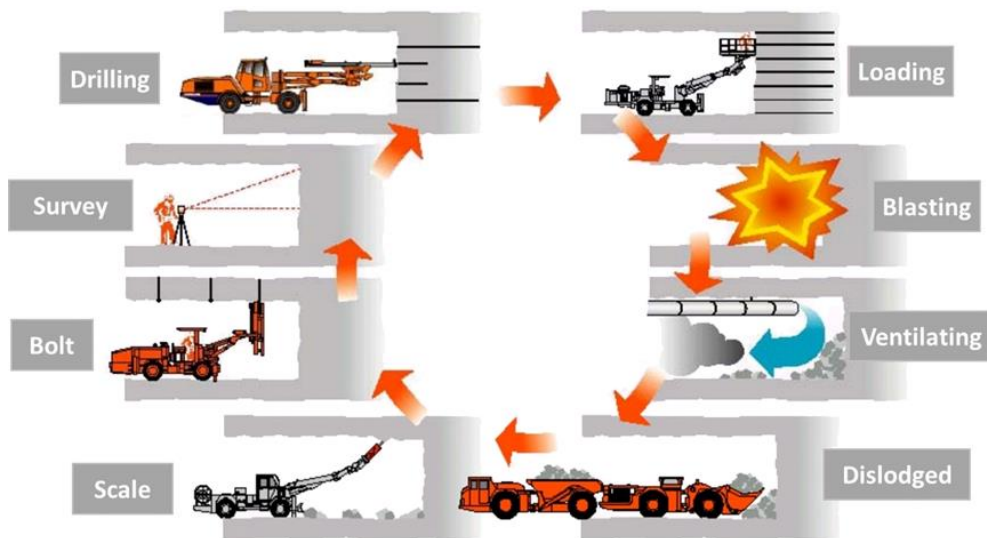
·Δεν υπάρχει παραμόρφωση με συνιστώσα παράλληλη στον άξονα της σήραγγας.

·Αγνοείται το βάρος του βράχου.

·Για το πεδίο τάσεων γίνεται παραδοχή ότι δεν υπάρχουν πλευρικές παραμορφώσεις.



Εικόνα 1.12: Κατασκευή σήραγγας με την μέθοδο NATM



Εικόνα 1.13: Εκσκαφή με συμβατικά μέσα ή εκρηκτικά

Η ΜΕΘΟΔΟΣ NATM ΣΕ ΚΑΤΟΙΚΗΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

- Οι παραμορφώσεις πρέπει να περιοριστούν στο ελάχιστο.
- Τα μέτρα υποστήριξης πρέπει να εφαρμοστούν αμέσως.
- Ο εξωτερικός δακτύλιος να έχει υψηλό μέτρο ακαμψίας.
- Για τον περιορισμό των παραμορφώσεων χρειάζεται να γίνουν τα εξής:
 - Να επιλεγεί τμηματική εκσκαφή της διατομής.
 - Να γίνει γρήγορη ολοκλήρωση του εξωτερικού δακτυλίου με την κατασκευή στο δάπεδο ανεστραμμένου τόξου (invert).
 - Να τοποθετηθεί σύστημα προεντεταμένων αγκυρίων το οποίο θα μετατοπίσει το δακτύλιο προς τη σήραγγα και θα μηδενίσει τις συγκλίσεις.



Εικόνα 1.14: Σήραγγα με την μέθοδο NATM σε κατοικημένες περιοχές

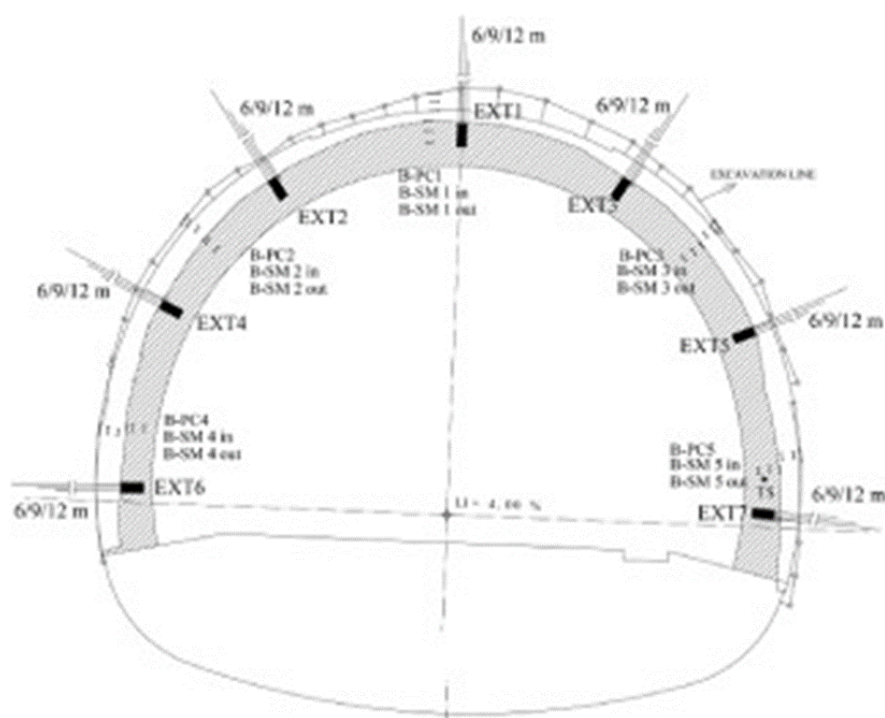
Αν τοποθετήσουμε εύκαμπτη υποστήριξη που να εμποδίζει τις μετακινήσεις σε μια σήραγγα, δημιουργούμε υψηλές πιέσεις γύρω από το άνοιγμα. Η υποστήριξη θα πρέπει να γίνεται όταν περατωθούν οι πλαστικές παραμορφώσεις και θα πρέπει να είναι εύκαμπτη με μοναδικό σκοπό την εμπόδιση φαινομένων φαινομένων χαλάρωσης της βραχομάζας επαρκώντας μια στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Σε περίπτωση που υπάρχουν βραχώδη υλικά που παρουσιάζουν φαινόμενα αποκόλλησης τμημάτων τότε η υποστήριξη θα είναι πλήρης. Η εύκαμπτη υποστήριξη θα αποκαταστήσει την ισορροπία προβάλλοντας αντίσταση, η οποία θα εμποδίζει τις μετακινήσεις. Όσο μεγαλύτερη αντίσταση θα προβάλλει ο δακτύλιος, τόσο λιγότερο θα αξιοποιείται η διατμητική αντοχή του βράχου, με αποτέλεσμα να υπάρχει αλληλεπίδραση βράχου-υποστήριξης. Ο δακτύλιος περιλαμβάνει τον εξωτερικό και τον εσωτερικό δακτύλιο.

Ο εξωτερικός δακτύλιος ονομάζεται εύκαμπτη υποστήριξη. Ο εξωτερικός δακτύλιος έχει ως στόχο την εμπόδιση χαλάρωσης της βραχομάζας, επιτρέποντας την μείωση της ακτίνας της σήραγγας. Η μικρή παρεμπόδιση των παραμορφώσεων αναπτύσσει πιέσεις στον βράχο, ο οποίος βράχος ασκεί ίσες και αντίθετες πιέσεις στον εξωτερικό δακτύλιο. Όσο ισχυρή είναι η υποστήριξη, τόσο ισχυρές πιέσεις δέχεται ο βράχος και τόσο πιο ισχυρές δέχεται ο δακτύλιος. Κατά τον σχεδιασμό, ο

εξωτερικός δακτύλιος πρέπει να ασκεί τις μικρότερες δυνατές πιέσεις. Ο εξωτερικός δακτύλιος αποτελείται από:

- 1) Μία ή περισσότερες στρώσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος, με πάχος η καθεμία από 5 cm έως 10 cm συνήθως με χαλύβδινο πλέγμα και χαλύβδινες ίνες.
- 2) Χαλύβδινα τόξα ολισθαίνοντα, δηλαδή να επιτρέπουν τη μείωση της διατομής της σήραγγας (τις συγκλίσεις).
- 3) Σύστημα αγκυρίων.

Για τον σχεδιασμό του εξωτερικού δακτυλίου, ο δακτύλιος πρέπει να ασκεί τις μικρότερες δυνατές πιέσεις και πρέπει να σχεδιαστεί με κάποιο τρόπο έτσι ώστε να επιτρέπει τις παραμορφώσεις και επομένως να ασκεί μηδενική πίεση στο πέτρωμα άρα να του ασκείται επίσης μηδενική πίεση.



Εικόνα 1.15: Εξωτερικός δακτύλιος

Ο εσωτερικός δακτύλιος ονομάζεται εσωτερική επένδυση. Ο εσωτερικός δακτύλιος για την αύξηση του συντελεστή ασφάλειας λόγω ενδεχόμενης μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων των βράχων, πιθανή αστοχία στοιχείων του εξωτερικού δακτυλίου (πχ αγκύρια) και της μεταβολή πεδίου τάσεων λόγω αλλαγών στην δόμηση των υπερκείμενων εδαφών. Επιπρόσθετα κατασκευάζεται μετά την πάροδο των παραμορφώσεων και επιλέγεται υψηλή ποιότητα μπετόν (B500) για να δημιουργηθούν μικρές εφελκυστικές τάσεις. Στην περίπτωση που υπάρχουν υπερπιέσεις τοποθετούνται αρμοί.



Εικόνα 1.16: Εσωτερικός δακτύλιος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

2.1) ΜΕΘΟΔΟΣ Clay Kicking

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για συνθήκες ισχυρού αργιλώδους εδάφους. Αυτή είναι μια παλιά μέθοδος και χρησιμοποιείται για μικρές εργασίες όπως εγκαταστάσεις σωλήνων αποχέτευσης. Στη μέθοδο αυτή, ανοίγεται μια τρύπα στο έδαφος και μετά από κάποιο βάθος ανοίγεται σήραγγα που γίνεται από το πήλινο κλωτσιό που βρίσκεται μια σανίδα σε γωνία 45°. Ένα εργαλείο εκσκαφής παρέχεται κάτω από το πήλινο πόδι. Οι εκσκαφές με αυτό το εργαλείο συλλέγονται από άλλους εργάτες. Αυτό είναι πολύ διάσημο γιατί είναι η μέθοδος που χρησιμοποιούσαν οι Άγγλοι για να βάλουν νάρκες κάτω από τη γερμανική αυτοκρατορία κατά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο.

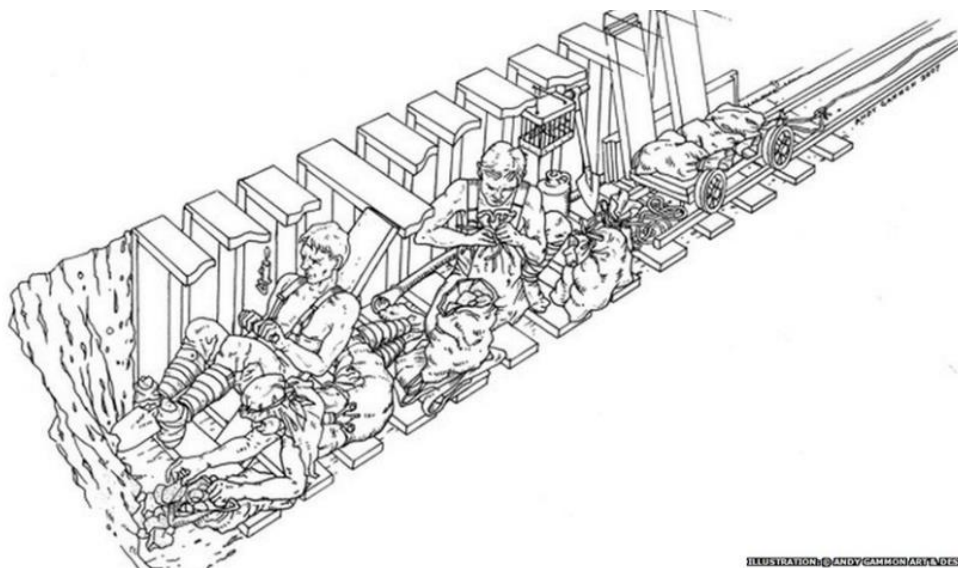


ILLUSTRATION © ANDY GAMMON ART & DESIGN

Εικόνα 2.1: Clay Kicking Method

2.2) ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΟΥΤΙΟΥ (Box Jacking Method)

Η μέθοδος κουτιού είναι παρόμοια με την ανύψωση σωλήνων κατασκευής σήραγγας. Η διαφορά της μεθόδου αυτής είναι αντί για σωλήνες, τοποθετούνται κατασκευασμένα κουτιά στο χώμα. Οι σήραγγες με μεγαλύτερο βάθος μπορούν να εκσκαφούν χρησιμοποιώντας γρύλους έως 20 m.



Εικόνα 2.2: Μέθοδος κουτιού

2.3) ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ (Pipe Jacking Method)

Η μέθοδος ανύψωσης σωλήνων χρησιμοποιείται για την κατασκευή σηράγγων κάτω από υπάρχουσες κατασκευές όπως δρόμοι, σιδηρόδρομοι κ.λπ. Σε αυτή τη μέθοδο, ειδικά κατασκευασμένοι σωλήνες οδηγούνται στο υπόγειο χρησιμοποιώντας υδραυλικούς γρύλους. Επιτρέπεται μέγιστο μέγεθος διαμέτρου 3,2 m για σήραγγες.



Εικόνα 2.3: Μέθοδος ανύψωση σωλήνων

Υπάρχουν και μηχανήματα διάνοιξης μικρών διαμέτρων (Micro-TBM) χρησιμοποιούνται σε όλα τα εδάφη.



Εικόνα 2.4: Μηχανή διάνοιξης μικρών διαμέτρων (Micro-TBM)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ NATM

Σημαντικός παράγοντας για την κατασκευή σήραγγας είναι ο καθορισμός λειτουργίας. Ο σκοπός αυτός προσφέρει αποτροπή καταπτώσεων μεμονωμένων τεμαχίων πετρώματος χωρίς προσπάθεια αποτροπής διατομής. Η περίπτωση αυτή εμφανίζεται σε κερματισμένη βραχομάζα όπου οι γεωμηχανικές ιδιότητες παρουσιάζουν μικρές τιμές που την καθιστούν επαρκή για την συγκράτηση παραμορφώσεων. Επιπρόσθετα προσφέρεται λειτουργική υποστήριξη με σκοπό την καθιέρωση παραμόρφωσης πριν την τοποθέτηση οριστικής επένδυσης. Για την υποστήριξη αυτή χρησιμοποιούνται χαλύβδινα τόξα. Τα τόξα αυτά διακρίνονται σε βαριά με δύσκαμπτες συνδέσεις για να αντέχουν μεγάλα φορτία περιορίζοντας τις παραμορφώσεις της διατομής, και σε ελαφρά που επιτρέπουν μεγάλες παραμορφώσεις αναλαμβάνοντας μικρά φορτία. Εάν οι καθιζήσεις διατηρούνται σε πολύ μικρές τιμές, χρησιμοποιούνται κλειστά πλαίσια από χάλυβα εξοπλισμένα με συστήματα διαστολής.



Εικόνα 3.1: Βραχομάζα

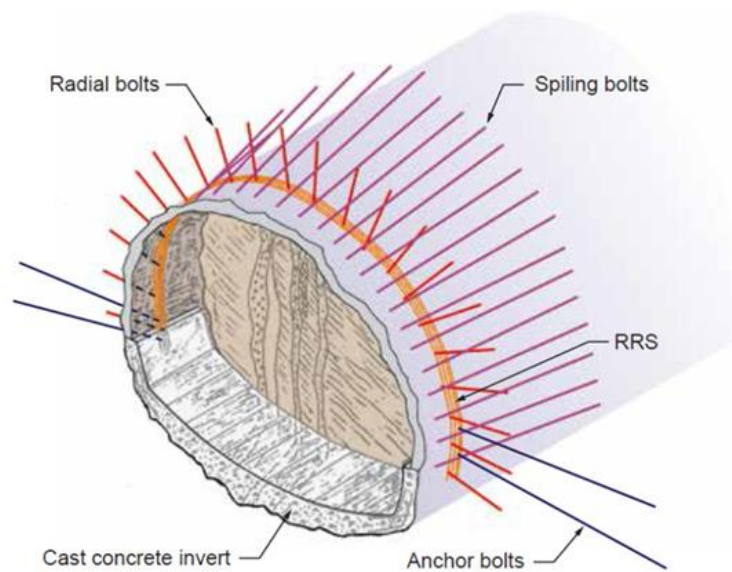
Υπάρχουν σήραγγες με ασθενείς βραχομάζες που χρησιμοποιούνται για υποστήριξη ή ενίσχυση. Για τον λόγο αυτό τοποθετούνται χαλύβδινα πλαίσια. Στην περίπτωση που στηρίζονται σωστά περιορίζουν τις παραμορφώσεις της περιβάλλουσας γεωμάζας εξαιτίας των μεγάλων ροπών αδράνειας που διαθέτουν τα χαλύβδινα πλαίσια. Μερικές διατομές βρίσκονται σε κίνδυνο ξαφνικής αστοχίας λόγω της μεγάλης αντίστασης τους στην παραμόρφωση. Αυτό συμβαίνει όταν η πίεση (λόγω παραμόρφωσης της βραχομάζας) υπερβεί την αντοχή του τόξου. Παρατηρείται κυρίως σε βαθιά μεγάλα υπόγεια έργα. Με την επιφύλαξη αυτή απαιτείται διατήρηση

του σχήματος διατομής ή έκταση ζώνης διαρροής της βραχομάζας γύρω από την σήραγγα, η οποία είναι αυστηρά περιορισμένη.



Εικόνα 3.2: Ασθενής βραχομάζα

Παράλληλα υπάρχουν σήραγγες με διάνοιξη συμπαγής βραχομάζας στις οποίες τοποθετούνται ολισθαίνοντα τόξα και χρησιμοποιούνται ως υποστήριξη-προστασία, όπου η σταθερότητα των τοιχωμάτων εξασφαλίζει μια μικρή πίεση υποστήριξης που είναι μικρότερη από την φέρουσα ικανότητα των τόξων. Ο βασικός ρόλος του τόξου είναι να προστατεύει την επιφανειακή αστοχία του πετρώματος. Τόξα που έχουν μικρό βάρος (10 έως 30 kg/m) συνδυάζονται με συρματόπλεγμα ή δομικό πλέγμα που τοποθετείται στο τοίχωμα. Το βάρος των τόξων αυτών προσαρμόζεται στο μέγεθος της σήραγγας και στις συνθήκες της βραχομάζας. Η υποστήριξη είναι κατάλληλη για σήραγγες που έχουν μικρή ή μεσαία διατομή. Τα ολισθαίνοντα τόξα χρησιμοποιούνται επίσης με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, σε διάνοιξη υπόγειων έργων με άνοιγμα που να υπερβαίνει τα 6 έως 8 m.



Εικόνα 3.3: Συμπαγής βραχομάζα

Στις τεμαχιζόμενες βραχομάζες, χαρακτηριστικό γνώρισμα αστοχιών σφήνας αποτελεί η έλλειψη προειδοποίησης. Εάν μια σφήνα πέσει από την οροφή, η αστοχία μπορεί να συμβεί όταν η βάση της σφήνας εμφανιστεί στην εκσκαφή του ανοίγματος. Για να ξεπεραστεί η αντοχή των ασυνεχειών χρησιμοποιούνται σφήνες στο πλευρικό τοίχωμα με ολίσθηση λίγων χιλιοστών κατά μήκος ενός επιπέδου ή της τομής των δύο επιπέδων. Επομένως θα πρέπει να ελαχιστοποιείται η κίνηση επάνω στις ασυνέχειες από ένα σύστημα υποστήριξης. Η υλοποίηση της σταθερότητας του τεμαχίου γίνεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται ως πρόσθετη στήριξη των σφηνών σε τεμαχιζόμενη βραχομάζα και μπορεί να είναι αποτελεσματικό αν εφαρμοστεί σωστά. Οι σφήνες πέφτουν ή ολισθαίνουν από την στιγμή που είναι εκτεθειμένες σε επιφάνεια εκσκαφής με αποτέλεσμα να χρειάζεται άμεση υποστήριξη. Τα στάδια εκσκαφής εφαρμόζονται για μεγάλες εξορύξεις όπως υπόγειοι θάλαμοι ή φρεάτια. Σε ένα υπόγειο υδροηλεκτρικό θάλαμο, η εκσκαφή ξεκινάει με μια διάνοιξη κεντρικής στέψης και στην συνέχεια ακολουθεί η εξόρυξη των κατώτερων βαθμίδων.

Σε βραχομάζες με ασυνέχειες μεγάλης εμμοσύνης σχηματίζονται μεγάλες σφήνες όπως τα επίπεδα στρώσεις σε ιζηματογενή πετρώματα. Σε πολλά μεταμορφωμένα ή πυριγενή πετρώματα, οι επιφάνειες ασυνέχειας δεν είναι συνεχείς και το μέγεθος των

σφηνών που μπορούν να σχηματίζονται περιορίζεται από την εμμονή των ασυνεχειών. Η ανάλυση μιας σφήνας ορίζεται από 3 τεμνόμενες ασυνέχειες. Για πολλές πρακτικές εφαρμογές δεν καλύπτεται η δυνατότητα επιλογής των τριών πιο κρίσιμων διακλάσεων από ένα μεγάλο πληθυσμό, ούτε ανάλυση του αριθμού και της θέσης που μπορούν να σχηματιστούν κατά μήκος ενός ανοίγματος. Οι μηχανικές και οι υδραυλικές ιδιότητες των ασυνεχειών και οι γεωμετρικές ιδιότητες αποτελούν μεγέθη μη επακριβώς καθορισμένα που δίνουν την δυνατότητα να μην θεωρηθούν ως τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν κατάλληλες κατανομές. Η πιθανή θεώρηση των ιδιοτήτων αυτών κατά τον σχεδιασμό βασίζεται στην ορθολογική εκτίμηση της απαιτούμενης υποστήριξης.

ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΤΟΞΑ

- Τα χαλύβδινα τόξα τοποθετούνται ανά τέτοιες αποστάσεις ώστε να συγκρατούν τυχόν αποκολλημένα λίθινα τεμάχια.
- Έχουν τη δυνατότητα να ολισθαίνουν και να ακολουθούν τις παραμορφώσεις και τη μείωση της διατομής της σήραγγας και του εξωτερικού δακτυλίου.



Εικόνα 3.4: Χαλύβδινα τόξα

Η πραγματοποίηση τοποθέτησης των τόξων γίνεται για την μέγιστη αξιοποίηση της αντοχής τους. Θα πρέπει να γίνει σωστή επαφή με το πέτρωμα ώστε τα σημεία που εφάπτονται να είναι επαρκώς κοντά μεταξύ τους. Η επαφή αυτή επιτυγχάνεται από σφήνες που τοποθετούνται στο εξωτερικό του τόξου. Τα τόξα έχουν την ικανότητα να προσκολλώνται στο πέτρωμα με πλαστικό περίβλημα κατά μήκος των εξωτερικών τους και γεμίζονται με κονίαμα μέχρι να πιέσουν το πέτρωμα. Η ταχύτητα πήξης του κονιάματος γίνεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε αυτό να αναλαμβάνει τα φορτία που αναπτύσσονται από το πέτρωμα. Η συγκεκριμένη διαδικασία δεν έχει κίνδυνο εισχώρησης υποστήριξης στο πέτρωμα και αρμόζει ιδιαίτερα στα εδάφη που απαιτείται περιορισμός των καθιζήσεων στην επιφάνεια.

Η υποστήριξη του πετρώματος περιέχει κάλυψη με πλάκες. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί από ξηρή λιθοδομή ή από έγχυτο σκυρόδεμα αντλούμενο από τις πλάκες. Η τελευταία αυτή προσέγγιση είναι η κατάλληλη όταν υπάρχει μεγάλη υπερεκσκαφή, αρκεί η μεταφορά και η τοποθέτηση του σκυροδέματος να είναι εφικτή. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται όταν το πλαίσιο φορτίζεται ομοιόμορφα με σκοπό να εξασφαλιστεί η ευστάθεια του. Επίσης σημασία έχει η θέση των σφηνών να επιτυγχάνει στα τόξα μικρές δυνατές ροπές.

Το σανίδωμα (κάλυψη) καθιστά τη συνέχεια της υποστήριξης των τοιχωμάτων της σήραγγας μεταξύ των τόξων εμποδίζοντας τις παραμορφώσεις στην επιφάνεια τους. Είναι χρήσιμο όταν οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος είναι πάρα πολύ πτωχές για να πετύχει η μεταφορά φορτίων χωρίς ιδιαίτερη παραμόρφωση. Το σανίδωμα αποτελείται από μεταλλικές σανίδες εδραζόμενες σε πλαίσια, τα οποία εφάπτονται ή αφήνουν κενό ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πετρώματος. Το πάχος των σανίδων κυμαίνεται από 2 μέχρι 4 mm, ενώ το βάθος των πτυχών από 1 έως 5 cm. Οι σανίδες μπορούν να έχουν πλάτος από 20 έως 30 cm και μήκος από 1,3 έως 3 m.

Ορισμένοι τύποι σανίδων έχουν εξοχές που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεσή τους με τα τόξα. Διαθέτουν συμπαγή και διάτρητα φύλλα, όπου τα διάτρητα χρησιμοποιούνται σε συνεκτικά πετρώματα που περιέχουν λίγο νερό. Μεταξύ των σανίδων πρέπει να υπάρχει μια διαμήκης επικάλυψη τουλάχιστον 0,40 m. Τα φύλλα αυτού του τύπου είναι κατάλληλα σε όλους τους τύπους πετρωμάτων και τα χαρακτηριστικά τους μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν στις πραγματικές ανάγκες υποστήριξης με την επιλογή υπερκάλυψης και μάζας από 5 έως 40 kg/m². Τα φύλλα

του τόξου λειτουργούν ως κανάλια αποστράγγισης που μεταβιβάζουν το νερό απορροής στις υδρορροές κατά μήκος των πλευρών. Εάν η ένωση μεταξύ των στοιχείων είναι επιμελημένη και περιλαμβάνει επικάλυψη, οι εισροές νερού στη σήραγγα μπορούν να παραμείνουν πολύ μικρές ακόμα και αν η παροχή είναι υψηλή. Τα φύλλα έχουν πλάτος από 40 έως 60 cm σε κατεύθυνση παράλληλη στον άξονα της σήραγγας και μήκος 1 έως 1,50 m. Ακόμα μπορεί να έχουν πάχος από 2 έως 10 mm.

Ορισμένα φύλλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μόνα τους, χωρίς τόξα, αν η διατομή της σήραγγας είναι κυκλική και οι ενεργές πιέσεις δεν είναι μεγάλες. Χρησιμοποιούνται για προστασία και συμβάλλει στην υποστήριξη όταν το κενό μεταξύ αυτών και της βραχομάζας γεμίσει με έγχυτο σκυρόδεμα. Διατομές διαμέτρου μέχρι 4,5 mm δεν απαιτούν πρόσθετη υποστήριξη. Είναι κατάλληλα για σήραγγες οι οποίες έχουν μέγεθος διατομής 15 έως 35 m² ενώ για μικρές διατομές η διαμόρφωση του φύλλου δεν είναι εύκολη καθώς η ακτίνα δεν ξεπερνά το 1,50 m. Το μεγαλύτερο προτέρημα αυτής της κατασκευής είναι ότι πραγματοποιείται μεγάλη υποστήριξη ανά μέτρο σήραγγας με το ελάχιστο δυνατό βάρος χάλυβα.

Η πρόβλεψη τοποθέτησης οριστικής επένδυσης ακολουθεί σε σταθερή απόσταση το μέτωπο και τα πλαίσια μπορούν να αφαιρεθούν πριν από τη σκυροδέτηση. Η χρησιμοποίηση μικρού αριθμού τόξων θα ελαχιστοποιήσει τον χρόνο και το κόστος της τοποθέτησης και η αφαίρεση τους θα αποδειχθεί οικονομικά συμφέρουσα. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε σε αρθρωτά τόξα, τα οποία έχουν δύο ή τρεις αρθρώσεις για να ευκολύνουν τη μεταφορά τους σε σχέση από τα άλλα πλαίσια που είναι τοποθετημένα πλησίον του μετώπου. Αφού τοποθετηθούν, οι αρθρώσεις «κλειδώνουν» ώστε να εξασφαλιστεί η δυσκαμψία. Στην περίπτωση που οι σήραγγες έχουν μεγάλα ανοίγματα, η διαδικασία «αφαίρεσης, μεταφοράς και τοποθέτησης» μπορεί να εισαχθεί με την χρήση μηχανημάτων.

Εάν η ποιότητα του εδάφους το απαιτεί, τα πλαίσια μπορούν να συνδυαστούν με την έμπηξη μεταλλικών πασσαλοσανίδων που στηρίζονταν στα πλαίσια και καρφώνονται με υδραυλικούς γρύλους στην περίμετρο του μετώπου. Εφόσον χρησιμοποιούνται μόνιμα πλαίσια, τα φύλλα μπορούν να τοποθετηθούν είτε εκτός των πλαισίων, είτε μεταξύ διαδοχικών πλαισίων. Στην πρώτη περίπτωση τα πλαίσια τοποθετούνται στους κεντρικούς άξονες των δακτυλίων και τα φύλλα στηρίζονται σε σφήνες στα πλαίσια. Τα φύλλα στην περίπτωση αυτή λειτουργούν ως σανίδωμα που

απαιτεί μεγαλύτερη διάμετρο εκσκαφής για να επιτύχει την ίδια ωφέλιμη διατομή. Στη δεύτερη περίπτωση, οι κοχλίες σύνδεσης περνούν μέσα από άνοιγμα δημιουργίας τεχνικών μέσων στον κορμό των δοκών πλαισίων που γενικά είναι διατομής ΗΕ με αποτέλεσμα η κατασκευή να είναι λιγότερο συνήθης εφόσον είναι δυσκολότερη η εγκατάστασή τους.



Εικόνα 3.5: Κάλυψη σήραγγας

ΜΑΝΔΥΑΣ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

- Μπορεί να γίνει είτε σε μια στρώση είτε σε περισσότερες δηλαδή να αυξάνεται το πάχος σταδιακά.
- Το συνολικό πάχος είναι περίπου 5 cm έως 30 cm.
- Κατά τη σταδιακή κατασκευή γίνεται ενίσχυση με αγκύρια (αν χρειάζεται).
- Ενισχύεται με τοποθέτηση χαλύβδινου πλέγματος.
- Εναλλακτικά αντί χαλύβδινου πλέγματος τοποθετούνται ίνες στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (ινοπλισμένο).

- Κατά μήκος της σήραγγας προβλέπονται εγκοπές διαστολής όπου τοποθετείται μόνον το πλέγμα προκειμένου να γίνεται εκτόνωση των πιέσεων μέσω της μείωσης της ακτίνας της σήραγγας.



Εικόνα 3.6: Μανδύας εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Σε υπόγεια και επιφανειακά έργα, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 90% για την στήριξη των πετρωμάτων. Με την εκτόξευση σκυροδέματος πάνω στα τοιχώματα των εκσκαφών και την άμεση πρόσφυση σε αυτά, έχει στόχο την άμεση επένδυση του χωρίς την χρήση καλουπιών. Το σκυρόδεμα εκτοξεύεται από το ακροφύσιο πάνω σε μια τραχεία επιφάνεια πετρώματος, σχηματίζοντας ένα λεπτό στρώμα τσιμεντοκονίας με κόκκους άμμου μικρότερους από 0,2 mm. Το λεπτόκοκκο υλικό εισχωρεί στους πόρους και στις ρωγμές και προσφέρει μια βάση για την εκτόξευση και την συμύκνωση του υπόλοιπου πάχους.

Κατά την κατασκευή του αρχικού στρώματος, μέρος των χονδρόκοκκων αδρανών αναπηδά και πέφτει στο έδαφος. Σε πρόσφατα θραυσμένο, καθαρισμένο και τραχύ πέτρωμα, η πρόσφυση είναι καλύτερη παρά σε λεία ή εύθραυστη επιφάνεια μετάλλου ή πετρώματος. Στο νωπό σκυρόδεμα μπορεί να προκληθεί ζημιά από την διήθηση νερού και η ροή που δημιουργείται θα πρέπει να παρακάμπτεται με την διάτρηση

οπών και την τοποθέτηση σωλήνων συνδεδεμένο με το σύστημα στράγγισης. Οι βασικές δράσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως επένδυση είναι:

- 1) Στατική ενίσχυση πετρώματος σε διάφορες κλίμακες.
- 2) Σφράγιση οξειδωμένου ή χαλαρωμένου πετρώματος για την αποφυγή χαλάρωσης λόγω έκθεσης σε νερό ή υγρασία.
- 3) Έλεγχος νερού και δημιουργία πάγου με ανακατεύθυνση στράγγισης ή σταμάτημα ροής.

Πλεονεκτήματα της εφαρμογής αυτής είναι η δυνατότητα άμεσης επέμβασης, η τοποθέτηση του χωρίς χρήση καλουπιών, η ανεξαρτησία του από την μορφή της επιφάνειας διάστρωσης και η συνεργασία με άλλα μέτρα υποστήριξης. Στα μειονεκτήματα της εφαρμογής αυτής περιλαμβάνονται οι καταπτώσεις που εμφανίζονται σε πετρώματα που διαθέτουν μειωμένη πρόσφυση όπως ο άργιλος. Τα υλικά και η σύνθεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η εκτέλεση εργασίας, οι έλεγχοι, οι απαιτήσεις υγείας και ασφάλειας και ο τρόπος επιμέτρησης εργασιών ορίζονται από την ΕΛΟΤ ΤΠ-12-03-02-00.

Η καθοδήγηση σχεδιασμού μίγματος γίνεται από τις αρχές που διέπουν τον σχεδιασμό σκυροδέματος όπως ο χαμηλός λόγος N/T, η ελάχιστη περιεκτικότητα σε αέρα και ο επαρκής βαθμός συμπύκνωσης από τους πρόσθετους παράγοντες που επιδρούν στην διαβάθμιση των αδρανών και στην περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Ο προσδιορισμός του σκυροδέματος στοχεύει στις απαιτήσεις εφαρμογής και λειτουργίας. Αυτές επιτυγχάνονται με μείωση του μέγιστου κόκκου των αδρανών στα 8 mm, με αύξηση της περιεκτικότητας σε συνδετικό υλικό και με χρήση πρόσμικτων για τον έλεγχο των ιδιοτήτων.

Οι βασικοί παράμετροι που ελέγχουν την αντοχή και την ποιότητα είναι ο λόγος N/T, η περιεκτικότητα σε αέρα και ο βαθμός συμπύκνωσης. Η περιεκτικότητα σε τσιμέντο είναι μεγαλύτερη από του εκτοξευόμενου μίγματος εξαιτίας της μεγάλης αναπήδησης των αδρανών από αυτή του τσιμέντου με αποτέλεσμα η σύνθεση να διαφέρει από το αρχικό μίγμα. Επάνω στο τοίχωμα, η σύνθεση εξαρτάται από τον σχεδιασμό ακροφυσίου, την ταχύτητα πρόσκρουσης, την ικανότητα του χειριστή, την

επιφάνεια εφαρμογής, την ποσότητα και τον τύπο των πρόσμικτων, τον οπλισμό, την απόσταση του ακροφυσίου από την επιφάνεια και την γωνία ψεκασμού.

Για την ικανοποίηση των αναλογιών υλικών που επιλέγονται για το σύνολο των κριτηρίων και των απαιτήσεων ελαστικότητας τόσο του νωπού όσο και του σκληρυμένου σκυροδέματος περιλαμβάνουν:

- 1) Την συνεκτικότητα για το υγρό ανάμειγμα.
- 2) Αντοχή σε κάμψη.
- 3) Πλαστιμότητα, πυκνότητα, ανθεκτικότητα, στεγανότητα, υδατοπερατότητα.
- 4) Προστασία των ενσωματωμένων μεταλλικών στοιχείων έναντι διάβρωσης αφού ληφθεί υπόψιν η μέθοδος κατασκευής και η ποσότητα της αναπήδησης και σκόνης κατά την εκτέλεση της εργασίας εκτόξευσης.

Οι ιδιότητες που σχετίζονται με τις κατηγορίες βλαπτικότητας του περιβάλλοντος και οι απαιτήσεις για την σύνθεση, εξαρτώνται από την θεωρητική τεχνική διάρκεια ζωής του στοιχείου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Μετά την εκτόξευση του σκυροδέματος, οι τιμές της σύνθεσης πρέπει να λαμβάνουν υπόψιν την προσθήκη νερού και την επίδραση του φαινομένου αναπήδησης. Η συγκρότηση λόγω ανατινάξεων επιφανειών πετρωμάτων αποτελεί την λειτουργία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Ο ψεκασμός πρέπει να γίνεται πλησίον του μετώπου και όχι 4 ώρες μετά την διάνοιξη ή την ανατίναξη αλλά και πριν από την διάτρηση για τον επόμενο κύκλο εκσκαφής ώστε να παρεμποδίζει την χαλάρωση με την πρώτη πήξη του σκυροδέματος που θα πρέπει να είναι σε θέση να αντέχει την επόμενη ανατίναξη μέσα σε δύο ώρες από το τέλος του ξεμπαζώματος. Σε περίπτωση που υπάρχει οπλισμός όπως πλαίσια, πλέγματα, ράβδοι οπλισμού περιβάλλονται πλήρως με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και λαμβάνεται μέριμνα κατά την διάστρωση ώστε να μην παραμένουν κενά πίσω από τον οπλισμό.

Η εκτόξευση εξασφαλίζει:

- 1) Ελάχιστη αναπήδηση για την αποφυγή δημιουργίας εγκλεισμάτων από υλικά αναπήδησης στο σκυρόδεμα.
- 2) Μόρφωση τελικής επιφάνειας εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την ασφαλή τοποθέτηση υλικών υδατοστεγάνωσης (γεωύφασμα) που χρησιμοποιείται στο εσωτερικό της σήραγγας σαν στρώση χωρίς ίνες και με λεπτόκοκκα αδρανή υλικά (0-8 mm).
- 3) Αποφυγή δημιουργίας κοιλιοτήτων μέσα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και κενών πίσω από τον οπλισμό.
- 4) Ελάχιστος αριθμός ρωγμών που προκλήθηκαν από συρρίκνωση λόγω πήξης σκυροδέματος.
- 5) Καλή πρόσφυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος στον βράχο και μεταξύ των στρώσεων.



Εικόνα 3.7: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόζεται σε διαδοχικές στρώσεις. Το πάχος της στρώσης δίνει την δυνατότητα να ελέγχεται είτε με την διείσδυση ράβδου αμέσως μετά την περάτωση της εφαρμογής του, είτε με τοποθέτηση καρφιών γνωστού

μήκους στον βράχο πριν από την εφαρμογή. Οι ποσότητες που εκτοξεύουν το σκυρόδεμα από το ακροφύσιο καθορίζονται με βάση το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αφού μετρηθεί η αναπήδηση. Κατά την διάνοιξη εκσκαφής σηράγγων δημιουργούνται θλιπτικές αντοχές, εφελκυστικές αντοχές και πρόσφυση. Η θλιπτική αντοχή προκαλείται μετά από 8 ώρες, 24 ώρες και 28 ημέρες. Απαιτείται αντοχή σκυροδέματος C25/30 ανάλογα με την υποστήριξη εδάφους και εάν θα ακολουθήσει μόνιμη επένδυση ή όχι. Η εφελκυστική αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αποτελεί σημαντική έννοια για την φέρουσα ικανότητα κυρίως στα τεμαχισμένα πετρώματα. Αντίθετα στην πρόσφυση που συναντάται στην επιφάνεια του πετρώματος, δεν υπάρχουν τυποποιημένες δοκιμές και η αντοχή της πρόσφυσης αποτελεί το ¼ της θλιπτικής αντοχής.

Τα αδρανή υλικά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ζυγίζονται με ακρίβεια πριν από την ανάμειξη. Όταν η ανάμειξη είναι ξηρή, τα αδρανή αναμειγνύονται χωρίς την προσθήκη νερού πριν από την διαδικασία τους στον εξοπλισμό διάστρωσης. Προσθέτουμε το τσιμέντο όχι νωρίτερα της μίας ώρας από την ώρα διάστρωσης. Η προσθήκη των ινών πρέπει να γίνεται στα παρασκευαστήρια. Αν αυτό δεν είναι αποτελεσματικό γίνεται μεταφορά σκυροδέματος και αναμειγνύεται για την επίτευξη απαραίτητης ομογένειας. Στη συνέχεια τα πρόσμεικτα εφόσον μετριοούνται με ακρίβεια, προστίθενται στους κατάλληλους χρόνους πριν από τη διάστρωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



Εικόνα 3.8: Αδρανή υλικά

Πριν την εισαγωγή του επιταχυντή γίνονται τα εξής:

- Λήψη δοκιμών για εξακρίβωση σωστής ποιότητας τροφοδοσίας. Λαμβάνονται κυβικά δοκίμια ακμής 15 cm για τον έλεγχο σε θλίψη του νωπού σκυροδέματος.
- Έλεγχος εργασιμότητας του νωπού σκυροδέματος. Μετριέται με τον κώνο κάθισης και είναι μεταξύ 12-20 cm.
- Μέτρηση θερμοκρασίας νωπού σκυροδέματος.
- Εξασφάλιση κατάλληλης θερμοκρασίας επιταχυντή. Μετράμε τη θερμοκρασία επιταχυντή, η οποία κατά τη χειμερινή περίοδο πρέπει να διατηρείται μεταξύ 30 και 40 °C προκειμένου να γίνεται καλύτερη δυνατή κατανομή του επιταχυντή στη μάζα σκυροδέματος.
- Εξασφάλιση βέλτιστης δόσης επιταχυντή. Πριν από τη έναρξη διαδικασίας εκτόξευσης μετράμε τη στάθμη του επιταχυντή στο δοχείο του, ώστε μετά την εκτόξευση να υπολογίσουμε την ακριβή ποσότητα που καταναλώθηκε. Στη συνέχεια τοποθετούμε την επιθυμητή ένδειξη του δοσομετρητή στο μηχάνημα εκτόξευσης.
- Τοποθέτηση πανέλων για δειγματοληψία εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Κατά την εκτόξευση γεμίζονται τα πανέλα προκειμένου να ελεγχθούν μετά το εργαστήριο και συγχρόνως καταγράφεται η θέση και το όνομα του χειριστή. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει κοινά χαρακτηριστικά αντοχής με το σκυρόδεμα και οι δοκιμές θλιπτικής αντοχής αποτελούν την πιο συνηθισμένη μέθοδο ποιοτικού ελέγχου.



Εικόνα 3.9: Επιταχυντής εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Όταν εκτοξεύεται το σκυρόδεμα σε επιφάνειες που προκύπτουν από εκσκαφή, αυτές προετοιμάζονται με καθαρισμό χαλαρών υλικών. Οι επιφάνειες που αποκαλύπτονται καθαρίζονται τελείως με αέρα και νερό υπό πίεση για να αφαιρεθούν όλα τα ίχνη σκόνης, χαλαρών κομματιών, υλικών αναπήδησης και οποιοδήποτε άλλο επιβλαβές υλικό. Όπου υπάρχουν διαρροές νερού από τον βράχο, πάνω στον οποίο διαστρώνεται το σκυρόδεμα και η ροή νερού, δεν δύναται να σταματήσει μόνο με την εφαρμογή σκυροδέματος με επιταχυντικό πρόσμικτο, το νερό απομακρύνεται από την περιοχή με έμφραξη της φλέβας ή εκτρέπεται με σωλήνες, συλλεκτήρες ή άλλα μέσα, έτσι ώστε το σκυρόδεμα να μείνει ανεπηρέαστο από την δράση του νερού λόγω διήθησης, υδροστατικής πίεσης ή διάβρωσης. Στη συνέχεια γεμίζονται οι υπερεκσκαφές και ψεκάζεται μια πρώτη σταθεροποιητική στρώση. Αυτό το λεπτό υλικό διεισδύει στους πόρους και ρωγμές και δημιουργεί τη βάση για την τοποθέτηση και συμπίκνωση της υπόλοιπης επένδυσης.

Στην περίπτωση πολλαπλών στρώσεων πρέπει να εξασφαλίζεται η καλή συνάφεια μεταξύ τους. Για αυτό πριν από κάθε ψεκασμό η επιφάνεια θα πρέπει να καθαρίζεται καλά από τη σκόνη με ψεκασμό νερού και αέρα. Ο ψεκασμός του σκυροδέματος θα πρέπει να γίνεται πάντα πάνω σε υγρή επιφάνεια χωρίς νερό να ρέει, ώστε να μην απορροφά η ξηρή επιφάνεια το νερό του σκυροδέματος, ούτε να αποκολλάται το σκυρόδεμα από τη ροή. Κατά τις επόμενες επιστρώσεις όλες οι επιφάνειες πρέπει να είναι υγρές, καθαρές και απαλλαγμένες από υλικά αναπήδησης. Εφόσον η επίστρωση επιφανειών έχουν ίχνη, συντριμμια, υλικά αναπήδησης και οποιαδήποτε άλλου επιβλαβούς υλικού καθαρίζονται με αέρα και νερό υπό πίεση.

Με τη δημιουργία ελεύθερης επιφάνειας λόγω της εκσκαφής, σταματάει να εμποδίζεται η μετακίνηση ενός ή και περισσότερων τεμαχίων που είναι σε θέση να πέσουν εντός του ανοίγματος. Με την οποιαδήποτε πτώση τεμαχίων ελαττώνεται η συγκράτηση και η σύμπλεξη της βραχομάζας έχοντας ως αποτέλεσμα παραπάνω διαδοχικές πτώσεις. Αυτή διαδικασία πορεύεται μέχρι να δημιουργηθεί η φυσική ασίδα ή να γεμίσει το άνοιγμα με υλικά της κατάπτωσης. Προκειμένου να αποφευχθούν οι καταπτώσεις θα πρέπει το πέτρωμα να στηριχτεί σωστά, ώστε οι δυνάμεις, όπως το βάρος και η πίεση του νερού στις διακλάσεις να είναι μικρότερες από τις αντίθετες δυνάμεις.

Το μεγαλύτερο μέγεθος των τεμαχίων που υφίσταται εξαρτάται από την εμμόνη των ασυνεχειών που ορίζει το μήκος ασυνέχειάς του στερεού πετρώματος. Συνεπώς αν το στερεό πέτρωμα δεν θραύεται, ο όγκος των αποκολλώμενων τεμαχίων περιορίζεται από τον μέγιστο όγκο που επιτρέπει να σχηματιστεί η εμμόνη των ασυνεχειών.



Εικόνα 3.10: Αποκολλημένα τεμάχια (σαρζανέτ)

Τα διάφορα επίπεδα ασυνεχειών μαζί με την επιφάνεια εκσκαφής διαμορφώνουν τεμάχια τα οποία υπό ορισμένες συνθήκες πέφτουν ή ολισθαίνουν εντός της σήραγγας. Ο μέγιστος αριθμός απλών σφηνών μπορεί να σχηματίζεται από τρεις ασυνέχειες βραχομάζες που περιβάλλει μια κυκλική σήραγγα είναι 6. Στην περίπτωση μιας τετραγωνικής ή ορθογωνικής σήραγγας αυτός ο αριθμός μειώνεται σε 4. Για μια σήραγγα με θολωτή οροφή επιτρέπεται ο σχηματισμός μιας πρόσθετης σφήνας ώστε να σχηματιστούν συνολικά 5. Το κέντρο βάρους πυραμίδας ή κώνου βρίσκεται στο ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει την κορυφή με το κέντρο της βάσης και σε απόσταση από τη βάση ίση με το $\frac{1}{4}$ του μήκους του τμήματος. Στην περίπτωση τριγωνικού πρίσματος βρίσκεται στη γραμμή που ενώνει το κέντρο των τριγώνων.



Εικόνα 3.11: Θολωτή οροφή σήραγγας

Ο προσδιορισμός της θέσης, μορφής και μεγέθους των σχηματιζόμενων τεμαχίων, ο προσδιορισμός του εντατικού πεδίου και των υδραυλικών πιέσεων και ο προσδιορισμός της απαιτούμενης υποστήριξης απαιτείται έλεγχος προκειμένου να επιτυγχάνεται ένας ικανοποιητικός συντελεστής ασφαλείας. Η ευστάθεια των τεμαχίων που δημιουργούνται από τις διακλάσεις στην περιφέρεια της εκσκαφής των υπόγειων έργων εξαρτάται από:

- Τον προσδιορισμό και την γωνία κορυφής του τεμαχίου.
- Τις έλξεις στις επιφάνειες των διακλάσεων που περιβάλλουν τα τεμάχια.
- Την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών.
- Το βάρος του τεμαχίου που εξαρτάται από τον όγκο και το φαινόμενο βάρος του.
- Την πίεση του νερού στις διακλάσεις η οποία μειώνει την διατμητική δύναμη στις συνέχειες η οποία αγνοείται εφόσον οι ασυνέχειες στραγγίζονται καλά.
- Τις δονήσεις στο εργοτάξιο που μειώνουν την ευεργετική δράση του εντατικού πεδίου.

Τα ακόλουθα βήματα είναι:

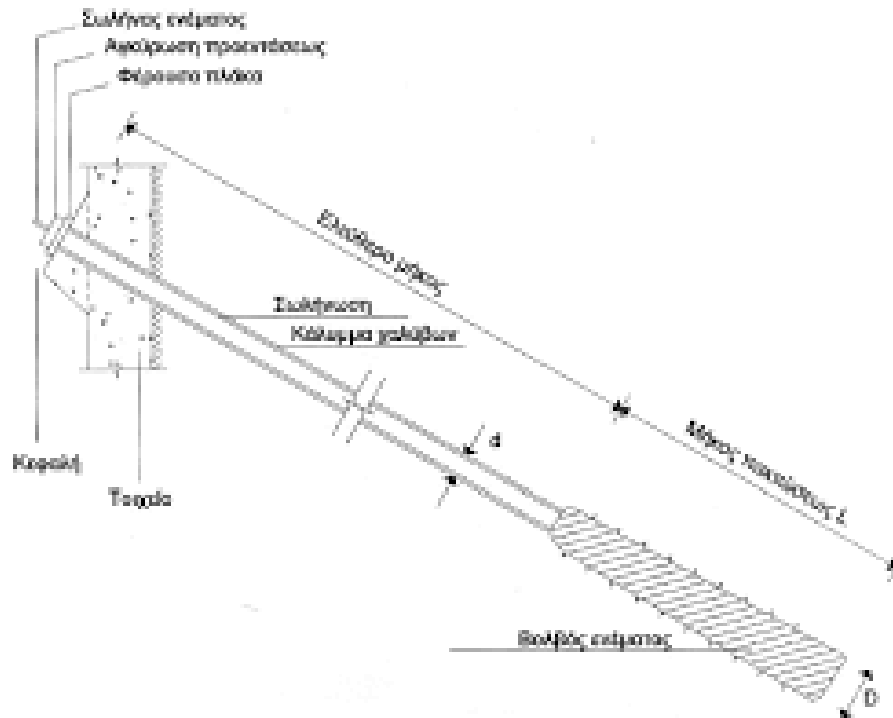
- 1) Προσδιορισμός της μέσης διεύθυνσης κλίσης των σημαντικότερων οικογενειών ασυνεχειών με βάση τα στοιχεία της γεωλογικής μελέτης.
- 2) Ανάγνωση τεμαχίων που δίνει την δυνατότητα να αποκολληθούν από την οροφή ή τα τοιχώματα του ανοίγματος.
- 3) Προσδιορισμός εντατικού πεδίου και της επίδρασης του.
- 4) Υπολογισμός απαιτούμενης ενίσχυσης στοχεύοντας στην επίτευξη κάθε τεμάχιο να έχει έναν αποδεκτό συντελεστή ασφαλείας.

ΑΓΚΥΡΙΑ

Χρησιμοποιείται σύστημα (τοποθετούνται σε κάναβο) :

- μη προεντεταμένων (παθητικών) αγκυρίων
 - Τα αγκύρια αυτά μεταβιβάζουν φορτίο σε όλο τους το μήκος μέσω δυνάμεων τριβής.
 - Μπορεί να είναι σκυροδέματος, υδραυλικά, ρητίνης κ.λπ.
 - Δημιουργούν συρραφή του πετρώματος και όλο μαζί αποτελεί σύστημα που παραμορφώνεται μονολιθικά.
 - Τα αγκύρια αυτά είναι πιο σωστό να αποκαλούνται ήλοι ή καρφιά ή βλήτρα (dowel).
- προεντεταμένων (ενεργητικών) αγκυρίων
 - Μεταβιβάζουν φορτίο σε όλο τους το μήκος ή στο άκρο τους.
 - Μπορεί να είναι σκυροδέματος, διαστελλόμενης κεφαλής κ.λ.π.
 - Ασκούν θλιπτικές δυνάμεις στο πέτρωμα και εξασφαλίζουν έτσι τον έλεγχο των παραμορφώσεων.
 - Αποκαλούνται αγκύρια ή κοχλίες ή μπουλόνια (rockbolts).

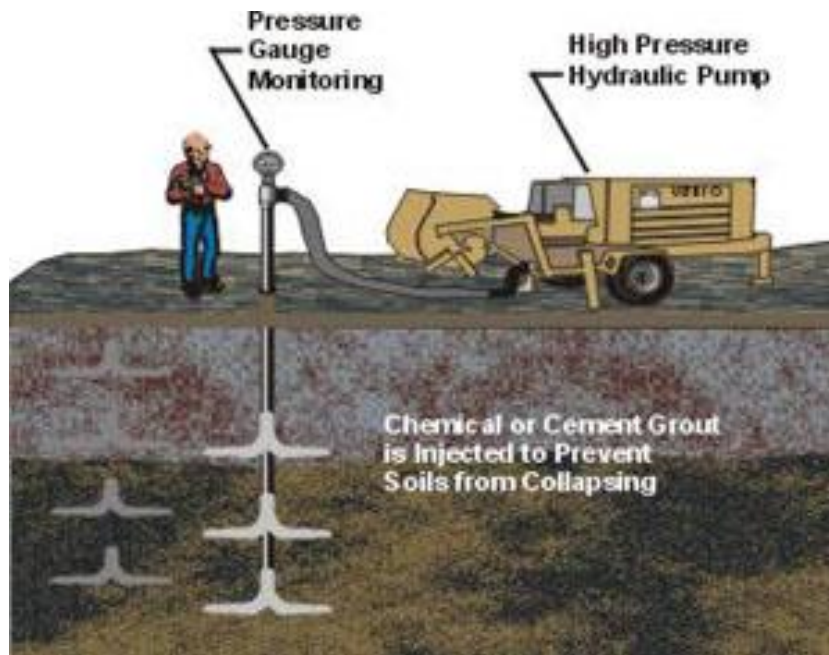
Η επιλογή του είδους των αγκυρίων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες . Γενικά όταν πρόκειται να καθυστερήσει η έγχυση του ενέματος στο αγκύριο ή αν πρόκειται να υπάρξουν ατέλειες στην κατασκευή τους, τότε συνιστάται η προένταση των αγκυρίων (Hoek and Brown,1997).



Εικόνα 3.12: Μη προεντεταμένα αγκύρια

ΕΝΕΜΑΤΑ

Ενέματα είναι το κάθε ρευστό υλικό που πιέζεται μέσα σε ένα γεωλογικό σχηματισμό, με σκοπό είτε την βελτίωση της αντοχής αυτού, είτε τη μείωση της υδροπερατότητάς του είτε στο συνδυασμό και των δύο.



Εικόνα 3.13: Τοποθέτηση ενεμάτων

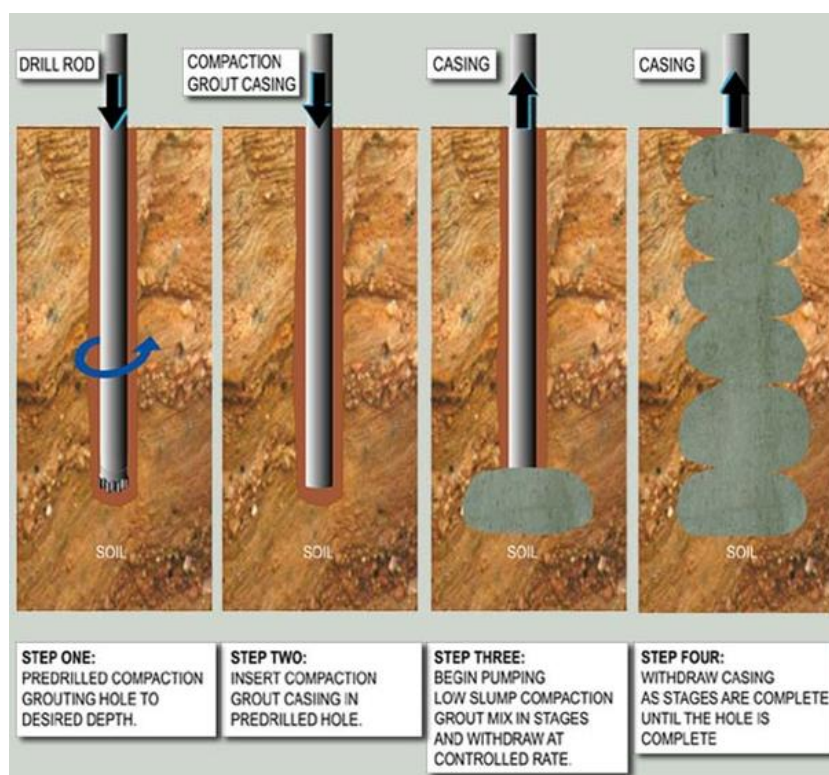
Με την χρήση των ενεμάτων, η σταθεροποίηση και η στεγανοποίηση των γεωλογικών σχηματισμών εντάσσονται στα αποτελεσματικά μέτρα προστασίας υπόγειων κατασκευών ως προς τις πιέσεις που αναπτύσσονται στους σχηματισμούς που τις περιβάλλουν, αλλά και ως προς τις εισροές του υπόγειου νερού σε αυτές.



Εικόνα 3.14: Τοποθέτησης ενεμάτων

Βήματα τοποθέτησης ενεμάτων:

- 1) Γίνεται οπή αρμολόγησης συμπίεσης στο επιθυμητό βάθος.
- 2) Εισαγωγή το περίβλημα του ενέματος συμπίεσης στην οπή.
- 3) Ξεκινά την άντληση του μίγματος ενέματος συμπίεσης χαμηλής καθίζησης σταδιακά και αποσύροντάς την με ελεγχόμενο ρυθμό.
- 4) Αφαιρείτε το περίβλημα καθώς ολοκληρώνονται τα στάδια και γεμίζει η οπή.



Εικόνα 3.15: Μέθοδος τοποθέτησης ενεμάτων

Σε περίπτωση που η τοποθέτηση των ενεμάτων γίνεται σε περιοχή που βρίσκεται νερό, το νερό περνά μέσα από ρωγμές θαλάσσιου τοιχώματος ή κάτω από τοίχο αφαιρώντας το χώμα κατά την έξοδο του. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί ένα κενό που φέρει δομικά προβλήματα. Μία λύση είναι η έγχυση πολυουρεθάνης, γεμίζει το κενό και σφραγίζει τις ρωγμές.



Εικόνα 3.16: Περίπτωση ενέματος σε νερό

Η τεχνική των ενέσεων είναι πολύ παλαιά. Η πρώτη προσπάθεια έγινε το 1802 (αιώρημα πλαστικής αργίλου). Ακολούθησαν εφαρμογές σε αρκετά υπόγεια έργα (στοές μεταλλείων, σήραγγες, φρέατα). Η επιλογή κατάλληλου υλικού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ενέματα προϋποθέτει καλή γνώση:

- της φύσης και του μεγέθους των κενών που πρόκειται να πληρωθούν
- της διαπερατότητας του συγκεκριμένου γεωλογικού σχηματισμού που μελετάται
- την επίτευξη της τελικής γεωμηχανικής συμπεριφοράς

Αλληλεπίδραση δομικών στοιχείων εδάφους και ενέματος:

Για την επιλογή του κατάλληλου ενέματος πρέπει να είναι γνωστά:

- 1) Οι ιδιότητες εδάφους και ενέματος.
- 2) Ο τρόπος αλληλεπίδρασης αυτών.
- 3) Ο τρόπος απόθεσης του ενέματος μέσα στα δομικά στοιχεία του σχηματισμού.

Υπάρχουν 4 βασικές κατηγορίες ενεμάτων που μπορεί να επιλεγούν, ανάλογα με τον επιδιωκόμενο στόχο:

- 1) Τα ενέματα που μπορούν να πληρώσουν το χώρο μεταξύ των δομικών στοιχείων του εδάφους. Δηλαδή να εκδιώξουν όλο το νερό που υπάρχει εκεί αλλά παράλληλα να παραμείνουν σταθερά στη θέση αυτή (αύξηση της αντοχής και μείωση της διαπερατότητας = ιδεώδη ενέματα).
- 2) Τα ενέματα που «επιχρίουν» απλά τους κόκκους του εδαφικού υλικού χωρίς να γεμίζουν πλήρως τους πόρους μεταξύ αυτών (αύξηση της αντοχής).
- 3) Τα ενέματα που δεν απομακρύνουν πλήρως το νερό από τα κενά αλλά του περιορίζουν το χώρο δράσης, με αποτέλεσμα να παραμένει στην επιφάνεια των δομικών κόκκων του εδαφικού υλικού (μείωση της υδροπερατότητας).
- 4) Κακή επιλογή ενέματος.

Τα κενά που πληρώνονται με ένεμα μπορεί να είναι:

- 1) Σπηλαιώδη ανοίγματα
- 2) Ρήγματα
- 3) Διαρρήξεις – διακλάσεις
- 4) Ασυνέχειες των βραχωδών σχηματισμών
- 5) Το πορώδες των κοκκωδών εδαφικών σχηματισμών

Κύριοι τύποι ενεμάτων:

- 1) Ενέματα τσιμέντου: Το γνωστό και φθηνό υλικό ενέματος με βασικό μειονέκτημα τη μεγάλη χρονική διάρκεια απόκτησης κατάλληλων ιδιοτήτων από πλευράς αντοχής. Για μείωση του χρόνου χρησιμοποιείται τσιμέντο τύπου Portland (τσιμέντο πολύ πλούσιο σε οξείδιο του αργιλίου, Al_2O_3). Αντίθετα, τσιμέντα που περιλαμβάνουν γύψο (θειικό ασβέστιο $CaSO_4$), κρίνονται ακατάλληλα για ενέματα γενικής χρήσης.

Το τσιμέντο έχει σχετικά μεγάλα σωματίδια και επομένως η χρήση του περιορίζεται σε εδάφη με μεγάλους πόρους και σε πετρώματα με μεγάλο άνοιγμα ασυνεχειών.



Εικόνα 3.17: Τσιμεντοενέσεις

2) Ενέματα τσιμέντου - αργίλων: Η ανάμιξή του με ειδικές αργίλους (μπεντονίτης) επιφέρει βελτίωση της ευκινησίας του τσιμέντου. Μεγάλο μειονέκτημα η υποβάθμιση της αντοχής του τσιμέντου. Ενέματα ποικίλης αντοχής μπορεί να προκύψουν με την ανάμιξη τσιμέντου και αργίλων. Μίγματα τσιμέντου και κατάλληλων μπεντονιτικών αργίλων είναι σταθερά σε οποιαδήποτε αναλογία νερού-τσιμέντου, αυξάνοντας το ιξώδες του ενέματος.



Εικόνα 3.18: Μπετονίτης άργιλος

3) *Ιπτάμενη τέφρα*: Πρόκειται για την τέφρα που απομένει από το κάρβουνο που χρησιμοποιείται σαν καύσιμη ύλη στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς μετά την καύση. Η ιπτάμενη τέφρα συνίσταται από πολύ μικρής διαμέτρου σφαιρίδια πυριτίου. Σήμερα αυξημένη είναι η χρήση της σε ανάμιξη με τσιμέντο.



Εικόνα 3.19: Ιπτάμενη τέφρα

4) Χημικά ενέματα: Διάφορες χημικές ενώσεις είτε με νερό είτε με άλλες ενώσεις. Αποτελούν ακριβές λύσεις ενέσεων και χρησιμοποιούνται μόνο σε περιπτώσεις που η αρχική υδροπερατότητα είναι χαμηλής τάξης.

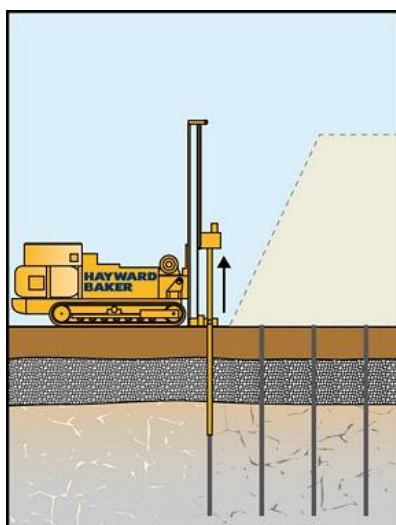


Εικόνα 3.20: Τοποθέτηση χημικών ενεμάτων

Κατηγορίες ενεμάτων:

- **Ενεματώσεις για βραχώδεις σχηματισμούς:**

Ενεμάτωση στερέωσης: Αναφέρεται στην πλήρωση ανοικτών ρωγμών, επιφανειών στρωμάτωσης του βραχώδους υποβάθρου. Η αντοχή του πετρώματος βελτιώνεται και η ροή του υπεδιαφικού νερού περιορίζεται. Στα υπόγεια έργα αυτή πρέπει να γίνεται μέχρι μια διάμετρο απόσταση από το όριο εκσκαφής.

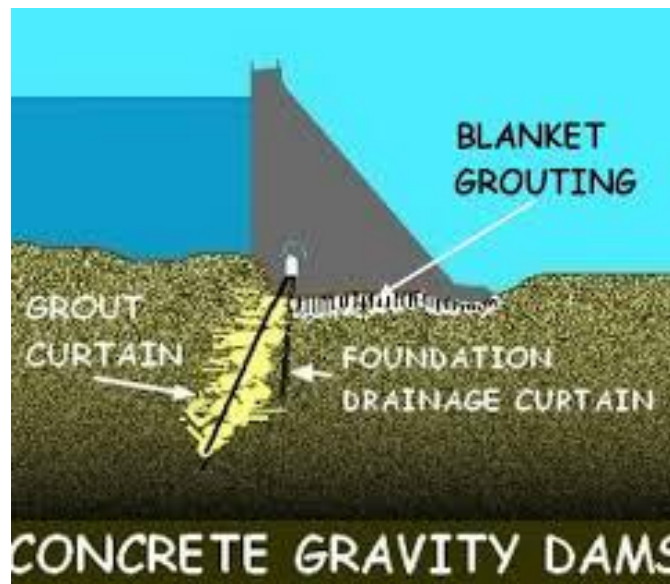


Εικόνα 3.21: Ενεμάτωση στερέωση

Ενεμάτωση κουρτίνας: Αποτελεί αντιπροσωπευτικό τύπο ενεμάτωσης και είναι κατάλληλη για όλους τους γεωλογικούς σχηματισμούς. Δημιουργείται με στεγανό και στερεό υπόγειο διάφραγμα, όταν αυτό είναι απαραίτητο σε διάφορα μεγάλα έργα, όπως:

α) μεταφοράς και αποθήκευσης νερού

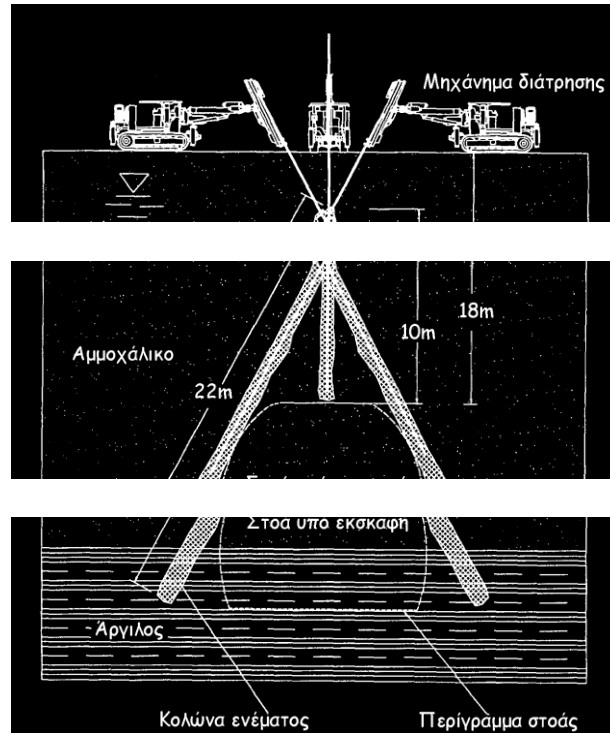
β) υπόγεια έργα αποθήκευσης αερίου, πετρελαίου ή και ασφαλούς απόθεσης τοξικών αποβλήτων



Εικόνα 3.22: Ενεμάτωση κουρτίνας

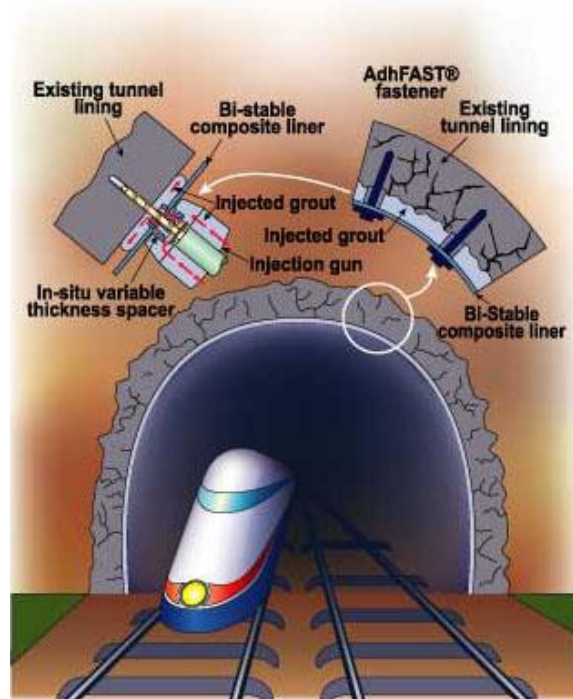
- **Ενεματώσεις που αφορούν στη βελτίωση των συνθηκών στην επαφή εδάφους-κατασκευής:**

Προληπτική: Μεταβάλλει τις φυσικομηχανικές ιδιότητες του πετρώματος πριν τη διάνοιξή του. Προληπτική ενεμάτωση σε στοές μικρού βάθους μπορεί να γίνει με γεωτρήσεις από την επιφάνεια ή με γεωτρήσεις μέσα από τη στοά.



Εικόνα 3.23: Προληπτική ενεμάτωση

Ενεμάτωση επαφής: Αποτελεί ενεμάτωση στην επαφή των τελικών επενδύσεων υπόγειων κατασκευών με την προσωρινή υποστήριξη.



Εικόνα 3.24: Ενεμάτωση επαφή

Τρόπος ενεμάτωσης:

Μετά από τη γνώση των ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών και τον καθορισμό του τύπου ενέματος που θα χρησιμοποιηθεί, σχεδιάζεται η μέθοδος ενεμάτωσης. Στα διαφράγματα κάτω από άξονα φράγματος (πολύ συνηθισμένη εφαρμογή ενεμάτωσης σε τεχνικό έργο), ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια για τη επιλογή της κονίας του ενέματος, είναι η περατότητα του πετρώματος (δοκιμές Lugeon). Καθορίζονται έτσι:

- οι απαιτούμενες πιέσεις και παροχές
- γίνεται η επιλογή του αναγκαίου εξοπλισμού
- η απόσταση των γεωτρήσεων που θα χρησιμοποιηθούν
- ο αναγκαίος αριθμός αυτών

Η επιλογή της πίεσης του ενέματος είναι σημαντική προς την κατεύθυνση της πλήρους εφαρμογής του ενέματος και της μη μεταβολής της κατάστασης των κενών που θα πληρωθούν.

Η διαδικασία εισπίεσης του ενέματος σε τέτοιες περιπτώσεις έχει ως εξής:

- 1) Αφού διαπιστωθεί η αυξημένη περατότητα των σχηματισμών στο χώρο του έργου, το ένεμα που έχει επιλεγεί εισπιέζεται στις γεωτρήσεις πρώτης τάξης που έχουν το κατάλληλο βάθος. Η εισπίεση του ενέματος γίνεται από κάτω προς τα πάνω σε πεντάμετρα τμήματα και με πιέσεις ίσες κάθε φορά με το βάρος των υπερκειμένων πετρωμάτων. Σε περίπτωση που το πέτρωμα είναι πολύ κερματισμένο και παρουσιάζει καταπτώσεις των τοιχωμάτων, η ενεμάτωση μπορεί να γίνει σε κατιόντα βήματα.
- 2) Ακολουθεί η διάνοιξη σειράς γεωτρήσεων ενδιάμεσα των πρώτων (γεωτρήσεις δεύτερης τάξης), όπου με τον ίδιο τρόπο ελέγχεται η περατότητα με δοκιμές Lugeon, συνήθως σε πεντάμετρα τμήματα και με 5 βαθμίδες πίεσης.
- 3) Αν διαπιστωθεί αυξημένη περατότητα γίνονται 3^{ης} τάξεως ενέσεις με την ίδια διαδικασία.
- 4) Η όλη διαδικασία (έλεγχος περατότητας, ενέσεις κλπ) επαναλαμβάνεται πυκνώνοντας τις γεωτρήσεις (γεωτρήσεις 3^{ης}, 4^{ης}, 5^{ης} τάξης) μέχρι την επίτευξη της

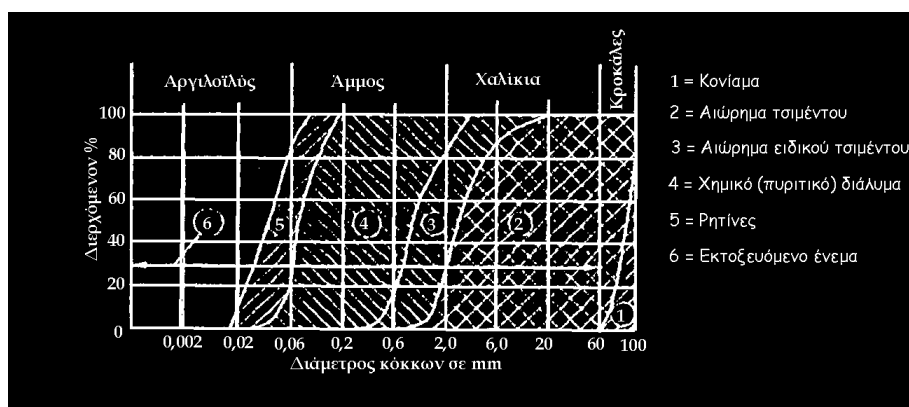
αναγκαίας τιμής περατότητας. Κριτήριο για τον τερματισμό μιας ένεσης είναι ο ρυθμός απορρόφησης να είναι μικρότερος από προκαθορισμένη τιμή (σε lit/min) για ορισμένο χρόνο (π.χ. 10 λεπτά).

Εργαστηριακές δοκιμές:

Για την καλύτερη επιλογή του ενέματος μια σειρά από εργαστηριακές δοκιμές είναι αναγκαίες που αφορούν στο έδαφος και στο ένεμα. Πιο συγκεκριμένα, το εργαστήριο θα πρέπει να γίνονται προσδιορισμοί:

- Της κοκκομετρικής σύστασης, των ορίων Atterberg, των φυσικών χαρακτηριστικών (φυσική υγρασία, ειδικό βάρος κλπ)
- Των οργανικών υλών
- Του χρόνου ωρίμανσης (πήξης)
- Των χρόνων ιζηματοπόθεσης των ενεμάτων
- Καθορισμός της θερμοκρασίας των ενεμάτων
- Χημικές αναλύσεις νερού και στερεών υλών
- Μετρήσεις του ιξώδους
- Προσδιορισμοί της αντοχής σε θλίψη

Από τις εργαστηριακές αναλύσεις έχουν διαμορφωθεί διαγράμματα καταλληλότητας εφαρμογής των διαφόρων τύπων ενεμάτων σε διάφορα εδάφη:



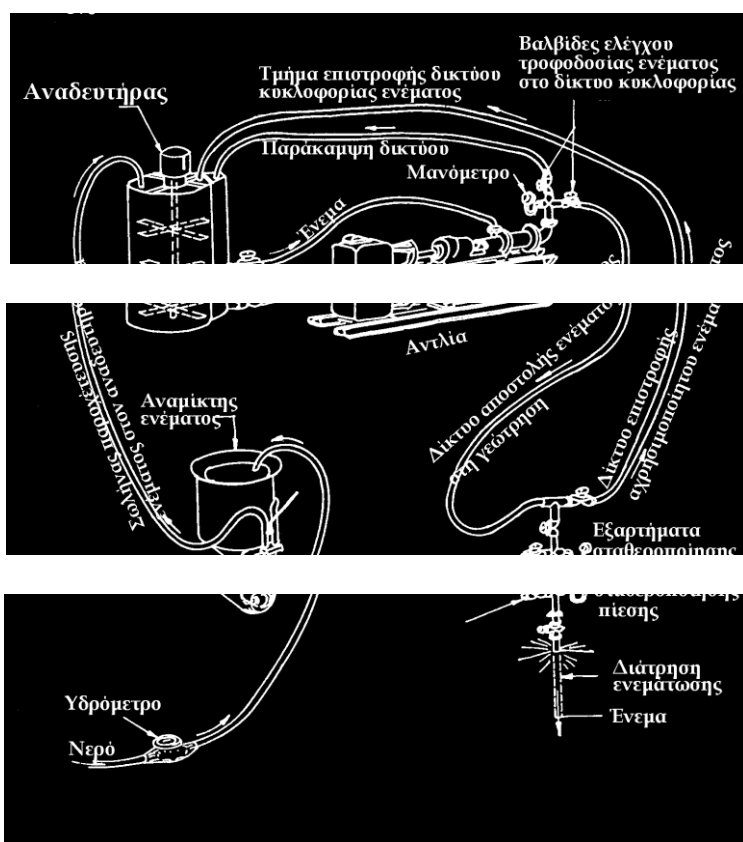
Εξοπλισμοί ενέσεων:

Ο εξοπλισμός των ενέσεων θα πρέπει να διαχωριστεί σε τρεις κατηγορίες.

- 1) Αναφέρεται στον εξοπλισμό του γεωτρητικού συγκροτήματος.
- 2) Στην αποθήκευση των πρώτων υλών και παρασκευής του ενέματος.
- 3) Στον εξοπλισμό εκτέλεσης των ενέσεων.

Αναλυτικότερα:

- Ο εξοπλισμός ανόρυξης των οπών ενεμάτωσης, χρησιμοποιείται για την ανόρυξη των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.
- Ο εξοπλισμός αποθήκευσης των πρώτων υλών.
- Ο εξοπλισμός παρασκευής του ενέματος αποτελείται από το συγκρότημα αποθήκευσης και τροφοδοσίας των πρώτων υλών και τους αναμικτήρες και αναδευτήρες (μαλακτήρες).



Εικόνα 3.25: Τυπική διάταξη δικτύου ενεμάτωσης

ΜΠΟΥΛΟΝΙΑ

Τα πετρώματα συνήθως δεν μπορούν να παραλάβουν εφελκυστικές ή διατμητικές δυνάμεις. Τοποθετούμε γραμμικούς, μεταλλικούς ή μη μεταλλικούς φορείς που αναλαμβάνουν τις δυνάμεις αυτές. Η λειτουργία τους μπορεί να είναι ενεργητική ή παθητική. Διακρίνεται σε δυο κατηγορίες:

- 1) Στήριξη μετά την εκσκαφή
- 2) Στήριξη προ της εκσκαφής (προενίσχυση)

Ράβδοι στήριξης μετά την εκσκαφή

- Ράβδοι σημειακής πάκτωσης: Ονομάζονται αγκύρια ή κοχλίες ή μπουλόνια και είναι προεντεταμένοι, εφελκυόμενοι φορείς. Η λειτουργία τους καλείται επίσης ενεργητική. Είναι πακτωμένες στο άκρο τους.

- Ράβδοι συνεχούς (πλήρους) πάκτωσης: Ονομάζονται ήλοι ή βλήτρα ή καρφιά και μεταβιβάζουν φορτία σε όλο τους το μήκος. Μπορεί να είναι:

- Ενεργητικές (τανυσμένες ή εφελκυόμενες)

- Παθητικές (μη προεντεταμένες): Η λειτουργία τους συνίσταται στο να ενσωματώνονται στο πέτρωμα και έτσι το όλο σύστημα να παραμορφώνεται μονολιθικά. Είναι δηλαδή κάτι σαν «οπλισμός» του πετρώματος.

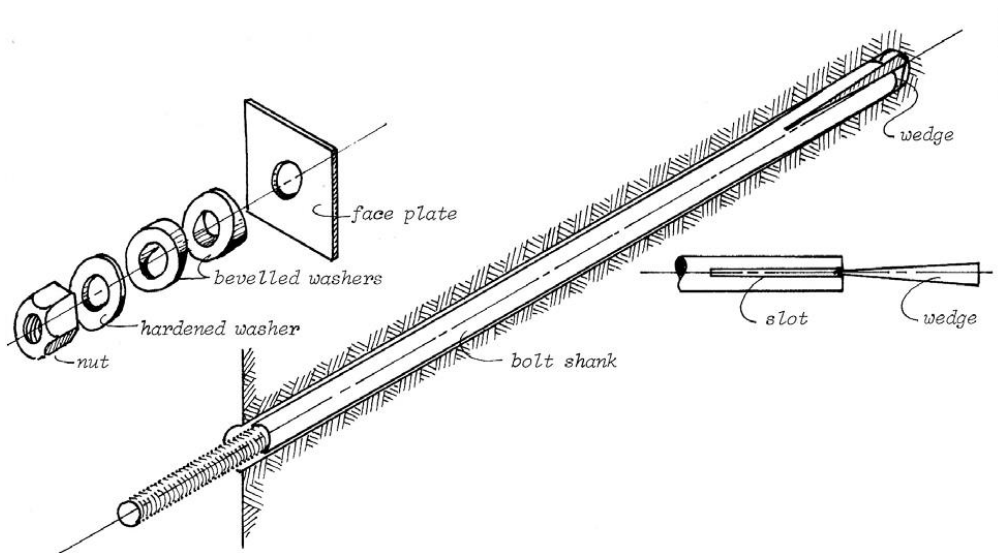
- Παθητικές τριβής: Συγκρατούν το πέτρωμα με δυνάμεις τριβής. Η διαφορά τους από την προηγούμενη κατηγορία είναι ότι αδυνατούν να παραλάβουν διατμητικές δυνάμεις. Δεν χρησιμοποιείται ο όρος βλήτρο αλλά μόνον ο όρος ήλος.

Ράβδοι σημειακής πάκτωσης (αγκύρια ή κογλίες)

Υπάρχουν διάφορα είδη ράβδων σημειακής πάκτωσης:

1) Με εγκοπή και σφήνα: Η σφήνα είναι τοποθετημένη στο άκρο της εγκοπής. Η ράβδος τοποθετείται με κρουστική σφύρα και η πιεζόμενη εγκοπή διαστέλλεται και αγκυρώνεται στα τοιχώματα του πετρώματος. Στο άλλο άκρο της ράβδου τοποθετούνται η πλάκα στήριξης, «ροδέλες» και το περικόχλιο. Η προένταση επιτυγχάνεται με την περιστροφή του περικόχλιου με ροπόκλειδο. Τα αγκύρια αυτά είναι εύκολα και φθηνά και η τοποθέτησή τους δεν είναι χρονοβόρα.

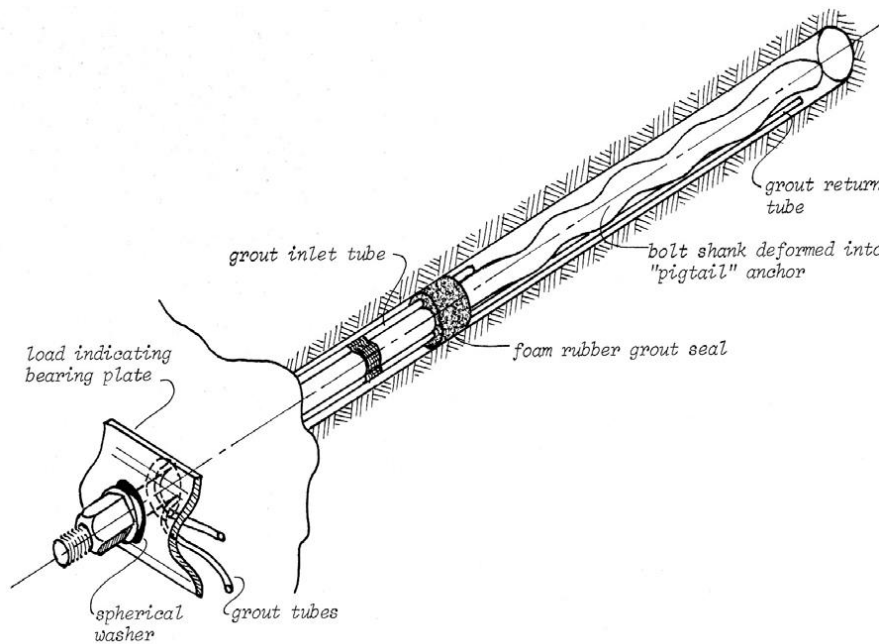
Χρησιμοποιούνται μόνο σε καλής ποιότητας βράχο για να μπορέσει να προσφέρει την πάκτωση του άκρου. Το μειονέκτημά τους είναι ότι το πέτρωμα γύρω από τη στήριξη ενδέχεται να υποχωρήσει οπότε χάνεται μέρος της πάκτωσης.



Εικόνα 3.25: Εγκοπή και σφήνα

2) Σκυροδέματος (σημειακής πάκτωσης): Η χαλύβδινη ράβδος εισάγεται στην οπή συνδεδεμένη με δυο λαστιχένιους σωλήνες. Σε κάποιο σημείο κοντά στο άκρο της (η θέση του καθορίζεται από τη μελέτη) τοποθετείται λαστιχένιος δακτύλιος ο οποίος σφραγίζει το χώρο που θα τοποθετηθεί το ένεμα. Το ένεμα εισάγεται από το ένα σωληνάκι και από το άλλο εξέρχεται αέρας. Όταν εξέλθει ένεμα σημαίνει ότι ο χώρος έχει πληρωθεί με ένεμα. Μετά την πήξη του ενέματος το αγκύριο προεντείνεται με το σφίξιμο το περικόχλιου και η περίσφιξη ελέγχεται από την αλλαγή του σχήματος της

πλάκας στήριξης. Υπάρχουν παραλλαγές του συγκεκριμένου αγκυρίου. Είναι αγκύρια προσωρινής στήριξης και δεν απαιτείται σκυροδέτηση και του υπόλοιπου μήκους (από το λαστιχένιο δακτύλιο μέχρι την πλάκα στήριξης) για λόγους προστασίας από διάβρωση. Είναι χαμηλού κόστους αγκύρια με ικανότητα καλής πάκτωσης και σε κακής ποιότητας πέτρωμα. Χρειάζεται εξειδίκευση στην καλή ενεμάτωση της πάκτωσης και απαιτείται αναμονή μέχρι την πήξη του ενέματος.



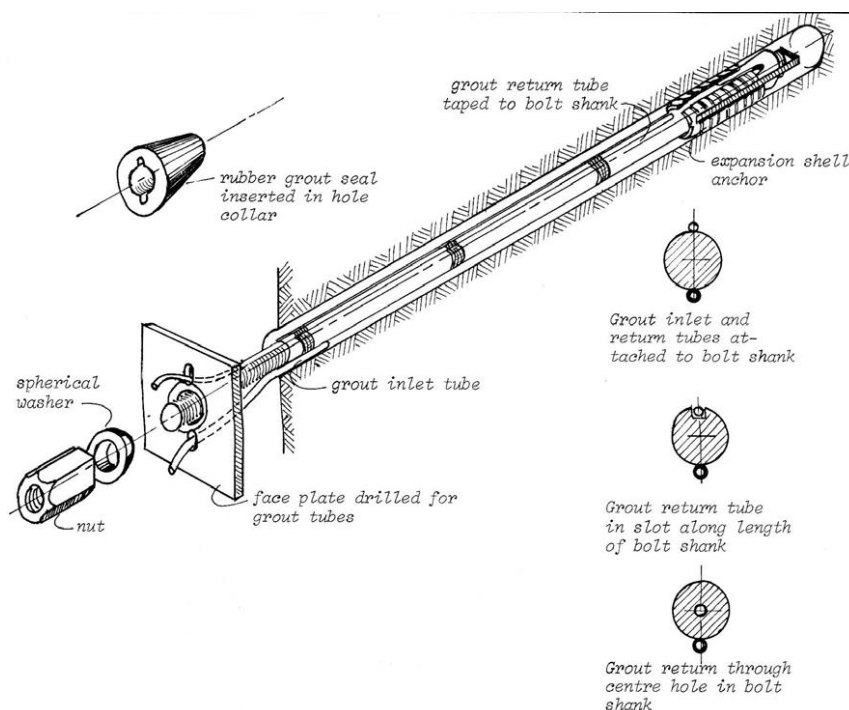
Εικόνα 3.26: Σημειακή πάκτωση

Ράβδοι πλήρους πάκτωσης (ήλοι ή βλήτρα)

- Ενεργητικές ή προεντεταμένες

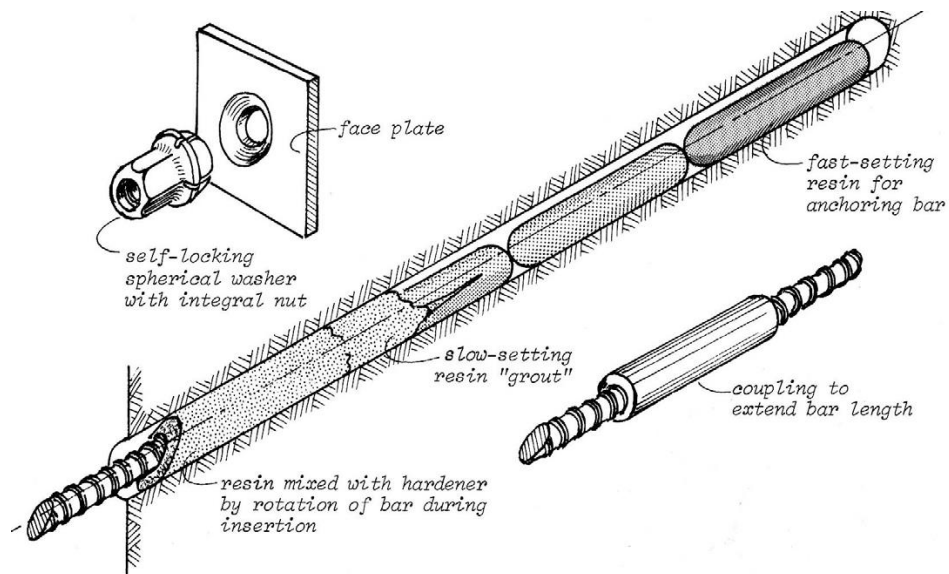
1) Σκυροδέματος – με μηχανική αγκύρωση: Το άκρο της ράβδου είναι διαμορφωμένο σε διαστελλόμενη κεφαλή η οποία όταν περιστρέφεται, αγκυρώνεται στο πέτρωμα. Στη ράβδο είναι συνδεδεμένα δυο σωληνάκια εισαγωγής του ενέματος και εξαγωγής του αέρα. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές διαμόρφωσης της ράβδου και των σωλήνων. Στο άκρο της ράβδου υπάρχει λαστιχένιος δακτύλιος σφραγίσματος της οπής. Τοποθετείται το αγκύριο, προεντείνεται και έπειτα γίνεται έγχυση του ενέματος σε όλο το μήκος. Η έγχυση τερματίζεται όταν το ένεμα ξεχειλίζει από το σωληνάκι. Τα αγκύρια αυτά χρησιμοποιούνται για μόνιμη στήριξη. Έχουν το

πλεονέκτημα ότι μπορεί να γίνει πρώτα η προένταση και σε επόμενη φάση η έγχυση του ενέματος. Είναι αξιόπιστα και μπορούν να παραλάβουν μεγάλα φορτία. Είναι σχετικά υψηλού κόστους. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και χωρίς ένεμα (σημειακής πάκτωσης διευρυνόμενης κεφαλής).



Εικόνα 3.27: Μηχανική αγκύρωση

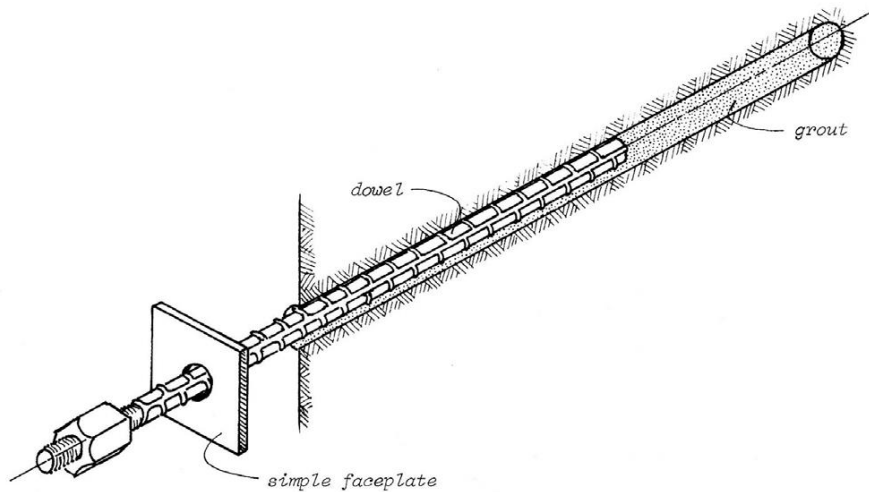
2) Ρητίνη: Είναι το πιο σύγχρονο σύστημα αγκύρωσης. Ο καταλύτης βρίσκεται στο εσωτερικό της ρητίνης απομονωμένος μέσα σε πλαστικό δοχείο (αμπούλες). Οι αμπούλες εισάγονται στο εσωτερικό της οπής διαδοχικά. Η πρώτη αμπούλα στο βάθος της οπής είναι ταχείας πήξης. Στη συνέχεια εισάγεται η μεταλλική ράβδος με περιστροφή, σπάζοντας τις αμπούλες και ενώνοντας τη ρητίνη με τον καταλύτη. Αφού στερεοποιηθεί η ρητίνη στο βάθος της οπής, η ράβδος προεντείνεται. Με αργό ρυθμό, στερεοποιείται και η υπόλοιπη βραδείας πήξεως ρητίνη. Τα αγκύρια ρητίνης είναι εύχρηστα και απλά στην τοποθέτηση. Διαμορφώνουν μεγάλης αντοχής αγκύρια ακόμα και σε χαμηλής ποιότητας βράχο. Είναι υψηλού κόστους και έχουν πεπερασμένη διάρκεια ζωής κυρίως σε θερμά κλίματα.



Εικόνα 3.28: Ένωση ρητίνης με καταλύτη

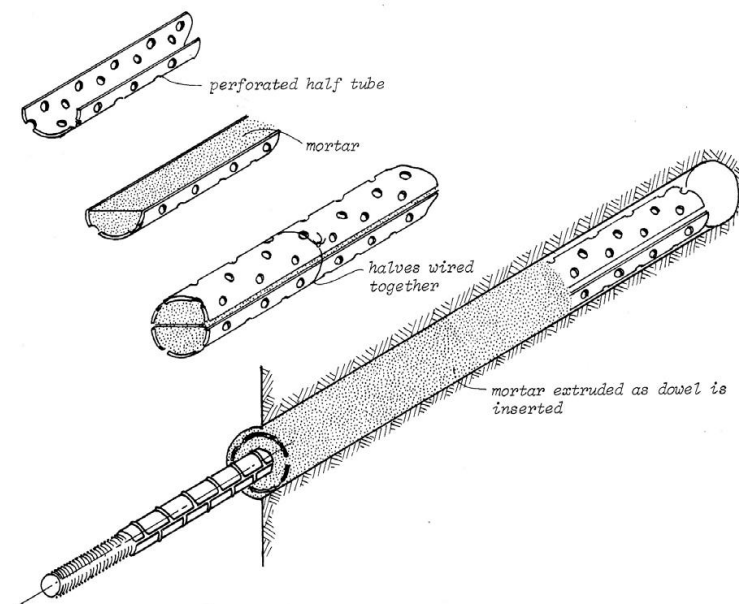
- Παθητικές (μη προεντεταμένες)

1) Σκυροδέματος απλές: Στην οπή εισάγεται πηχτό ένεμα με απλή αντλία. Εισάγεται μεταλλική ράβδος (βλήτρο), η οποία πιέζει το ένεμα και το αναγκάζει να καλύψει όλα τα κενά και να επιτύχει την πακτώση της ράβδου σε όλο το μήκος. Τα βλήτρα αυτά είναι απλά και χαμηλού κόστους. Δεν μπορούν να προενταθούν και πρέπει να τοποθετούνται πριν την παραμόρφωση του βράχου. Στην περίπτωση που το πέτρωμα είναι έντονα ρηγματωμένο, το ένεμα χάνεται μέσα στις ρωγμές και χρησιμοποιείται το βλήτρο σκυροδέματος perfo.



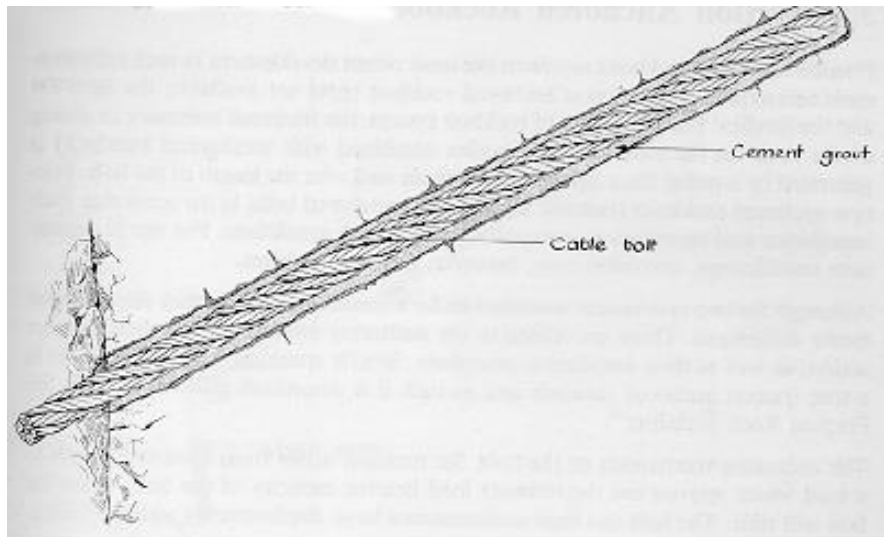
Εικόνα 3.29: Εισαγωγή μεταλλικής ράβδου

2) Σκυροδέματος perfo: Διάτρητα ημικελύφη, γεμισμένα με τσιμεντοκονία, συνδεδεμένα με σύρμα που εισάγονται στην οπή. Εισάγεται η μεταλλική ράβδος (βλήτρο) η οποία πιέζει το τσιμεντοκονίαμα να βγει από τις οπές των ημικελυφών προς το πέτρωμα και να γεμίσει τα κενά. Τα βλήτρα προσφέρουν καλή πρόσφυση. Αν είναι μικρού μήκους μπορούν να προενταθούν. Είναι υψηλότερου κόστους από τα απλά σκυροδέματος.



Εικόνα 3.30: Σκυροδέματος perfo

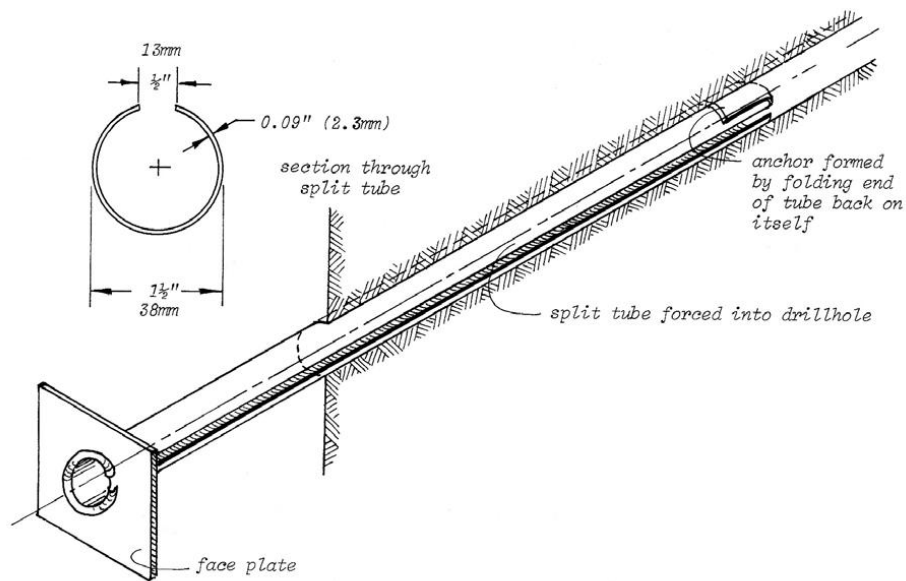
3) Καλώδια: Συρματόσχοινα, τένοντες και καλώδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως και οι ράβδοι χάλυβα στις παραπάνω εφαρμογές. Ένα τμήμα του συρματόσχοινου θα ενεματωθεί και θα προενταθεί. Το τμήμα που θα μείνει χωρίς ένεμα και για λόγους προστασίας από διάβρωση καλύπτετε με πλαστικό σωλήνα. Τα συγκεκριμένα αγκύρια χρησιμοποιούνται για αγκύρωση πασσαλότοιχου σε υπόγειο χώροστάθμευσης.



Εικόνα 3.31: Καλώδια

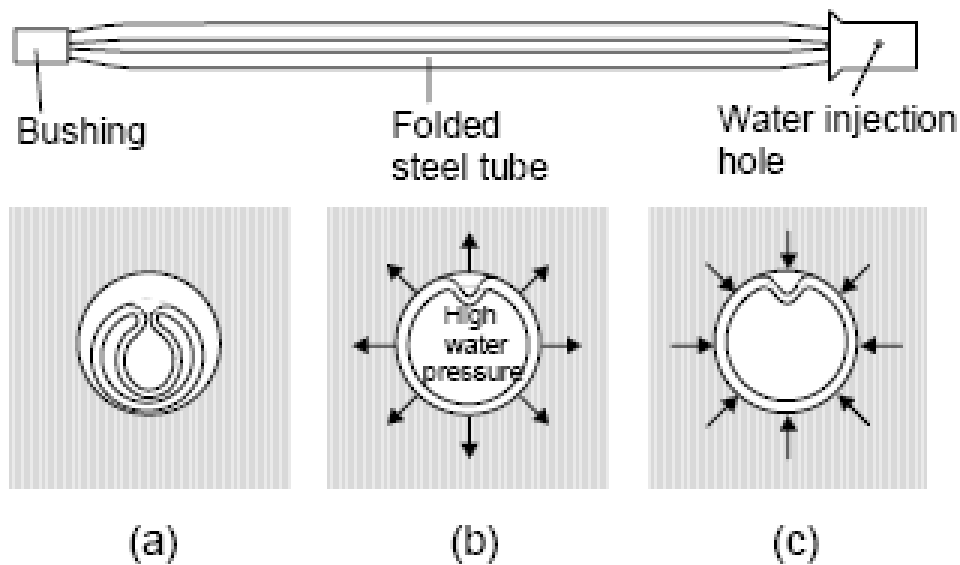
- Παθητικές τριβής

1) Διόγκωση: Ένας σωλήνας με εγκοπή διαμέτρου 38mm εξαναγκάζεται συμπιεζόμενος να εισέλθει στην γεωτρητική οπή διαμέτρου 35mm. Η δράση ελατηρίου του συμπιεσμένου σωλήνα εφαρμόζει δυνάμεις στο πέτρωμα και δημιουργεί δυνάμεις τριβής εμποδίζοντας το πέτρωμα να ολισθήσει. Η δύναμη της τριβής μεγαλώνει όσο η εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα σκουριάζει. Οι ήλοι είναι εύκολοι στην τοποθέτηση και έχουν χαμηλότερο κόστος από αυτούς του σκυροδέματος. Χρειάζεται προσοχή στη διάνοιξη της οπής διότι δεν πρέπει να είναι μικρότερη ούτε μεγαλύτερη από το προκαθορισμένο μέγεθος. Αν η οξείδωση του σωλήνα γίνει πολύ γρήγορα δεν είναι κατάλληλα για μακροχρόνια υποστήριξη του πετρώματος.



Εικόνα 3.32: Διόγκωση

2) Υδραυλικές: Μέσα στη γεώτρηση εισάγεται αναδιπλωμένος σωλήνας σφραγισμένος στο ένα του άκρο (α). Στη συνέχεια στο εσωτερικό του σωλήνα εισάγεται νερό με πίεση (β). Κάτω από την πίεση του νερού ο σωλήνας αναπτύσσεται σε όλη του τη διάμετρο η οποία είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο της οπής και πιέζει τα τοιχώματα του πετρώματος γύρω από την οπή. Αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής οι οποίες δεν επιτρέπουν την ολίσθηση του πετρώματος κατά μήκος της ράβδου (γ). Οι ήλοι αυτοί είναι εύκολοι και γρήγοροι στην τοποθέτησή τους και δεν απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό. Δεν απαιτείται χρόνος αναμονής. Έχουν το μειονέκτημα ότι έχουν προκαθορισμένο εργοστασιακά μήκος. Υπάρχει πρόβλημα διάβρωσης του σωλήνα και τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί τεχνική πλαστικοποίησής τους.



Εικόνα 3.33: Υδραυλικές

Ράβδοι στήριξης προ της εκσκαφής

Η προενίσχυση του πετρώματος γίνεται όταν η ενίσχυση του πετρώματος δεν μπορεί να γίνει αρκετά γρήγορα με την πρόοδο της εκσκαφής ή όταν οι μετακινήσεις πρέπει να ελαχιστοποιηθούν. Η προενίσχυση διακρίνεται σε:

- 1) Αγκύρια μετώπου: Ράβδοι ή καλώδια ή γυαλόκαρφα πλήρους συνάφειας, παθητικής λειτουργίας. Τοποθετούνται στο μέτωπο της εκσκαφής. Καταστρέφονται με την προώθηση της εκσκαφής και τοποθετούνται νέα φροντίζοντας ώστε να υπάρχει μήκος επικάλυψης.

2) Δοκίδες προπορείας: Αναλαμβάνουν φορτία κάμψης και διάτμησης.

Τοποθετούνται πάνω από την οροφή της σήραγγας (πριν την εκσκαφή της) με κλίση προς τα πάνω. Αποτελούνται από σωλήνες οι οποίοι γεμίζονται με ένεμα. Με τον τρόπο αυτόν η εκσκαφή πραγματοποιείται κάτω από την προστασία μιας φορπόλης (ομπρέλας) δοκίδων και οι μετακινήσεις ελαχιστοποιούνται. Μπορούν να τοποθετηθούν και σε περισσότερες από μια σειρές.



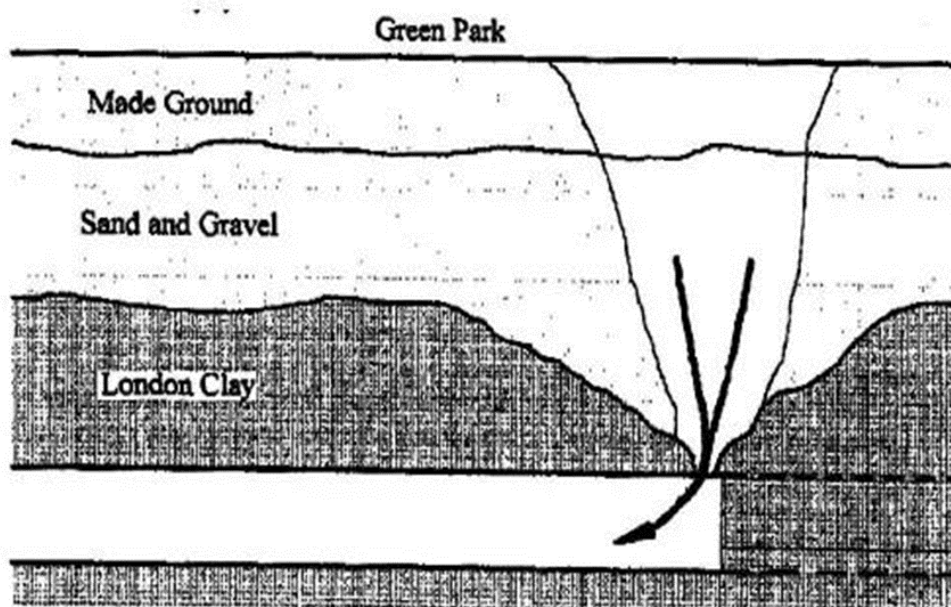
Εικόνα 3.34: Δοκίδες προπορείας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Εξαιτίας της ποικιλίας του εδαφικού ανάγλυφου απαιτήθηκε η κατασκευή οδικών σήραγγων. Οι οδικές σήραγγες εμφανίζουν αστοχίες και επηρεάζεται η λειτουργία και την ιδιότητα της σήραγγας. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η διάδοση πληροφοριών και η προώθηση της ευαισθητοποίησης σχετικά με τις αστοχίες σήραγγας που θα μπορούσαν να αποτελέσουν κίνδυνο για τη ζωή και την ιδιοκτησία. Είναι γνωστό ότι στους πελάτες και τους αντιπροσώπους έργων συνιστάται να εφαρμόζουν αποτελεσματικά μέτρα διαχείρισης γεωτεχνικών κινδύνων κατά το σχεδιασμό, τη διερεύνηση, το σχεδιασμό και την κατασκευή των έργων της σήραγγας. Ωστόσο παρακάτω αναφέρονται τόσο τοπικές όσο και διεθνείς περιπτώσεις που περιλαμβάνουν κατάρρευση ή υπερβολική παραμόρφωση του εδάφους:

1) Green Park (Λονδίνο, 1964)

Τμηματική σήραγγα επένδυσης Green Park προς Victoria που περνάει μέσα από τον πηλό με χαμηλή εδαφική κάλυψη.



Εικόνα 4.1: Γεωμετρική ανάλυση Green Park – Λονδίνο 1964

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, εισροή άμμου και χαλίκι θάβοντας το μεγαλύτερο μέρος της ασπίδας.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Πηλός επικαλυμμένος από άμμο και χαλίκια.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Χρησιμοποίηση ασπίδας τύμπανου.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Η στέψη της ασπίδας διείσδυσε μέσα από το στρώμα αργίλου σε άμμο και χαλίκι.

·Συνέπεια:

1) Μικρή φυσική ζημιά στην ασπίδα.

2) Καθυστέρηση προγράμματος.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Άξονας βυθίστηκε από την επιφάνεια για να καταστεί δυνατή η εκτόξευση και η επεξεργασία του υλικού, το χαλαρό υλικό ξεθάφτηκε με το χέρι.

·Διδάγματα: Αδημοσίευτο

2) Γραμμή Victoria κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (Victoria Line Underground) (UK, 1965)

Σήραγγα μήκους 300 m και εσωτερικής διαμέτρου 3,7 m που διέρχεται κάτω από μια παρωχημένη αυλή συγκέντρωσης σιδηροδρόμων. Η αρχική κατασκευή ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 1960, όταν ξεκίνησαν δύο δοκιμαστικές σήραγγες από το Tottenham στο Manor House κάτω από το Seven Sisters Road. Οι σήραγγες ανασκάφηκαν χρησιμοποιώντας μια πειραματική περιστροφική ασπίδα «τύμπανου εκσκαφέα», που τροφοδοτείται από υδραυλικούς κριούς, που μπορούσε να κόψει περισσότερα από 18 m την ημέρα. Το έργο ολοκληρώθηκε τον Ιούλιο του 1961, με την προσδοκία ότι θα χρησιμοποιηθεί για την ολοκληρωμένη γραμμή Victoria.



Εικόνα 4.2: Υπό κατασκευή σήραγγας Γραμμή Victoria – UK 1965

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, εισροή άμμου και χαλίκι.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Πηλός υποστρωμένος από άμμο και χαλίκια.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Χρησιμοποιώντας ασπίδα χειρός και επένδυση από χυτοσίδηρο.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Η ασπίδα ήταν αναποτελεσματική στη στήριξη του υπερκείμενου εδάφους.

·Συνέπεια: Καμία σημαντική ζημιά, το πρόγραμμα καθυστέρησε για περίπου 6 μήνες.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Μακροχρόνια λειτουργία αρμολόγησης για σταθεροποίηση του εδάφους στην περιοχή.

·Διδάγματα: Αδημοσίευτο

3) Σήραγγα λυμάτων (Southend-On-Sea Sewage Tunnel) (Λονδίνο, 1966)

Σήραγγα μήκους 40 m με διάμετρο 1,35 m κινούμενο κυρίως χειροκίνητα.



Εικόνα 4.3: Κατασκευή σήραγγας λυμάτων -Λονδίνο 1966

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, εισροή νερού στη σήραγγα.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Πηλός επικαλυμμένος από άμμο και χαλίκια.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Οδηγείται ως επί το πλείστον με το χέρι και είναι επενδυμένο με τμήματα PCC.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Η σήραγγα τέμνει τον πυθμένα ενός εγκαταλειμμένου πηγαδιού διαμέτρου 600 mm.

·Συνέπεια: Δεν υπάρχει απώλεια ζωής ή τραυματισμός.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Η κίνηση της σήραγγας συνεχίστηκε σε ένα ξύλινο κιβώτιο και κατασκευάστηκαν δύο πλάκες για να κλείνουν τον πυθμένα του φρεατίου.

·Διδάγματα: Αδημοσίευτο

4) Οδική σήραγγα Rørvikskaret στον Αυτοκινητόδρομο 19, (Rørvikskaret Road Tunnel on Highway 19) (Νορβηγία, Μάρτιος 1970)

Η οδική σήραγγα είχε μήκος 726 m και πλάτος 8 m. Το μέτωπο της σήραγγας κατέρρευσε και δημιουργήθηκε ένα σπήλαιο ύψους 100 m από τη σήραγγα μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Η κορυφή του άξονα στην επιφάνεια του εδάφους είχε διάσταση περίπου 25m x 50m. Αν και μαλακό υλικό ανασύρθηκε από τη σήραγγα κατά τη διάρκεια της άνοιξης το 1971, η εισχώρηση συνεχίστηκε από το φρεάτιο μέχρι το φθινόπωρο του 1972. Η ζώνη εισόδου του σπηλαίου εκτεινόταν 30 m κατά μήκος της σήραγγας και ο συνολικός όγκος υλικού που ανασύρθηκε από τη σήραγγα ήταν περίπου 75.000 m³.



Εικόνα 4.4: Οδική σήραγγα Rørvikskaret – Μάρτιος 1970

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Κρυσταλλικοί γρανιτική σύνθεση. Η σήραγγα ανασκάφηκε σε μια μεγάλη ζώνη διογκούμενης αργίλου.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Κατασκευασμένο με τη μέθοδο διάτρησης και έκρηξης και υποστηρίζεται κυρίως από μπουλόνια βράχου, χαλύβδινους ιμάντες και πλέγμα.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Δεν υπάρχουν μέτρα σταθεροποίησης για τη στήριξη μιας μεγάλης διογκούμενης τομής αργίλου πριν από την ανατίναξη.

·Συνέπεια:

1) Το πρόγραμμα καθυστέρησε για περισσότερα από 3 χρόνια.

2) Διπλασιασμός του κόστους της σήραγγας σε σύγκριση με το εκτιμώμενο κόστος.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Η εγκατάσταση θόλου από κυματοειδή χάλυβα, χαλύβδινων σωλήνων και επένδυσης από σκυρόδεμα πάχους 500 mm δεν ήταν επιτυχής. Το σπήλαιο σταμάτησε μετά την πλήρωση περίπου 3.000 m³ σκυροδέματος στο φρεάτιο για να σχηματιστεί ένα βύσμα από τη σήραγγα μέχρι 10 m πάνω από το στέμμα και άλλα 4.000 m³ άμμου και πέτρας από την κορυφή του φρεατίου.

·Διδάγματα: Η σημασία της επαρκούς έρευνας εδάφους για τον εντοπισμό (εάν υπάρχει αδύναμο έδαφος) και για την παροχή μέτρων για την υποστήριξη του ασθενούς εδάφους πριν από την εκσκαφή σήραγγας.

5) Σήραγγα Orange-fish (Νότια Αμερική, 1970)

Κυκλική σήραγγα σχεδιασμένη για να μεταφέρει νερό άρδευσης από τον Ποταμό Orange (80 km μήκος και 5,3 m διάμετρος, 1.200 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας).



Εικόνα 4.5: Orange-fish Tunnel - Νότια Αμερική 1970

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής,

1^η αστοχία: Εισροή βαρέων υδάτων (περίπου 55.000 It/ sec στη σήραγγα στα 14 bar).

2^η αστοχία: Πυρκαγιά (αέριο μεθανίου αναφλέχθηκε από έκρηξη, αλλά δεν σημειώθηκε έκρηξη καθώς το αέριο δεν έφτασε στη συγκέντρωση εκρηκτικών).

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Ψαμμίτες, λασπόλιθοι, γενικά οριζόντια στρωμένες με περιστασιακά αναχώματα δολερίτη.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Χρησιμοποιήθηκε επένδυση με επιτόπιο σκυρόδεμα 225 mm. Προεντεταμένα αγκύρια ρητίνης μήκους 1,5 m σε απόσταση 1,5 m με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα όπου απαιτείται.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Η σήραγγα περνούσε από ένα ρηχό αντίκλινο και τέμνει μια σχισμή πλάτους περίπου 75 mm σχεδόν κάθετα, αέριο μεθάνιο μπήκε από μια σχισμή στη σήραγγα κατά την εκσκαφή.

·Συνέπεια: Ολόκληρο τμήμα της σήραγγας μήκους 1,6 km πλημμύρισε μέσα σε 24 ώρες, η φωτιά έκαιγε για περίπου 6 μήνες.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Πραγματοποιήθηκε συναρμολόγηση από την επιφάνεια και η σήραγγα αντλήθηκε στεγνά. Για την εκσκαφή αναπτύχθηκε η μέθοδος «Blob grouting» (Συναρμολόγηση άμορφης μάζας) με δακτύλιο πολύ παχύ και μη ενυδατωμένου μπεντονίτη για τη σφράγιση των ρωγμών σε μικρή απόσταση από τη σήραγγα. Ένας τοίχος κατασκευάστηκε κατά μήκος της σήραγγας συμπεριλαμβανομένης της ρωγμής που φέρει μεθάνιο, αρμολογημένο με τσιμέντο.

·Διδάγματα: Αδημοσίευτο

6) Σήραγγα Πενμανσίελ (Penmanshiel Tunnel) (Σκωτία, Μάρτιος 1979)

Η διπλή σιδηροδρομική σήραγγα Penmanshiel έχει άνοιγμα 7,72 m και ύψος 4,7 m. Το 1979 η οροφή της σήραγγας κατέρρευσε κατά τη διάρκεια εργασιών διεύρυνσης της σήραγγας όταν ανακατασκευαζόταν το ανάστροφο της σήραγγας για να αυξηθεί ο χώρος κεφαλής.



Εικόνα 4.6: Σήραγγα Πενμασίελ – Μάρτιος 1979

·Είδος αστοχίας: Αστοχία εδάφους κατά την ανακατασκευή, πτώση βράχου σε μήκος περίπου 20 m.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Ιζηματογενές πέτρωμα με απότομη κλίση και πολύπλοκη στρωματοποίηση με μέση κάλυψη 25 έως 30 m, ξηρές συνθήκες.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Βράχος με ασπίδα επενδυμένη με 4 ή 5 δακτυλίους από τούβλα.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Η ύπαρξη εκφυλισμένης και πολύπλοκης δομής πάνω από τη γραμμή της σήραγγας η οποία δεν μπορούσε να προβλεφθεί συσσωρεύσε βαρύ φορτίο στον δακτύλιο ασπίδας και στα πλευρικά τοιχώματα, η πρόσθετη εκσκαφή στη σήραγγα αύξησε τις τάσεις στον ήδη υπερφορτισμένο βράχο στα πλαϊνά τοιχώματα.

·Συνέπεια: Σπασμένος βράχος που ρέει στη σήραγγα με πλήρη απόφραξη, 13 εργάτες διέφυγαν αλλά 2 εργάτες σκοτώθηκαν.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Παρέχεται άμεση στήριξη στο τμήμα της σήραγγας με μια σειρά από χαλύβδινα τόξα, μόνιμη εγκατάλειψη 1.000 m της σήραγγας και εκτροπή της γραμμής σε νέα ευθυγράμμιση.

·Διδάγματα: Σημασία των γεωλογικών συνθηκών της τοποθεσίας.

7) Μετρό του Μονάχου (Munich Underground) (Γερμανία, 1980)

Νέα αυστριακή μέθοδος σήραγγας με την μέθοδο NATM. Κατασκευή δίδυμων σηράγγων διαμέτρου 6 m.



Εικόνα 4.7: Κατασκευή μετρού στο Μοναχό το 1980

·Είδος αστοχία: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, τεράστια ροή μαλακού πηλού μέσα στο τούνελ.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Μίγμα αργιλικών με ανθρακικά (μάργα) με κάλυμμα 3m πάνω από τις σήραγγες, επικαλυμμένο από μαλακό πηλό 12,5 m.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Νέα αυστριακή μέθοδος διάνοιξης σήραγγας (NATM).

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Τοπική διακύμανση στη γεωλογία με μείωση της κάλυψης μάργας σε 1-1,5 m οδηγεί σε υπερένταση της προσωρινής επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

·Συνέπεια: Καταβόθρα πλάτους 10 m και βάθους 14 m, δεν υπήρχε τραυματισμός.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Το κενό επιχωματώθηκε με θρυμματισμένο βράχο και τσιμέντο και ρευστοποιήθηκε υπό πίεση.

·Διδάγματα: Ο κίνδυνος εκσκαφής σήραγγας μέσα από λεπτό κάλυμμα μάργες.

8) Οδική σήραγγα Χόλμεστραντ (Holmestrand Road Tunnel) (Νορβηγία, 16 Δεκεμβρίου 1981)

Η οδική σήραγγα Χόλμεστραντ είχε μήκος 1,78 km και πλάτος 10 m.



Εικόνα 4.8: Κατασκευή σήραγγας Χόλμεστραντ - Δεκέμβριος 1981

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, μια μικρή εισροή συνέβη κατά τη διαδικασία μετακίνησης του μεταλλικού ξυλότυπου για επένδυση από σκυρόδεμα.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Διάφοροι τύποι πετρωμάτων (βασάλτης, ηφαιστειακά αναχώματα, μαλακός σχιστόλιθος και συγκρότημα χαλαζία).

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Κατασκευάστηκε με τη μέθοδο διάτρησης και ανατίναξης και υποστηρίζεται από επένδυση έγχυτου σκυροδέματος.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Παρουσιάστηκε μια αδύναμη ζώνη ρήγματος.

·Συνέπεια: Απαιτείται περισσότερος χρόνος (5 ώρες που επεκτείνονται σε 25 ώρες) για την ανάσυρση και τη σκυροδέτηση της βάσης για το καλούπι.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Περίπου 600 m συντρίμια μεταφέρθηκαν για προσωρινή υποστήριξη. Μέχρι τη διάρρηξη η σήραγγα ανασκάφηκε με γεωτρήσεις μήκους μόνο 2 m σε συνδυασμό με μπουλόνια μήκους 6 m από τη χυτή επένδυση σκυροδέματος του προηγούμενου γύρου και επένδυση από χυτό σκυρόδεμα κοντά στην όψη.

·Διδάγματα: Απαιτούνται μπουλόνια ενέματος μπροστά από το μέτωπο σε συνδυασμό με οπλισμένο σκυρόδεμα. Μπουλόνια βράχου και ενισχυμένες νευρώσεις από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις ζώνες ρήγματος με εξαιρετικά κακή ποιότητα βράχου.

9) Σιδηροδρομική σήραγγα Γκιμπέι (Gibe Railway Tunnel) (Ρουμανία, 1985)

Σιδηροδρομική σήραγγα μήκους 2,21 km και διαμέτρου 9 m.



Εικόνα 4.9: Σιδηροδρομική σήραγγα Γκιμπέι – 1985

·Είδος αστοχίας: Είσοδος νερού με ταχύτητα άνω των 10 lt/sec συνοδευόμενη από τρεχούμενη άμμο στη σήραγγα που καλύπτει το μηχάνημα. Το πρόγραμμα καθυστέρησε για περίπου 6 μήνες.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Συμπαγής πηλός με σχισμές.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Θωράκιση (μηχανικό κάλυμμα με ασπίδα διαμέτρου 9,05 m, εξοπλισμένο με υδραυλικό κουβά και μεταφορική ταινία στο κάτω μέρος).

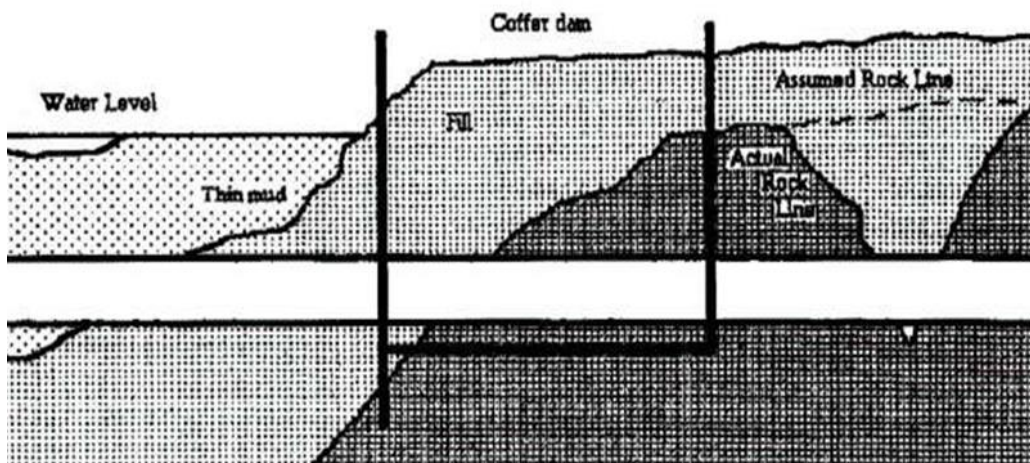
·Πιθανή αιτία αστοχίας: Η σήραγγα διαπέρασε ένα φακό βρεγμένης λεπτόκοκκης άμμου ακριβώς πάνω από την στέψη.

·Συνέπεια: Είσοδος νερού με ταχύτητα άνω των 10 lt/sec συνοδευόμενη από τρεχούμενη άμμο στη σήραγγα που καλύπτει το μηχάνημα, το πρόγραμμα καθυστέρησε για περίπου 6 μήνες.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Αδημοσίευτο

·Διδάγματα: Αδημοσίευτο

10) Σήραγγα συλλογής Moda - Σχέδιο Αποχέτευσης Κωνσταντινούπολης (Moda Collector Tunnel, Istanbul Sewerage Scheme) (Τουρκία, 1989)



Εικόνα 4.10: Γεωμετρική ανάλυση-Moda Collector Tunnel

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, λεπτό χώμα κυλούσε στη σήραγγα σχηματίζοντας μια τρύπα στο δρόμο καθώς το TBM περνούσε μέσα από το βράχο στο μαλακό έδαφος.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Διάφορες συνθήκες εδάφους (πολύ λεπτή και ασταθής λάσπη και βράχος).

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Σήραγγα που κατασκευάστηκε από την μέθοδο κλειστής διάνοιξης TBM.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Η σήραγγα τέμνει μια περιοχή από μαλακό πηλό.

·Συνέπεια: Μια τρύπα σχηματίστηκε στο δρόμο περίπου 5 m πιο πάνω, θρυμματισμένος βράχος μπλοκάρει την ασπίδα.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Ένα μέρος της σήραγγας βυθίστηκε για να απελευθερωθεί το TBM.

·Διδάγματα: Θα πρέπει να τρυπηθούν οπές ανιχνευτή για να επιβεβαιωθεί το προφίλ του βράχου.

11) Μετρό Σεούλ – Γραμμή 5 (Seoul Metro Line 5 – Phase 2) (Κορέα, 17 Νοεμβρίου 1991)

Κατασκευή της σήραγγας του μετρό της Σεούλ κοντά στο Ματζάνγκ (Majang). Η σήραγγα βρίσκεται στα 15-30 m κάτω από το έδαφος.



Εικόνα 4.11: Μετρό Σεούλ – Νοέμβριος 1991

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, μετά την ανατίναξη δημιουργήθηκε κρατήρας 20 m x 15 m και βάθους 4 m στην επιφάνεια του εδάφους. Το νερό από το ποτάμι κυλούσε στη σήραγγα.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Γρανίτης, διαβρωμένος υδροφόρος ορίζοντας τυπικά 3-10 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Με μέθοδο διάτρησης και εκτόξευσης.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Λεπτός βράχος και εισροή εδάφους υπόγειων υδάτων.

·Συνέπεια: Οι δρόμοι κατέρρευσαν και ο αγωγός αερίου έσπασε.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Επίχωση του κρατήρα με χώμα ακολουθούμενη από τσιμεντοκονία και χημική αρμολόγηση.

·Διδάγματα: Ανεπαρκής έρευνα εδάφους, απροσδόκητη εισροή υπόγειων υδάτων, χωρίς ανάλυση ευστάθειας πρόσοψης σήραγγας. Δεν λαμβάνονται υπόψη οι επιπτώσεις της ανατίναξης σε ξεπερασμένη ζώνη με ρηχό κάλυμμα.

12) Μετρό Σεούλ – Γραμμή 5 (Seoul Metro Line 5 - Phase 2) (Κορέα, 27 Νοεμβρίου 1991)

Κατασκευή της σήραγγας του μετρό της Σεούλ κοντά στο Τανγκσάν (Tangshan). Η σήραγγα βρίσκεται στα 15-30 m κάτω από το έδαφος.



Εικόνα 4.12: Κατασκευαστική αστοχία μετρό Σεούλ – Νοέμβριος 1991

·Είδος αστοχία: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής,

27 Νοεμβρίου 1991:

10:40 π.μ.: ανατινάξεις

4:00 μ.μ.: πέφτει βράχος στην πρόσοψη της σήραγγας.

10:00 μ.μ.: εισροή εδάφους και υπόγειων υδάτων στη σήραγγα.

28 Νοεμβρίου 1991:

3:20 π.μ.: σημαντική κατάρρευση στην επιφάνεια του εδάφους σχηματίζοντας κρατήρα διαμέτρου 25 m.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Γρανίτες, διαβρωμένος υδροφόρος ορίζοντας τυπικά 3-10 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Με μέθοδο διάτρησης και εκτόξευσης.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Μη εντοπισμένος εκ των προτέρων γρανίτης και έδαφος υψηλής διαπερατότητας.

·Συνέπεια: 3 κτίρια κατέρρευσαν, έσπασαν δίκτυα ύδρευσης, αγωγοί αερίου και αποχέτευση.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Επίχωση του κρατήρα με χώμα ακολουθούμενη από τσιμεντοκονία και χημική αρμολόγηση.

·Διδάγματα: Ανεπαρκής έρευνα εδάφους, απροσδόκητη εισροή υπόγειων υδάτων χωρίς ανάλυση ευστάθειας μετώπου της σήραγγας.

13) Μετρό Σεούλ – Γραμμή 5 (Seoul Metro Line 5 - Phase 2) (Κορέα , 11 Φεβρουαρίου 1992)

Κατασκευή της σήραγγας του μετρό της Σεούλ κοντά στο Γιούντο (Youido). Η σήραγγα βρίσκεται στα 15-30 m κάτω από το έδαφος.



Εικόνα 4.13: Κατασκευαστική αστοχία μετρό Σεούλ – Φεβρουάριος 1992

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, σημαντική εισροή υπόγειων υδάτων. Περίπου 4,5 tn χώματος εισέρρευσαν στη σήραγγα, κρατήρας 38 m πλάτος και 6 m βάθος στην επιφάνεια του εδάφους.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Γρανίτες, διαβρωμένος υδροφόρος ορίζοντας στα 11,8 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Ανασκαφή δρόμου.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Γρανίτης στην πρόσοψη της σήραγγας και έδαφος υψηλής διαπερατότητας.

·Συνέπεια: Ο δρόμος 4 λωρίδων κατέρρευσε, βλάβες σε κοινόχρηστους χώρους.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Επίχωση του κρατήρα με χώμα ακολουθούμενη από τσιμεντοκονία και χημική αρμολόγηση.

·Διδάγματα: Ανεπαρκής έρευνα εδάφους, απροσδόκητη εισροή υπόγειων υδάτων χωρίς ανάλυση ευστάθειας πρόσοψης σήραγγας.

14) Μετρό Σεούλ - Γραμμή 5 (Seoul Metro Line 5 - Phase 2) (Κορέα, 7 Ιανουαρίου 1993)

Κατασκευή της σήραγγας του μετρό της Σεούλ κοντά στο Γιονγκντούνγκπο (Yongdungpo). Η σήραγγα βρίσκεται στα 15-30 m κάτω από το έδαφος.



Εικόνα 4.14: Σήραγγα Σεούλ - Ιανουάριος 1993

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής. Η σήραγγα κατέρρευσε μετά την απομάκρυνση των ρωγμών, το τούνελ κατέρρευσε ξεκινώντας από την αριστερή πλευρά της στέψης. 900 m³ χαλαρού υλικού εισέρρευσαν στη σήραγγα και καταγράφηκε εισροή νερού έως και 300 lt/sec.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Γρανίτης

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Μέθοδος διάτρησης και εκτόξευσης.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Γρανίτης στην επιφάνεια της σήραγγας και υψηλή πίεση υπόγειων υδάτων.

·Συνέπεια: Ο δρόμος 2 λωρίδων κατέρρευσε, βλάβες στους κοινόχρηστους χώρους.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Επίχωση του κρατήρα με χόμα ακολουθούμενη από τσιμεντοκονία και χημική αρμολόγηση.

·Διδάγματα: Ανεπαρκής έρευνα εδάφους, απροσδόκητη εισροή υπόγειων υδάτων χωρίς ανάλυση ευστάθειας πρόσοψης σήραγγας. Δεν λαμβάνονται υπόψη οι επιπτώσεις της ανατίναξης σε ξεπερασμένη ζώνη με ρηχό κάλυμμα.

15) Γραμμή 5 του μετρό Σεούλ (Seoul Metro Line 5-Phase 2) (Κορέα, 1 Φεβρουαρίου 1993)

Κατασκευή της σήραγγας του μετρό της Σεούλ κοντά στο Ανγιαγκτσέον (Anyangcheon). Η σήραγγα βρίσκεται στα 15-30 m κάτω από το έδαφος.



Εικόνα 4.15: Seoul Metro Line 5 - Φεβρουάριος 1993

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής. Βρέθηκε γρανίτης στην επιφάνεια της σήραγγας, τα υπόγεια ύδατα κυλούσαν στη σήραγγα, οβάλ σχήμα περιοχή με πλάτος 60 m υποχώρησε.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Γρανίτης

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Ανασκάφηκε με κεφαλίδα δρόμου.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Γρανίτης και προσχώσεις στην πρόσοψη της σήραγγας, υψηλή πίεση υπόγειων υδάτων.

·Συνέπεια: Έξι βαριά φυτά θαμμένα.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Επίχωση του κρατήρα με χώμα ακολουθούμενη από τσιμεντοκονία και χημική αρμολόγηση.

·Διδάγματα: Ανεπαρκής έρευνα εδάφους, απροσδόκητη εισροή υπόγειων υδάτων χωρίς ανάλυση ευστάθειας πρόσοψης σήραγγας.

16) Μετρό του Μονάχου (Munich Underground) (Γερμανία, 27 Σεπτεμβρίου 1994)

Σήραγγα διαμέτρου 7 m που υποστηρίζεται από επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η σήραγγα ήταν κάτω από ένα στρώμα αργίλου που υπερκαλύπτει χαλίκι που φέρει νερό.



Εικόνα 4.16: Κατασκευαστική αστοχία μετρό Μονάχου – Σεπτέμβριος 1994

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, γρήγορη εισροή νερού και υλικών εδάφους. Μεγάλος κρατήρας καθίζησης γέμισε γρήγορα με υπόγεια νερά. Σχηματίστηκε κρατήρας πλάτους 20 m και βάθους 18,5 m.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Η μάργα επικαλύπτεται από περίπου 15,5 m υπόγειου ύδατος που φέρει χαλίκι. Υπόγεια ύδατα 4 m κάτω από το επίπεδο του εδάφους.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Νέα αυστριακή μέθοδος διάνοιξης σήραγγας NATM.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Το στρώμα μάργας που διαχωρίζει τα υπόγεια ύδατα που φέρουν στρώματα ήταν πολύ πιο λεπτό από ό,τι είχε αρχικά υποθεθεί. Οι ρωγμές με άμμο στο στρώμα μάργας λειτουργούσαν ως προτιμώμενες οδοί για το νερό.

·Συνέπεια: Λεωφορείο έπεσε στον κρατήρα, 3 επιβάτες σκοτώθηκαν και τραυματίστηκαν 30 άτομα.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Τοίχος με πασσάλους για σχηματισμό άξονα, εκσκαφή στο εσωτερικό του φρεατίου.

·Διδάγματα: Κίνδυνος εκσκαφής σήραγγας μέσα από λεπτό κάλυμμα μάργας.

17) Σήραγγα Χίθροου Εξπρές (Heathrow Express) (UK, 21 Οκτωβρίου, 1994)

Η σήραγγα Χίθροου Εξπρές κατασκευάστηκε με την μέθοδο κλειστής διάνοιξης NATM στο Λονδίνο.



Εικόνα 4.17: Κατασκευαστική αστοχία σήραγγας Χίθροου Εξπρές – Οκτώβριος 1994

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής.

Σχηματίστηκε κρατήρας διαμέτρου 10 m.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Πηλός

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Νέα αυστριακή μέθοδος διάνοιξης σήραγγας NATM.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Μια σειρά από λάθη σχεδιασμού, κακή κατασκευή και μη ποιοτικός έλεγχος.

·Συνέπεια: Διαφορική διευθέτηση που προκαλείται σε παρακείμενα κτίρια. Τα σιδηροδρομικά δρομολόγια προς τον τερματικό σταθμό 4 διακόπηκαν για ένα μήνα. Τα διορθωτικά μέτρα προκάλεσαν χάος στο αεροδρόμιο του Χίθροου. Κόστος ανάκτησης 150 εκατομμύρια δολάρια (3 φορές το αρχικό ποσό συμβολαίου).

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Επίχωση 13.000 m³ σκυρόδεμα.

·Διδάγματα: Πρέπει να προγραμματίζονται μέτρα για τη διασφάλιση της ασφάλειας. Να μην παραβλέπονται κρίσιμα τεχνικά ζητήματα στην αναζήτηση χρόνου.

18) Μετρό Λος Άντζελες (Los Angeles Metro) (ΗΠΑ, 22 Ιουνίου 1995)

Εργασίες επιδιόρθωσης για την ευθυγράμμιση μιας υπάρχουσας σήραγγας TBM με διάμετρο 6,7 m και βάθος 25 m.



Εικόνα 4.18: Κατασκευαστική αστοχία μετρό Λος Άντζελες – Ιούνιος 1995

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής. Βύθισμα βάθους 25 m που προκλήθηκε από κατάρρευση νότιας οπής. Παρατηρήθηκε σοβαρή ρωγμή στην προσωρινή επένδυση της βόρειας οπής.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Σκληρός αργυρόλιθος επικαλύπτεται από προσχώσεις με επίπεδο υπόγειων υδάτων 10-12 m κάτω από την επιφάνεια.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Μέθοδος TBM με τμηματική επένδυση, μπουλόνια βράχου για σταθεροποίηση τμημάτων πριν την αφαίρεση.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Παρουσιάστηκε αστοχία κατά την αφαίρεση της τμηματικής επένδυσης στην οροφή της σήραγγας και την επαναφορά της σήραγγας για τη διόρθωση της οριζόντιας ευθυγράμμισης. Απροσδόκητες συνθήκες εδάφους (προσχώσεις που βρέθηκαν πολύ βαθύτερα), σπασμένο δίκτυο ύδρευσης (μη επιβεβαιωμένο).

·Συνέπεια: Μήκος δρόμου 30 m τεσσάρων λωρίδων (Hollywood Boulevard) που οδηγεί σε κλείσιμο του δρόμου. Κατάρρευση δικτύου ύδρευσης 250 mm που συνέβαλε στην αστοχία, σπασμένος σωλήνας αερίου, εκκένωση των κατοίκων της περιοχής.

Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Χαλύβδινοι δακτύλιοι τοποθετήθηκαν στην σήραγγα εκατέρωθεν της κατάρρευσης, 3.300 m³ ενέματος για να γεμίσει το κενό και να σταθεροποιήσει την περιοχή, ανάπλαση δρόμου.

Διδάγματα: Δημοσίευτο

19) Σήραγγες αυτοκινητοδρόμων (Motorway Tunnels) (Αυστρία, 1993-1995)

Τέσσερις σήραγγες τριών λωρίδων, διπλού σωλήνα (T1-T4) με εσωτερική διατομή 103 m² και 30 m μεταξύ των κεντρικών γραμμών που κατασκευάζονται με τη μέθοδο διάτρησης και ανατίναξης.

T1: Μήκος 376 m

T2: Μήκος 562 m

T3: Μήκος 2,76 m

T4: Μήκος 1,23 m



Εικόνα 4.19: Σήραγγες αυτοκινητόδρομου

·Είδος αστοχίας: Δύο αστοχίες στο T3 το 1995,

1^η αστοχία: 650 m³ χαλαρού υλικού εισέρρευσε στη σήραγγα, καταγράφηκε εισροή νερού έως και 1.500 lt/sec

2^η αστοχία: ίδιου μεγέθους σημειώθηκε ημέρες μετά τους 6 μήνες ανάκτησης της απώλειας των 10 m της σήραγγας.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Ψαμμίτης και σχιστόλιθος με ζώνες θρυμματισμένου υλικού.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, κοχλίες βράχου, πρόσθιο πολτό, χαλύβδινες νευρώσεις και ανεστραμμένες δοκοί.

·Πιθανή αιτία αστοχίας:

Αποτυχίες στο T4 το 1993: Αποτυχία έγκαιρης εφαρμογής της υποστήριξης.

Δύο αστοχίες στο T3 το 1995: Η σήραγγα διαπέρασε υδατοπερατό στρώμα σχιστόλιθου λεπτής στρώσης, το οποίο βρίσκεται πάνω και πάνω από τη θέση αστοχίας.

·Συνέπεια: Η όψη του τούνελ υποχώρησε και υπήρξε καθυστέρηση κατασκευής.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης:

Αποτυχίες στο T4 το 1993: Για την επακόλουθη εκσκαφή υιοθετήθηκε φορμόλη (ομπρέλα) πρόσοψης με διάτρητους σωλήνες μήκους 6 m, 50 mm. Διατηρήθηκε πλούσιος κεντρικός πυρήνας και η ανασκαφή έγινε σε μικρά τμήματα.

Δύο αποτυχίες στο T3 το 1995: Οι εργασίες προχώρησαν με εξαιρετική προσοχή.

·Διδάγματα: Η υποστήριξη θα πρέπει να εγκατασταθεί εγκαίρως.

20) Μετρό Ντόγκλαντ (Docklands Light Rail), (UK, 23 Φεβρουαρίου 1998)

Σήραγγα που κατασκευάστηκε για το Ντόγκλαντ με διάμετρο 5,2 m με την μέθοδο κλειστής διάνοιξης TBM.



Εικόνα 4.20: Κατασκευαστική αστοχία μετρό Ντόγκλαντ – Φεβρουάριος 1998

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής. Στους χώρους του George Green School σχηματίστηκε κρατήρας πλάτους 22 m και βάθους 7 m.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Άμμος και χαλίκια.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: TBM

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Υψηλή πίεση πεπιεσμένου αέρα εντός της σήραγγας που προκάλεσε αστοχία.

·Συνέπεια: Παράθυρα έως και 100 m σπασμένα από βροχή λάσπης.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Αδημοσίευτο

·Διδάγματα: Απαιτούνται ειδικές εκτιμήσεις/υπολογισμοί για να αποδειχθεί η επάρκεια του συντελεστή ασφάλειας.

21) Μετρό Αθηνών (Athens Metro) (Ελλάδα, 1991-1998)

Η κατασκευή του Ολυμπιακού Μετρό ξεκίνησε τον Νοέμβριο του 1991 και η λειτουργία του το 1998. Το εκτιμώμενο κόστος περίπου 2 δισεκατομμύρια ευρώ. Χρησιμοποιήθηκε 2 ειδών μεθόδων κλειστής διάνοιξης, η TBM και η NATM. Η μέθοδος TBM για την κατασκευή σήραγγων μήκους 11,7 km, διαμέτρου 9,5 m που βρίσκονται σε βάθος 15-20 m. Η μέθοδος NATM χρησιμοποιείται για άλλες κοντές βοηθητικές σήραγγες και οβάλ σχήματος σταθμοί όπου η ύπαρξη θαμμένων αρχαιοτήτων απέκλειε την ανοιχτή ανασκαφή.



Εικόνα 4.21: Κατασκευαστική αστοχία μετρό Αθήνας

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής. Συχνά συνέβησαν καταρρεύσεις στέγης σημαντικού μεγέθους. Μεγάλες και περιστασιακά ανεξέλεγκτες υπερσπάσεις για TBM.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: «Αθηναϊκός σχιστόλιθος» μια παχιά αλληλουχία ιζημάτων τύπου φλύσχη που περιλαμβάνει αργιλώδεις και ασβεστόλιθους με λεπτή στρώση. Εναλλασσόμενος με αργιλόλιθους, φυλλίτες, ιζηματογενείς σχιστόλιθους και περιστασιακά με ασβεστόλιθους.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: TBM, NATM

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Το έδαφος φαίνεται να οφείλεται σε ανεπαρκή αντοχή στις έντονα φθαρμένες και πολύ τεκτονισμένες ζώνες του αθηναϊκού σχιστόλιθου (που είναι ίζημα τύπου φλύσχη που αποτελείται από αργιλώδεις και ασβεστολιθικούς

ψαμμίτες με λεπτή στρώση με αλλοιώσεις και υποβάλλονται σε έντονες αναδιπλώσεις, ωθήσεις, ρωγμές). Μεγάλα ανοίγματα λάσπης της κεφαλής κοπής TBM που δεν μπορούν να ελέγξουν επαρκώς τη ροή λάσπης (η κεφαλή κοπής λειτουργεί στον ανοιχτό αέρα, δηλαδή υπό ατμοσφαιρική πίεση).

·Συνέπεια: Μεγάλη καθυστέρηση στη διάνοιξη σήραγγας TBM.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Οι κοιλότητες που προκλήθηκαν από τις υπερσπάσεις TBM επιχωματώθηκαν από ενέματα (που μερικές φορές έφταναν στην επιφάνεια του εδάφους).

·Διδάγματα: Αδημοσίευτο

22) Οδική σήραγγα Lærdal στην ευρωπαϊκή εθνική οδό E16 (Lærdal Road Tunnel)
(Norway, 15 June 1999)

Οδική σήραγγα σε περίπου 1.100 m βάθος, 24,5 km μήκος και 9 m πλάτος.



Εικόνα 4.22: Οδική σήραγγα Lærdal

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, ένα σπήλαιο που περιλαμβάνει σήραγγα μήκους 17 m και εκτείνεται μέχρι περίπου 11-12 m πάνω από την στέψη. Ο όγκος της αποτυχημένης βραχώδους μάζας εκτιμάται ότι είναι 1.200-1.500 m³.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Ογκώδης γρανιτικός βράχος. Εκσκαφή μέσω μιας ζώνης μείζονος ρήγματος (βράχος αναμειγμένος με πολλή διογκωμένη άργιλο).

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Μέθοδος διάτρησης και ανατίναξης. Υποστηρίζεται με ίνες χάλυβα, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και μπουλόνια βράχου.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Διαστολή της διογκούμενης άργιλου υπό υψηλή πίεση νερού κατά τη διάτρηση των μπουλονιών βράχου. Ο συνδυασμός της διογκωσης του βράχου και της υψηλής πίεσης παρήγαγε ένα φαινόμενο συμπίεσης, το οποίο είχε ως αποτέλεσμα τη σταδιακή εξασθένηση της βραχώδους μάζας στη σήραγγα.

·Συνέπεια: Το πλήρωμα εκκενώθηκε έγκαιρα και κανείς δεν τραυματίστηκε. Περίπου 10 ημέρες καθυστέρηση στις εργασίες εκσκαφής και αυξημένο κόστος για τις εργασίες αποκατάστασης.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Ακριβώς πίσω από τη ζώνη της σπηλιάς τοποθετήθηκαν ενισχυμένες νευρώσεις από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εκτός από στρώματα εκτοξευόμενου σκυροδέματος και μπουλονιών βράχου. Το υλικό βράχου μεταφέρθηκε στη σήραγγα δημιουργώντας ένα φράγμα έως 2 m κάτω από την στέψη και το σκυρόδεμα αντλήθηκε μέσω ατσάλινο σωλήνα για να γεμίσει το κενό πάνω από τα συντρίμια. Τα συντρίμια ανασύρθηκαν σταδιακά με τη σταδιακή εγκατάσταση βραχιόνων και εκτοξευόμενου οπλισμένου σκυροδέματος.

·Διδάγματα: Σημασία καλής κατανόησης των γεωλογικών συνθηκών, διογκωση του άργιλου σε συνθήκες υψηλής τάσης θα μπορούσε να έχει σαν αποτέλεσμα συσπάσεις και εξασθένηση της βραχώδους μάζας.

23) Σήραγγα λυμάτων Hull (Sewage Tunnel, Hull) (UK, 1999)

Κατασκευή υπόγειου υπονόμου μήκους 10,5 km.



Εικόνα 4.23: Κατασκευή του σήραγγα λυμάτων

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, είσοδος νερού και άμμου. Η σήραγγα υποχώρησε κατά 1,2 m προκαλώντας σοβαρή καθίζηση στην επιφάνεια.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Υδροφόρο έδαφος.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: EPB TBM (διάμετρος 3,85 m) που υποστηρίζεται από τμηματική επένδυση οπλισμένου σκυροδέματος.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Διακύμανση της στάθμης των υπόγειων υδάτων που προκαλείται από παλιρροϊκές επιδράσεις με αποτέλεσμα την κατακόρυφη κίνηση του σωλήνα της σήραγγας προκαλώντας άνοιγμα των αρμών.

·Συνέπεια: Ζημιές σε κτίρια, δρόμους και γραμμές κοινής ωφέλειας. Το TBM έπρεπε να εγκαταλειφθεί.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Ψύξη εδάφους, ανακατασκευή σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

·Διδάγματα: Ο σχεδιασμός των συνδέσεων του τμήματος θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις διακυμάνσεις της στάθμης των υπόγειων υδάτων.

24) Σήραγγα λυμάτων Πόρτσμουθ (Wastewater Tunnel Portsmouth) (UK, Μάιος 2000)

Σήραγγα λυμάτων μήκους 4 km και διαμέτρου 3,3 m κατασκευασμένη με προκατασκευασμένα τμήματα σήραγγας από σκυρόδεμα με τη μέθοδο TBM.



Εικόνα 4.24: Σήραγγα Πόρτσμουθ

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, βρέθηκαν ρωγμές στα τμήματα της σήραγγας μαζί με σχετική εισροή νερού.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Μικτό έδαφος που περιλαμβάνει κιμωλία, ασβεστώδη άμμο, χαλίκια και άκαμπτη άργιλο, κεφαλή νερού 21 m πάνω από το στέμμα της σήραγγας.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: EPB TBM

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Οι τοπικές κακές συνθήκες εδάφους δεν συνυπολογίζονται στο σχεδιασμό των τμημάτων της σήραγγας.

·Συνέπεια: Η κίνηση στη σήραγγα σταμάτησε.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Προσωρινή εφαρμογή πεπιεσμένου αέρα, ακολουθούμενη από κατάψυξη εδάφους. Αντικατάσταση κατεστραμμένων δακτυλίων και ενέματα.

·Διδάγματα: Κατανόηση των συνθηκών του εδάφους και συνυπολογισμός του στον σχεδιασμό της σήραγγας.

25) Αεροδρόμιο Ντάλλες (Dulles Airport) (USA, Νοέμβριος 2000)

Σήραγγα πεζών εμβαδού διατομής κατά προσέγγιση 100 m² με αβαθή εδαφοκάλυψη 4,5 m. Σχεδιάστηκε με την μέθοδο NATM με συστηματική διαρροή, ενισχυμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα και στήριξη δικτυωτών δοκών.



Εικόνα 4.25: Σχεδιασμός αεροδρομίου Ντάλλες

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής. Μία από τις κατευθύνσεις της σήραγγας υποχώρησε χωρίς η κατάρρευση να επεκταθεί στην επιφάνεια.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Μικτή όψη που αποτελείται από πηλό και λάσπη.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Μέθοδος NATM.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Άγνωστο

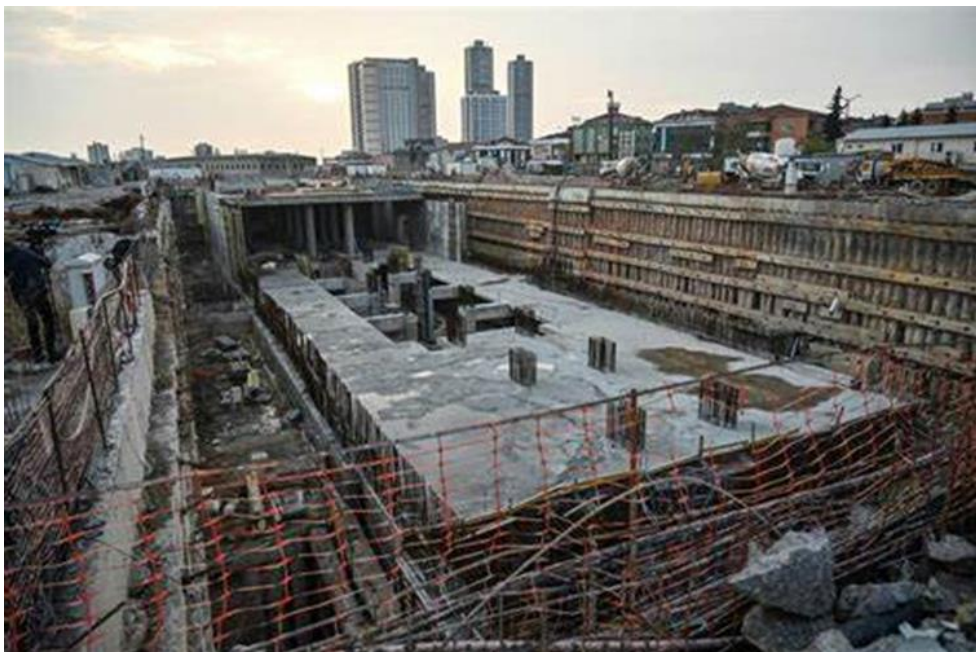
·Συνέπεια: Ένας ανθρακωρύχος σκοτώθηκε.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Μια περιοχή βάθους 40x40x10 m ανασκάφηκε από την επιφάνεια για να ανακτηθεί το σώμα ενός εγκλωβισμένου εργάτη.

·Διδάγματα: Ασφαλή εφαρμογή NATM σε ρηγά έργα σήραγγας.

26) Μετρό Κωνσταντινούπολης (Istanbul Metro) (Τουρκία, Σεπτέμβριος 2001)

Σήραγγα μετρό μήκους 7,9 km με τμήματα πλάτους 14 m των 100 m.



Εικόνα 4.26: Κατασκευή μετρό Κωνσταντινούπολης

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής. Ο μαλακός πηλός συνέχιζε να πέφτει και η σήραγγα κατέρρευσε δημιουργώντας κρατήρα πλάτους 25 m, 3 διώροφα κτίρια και το ένα κτίριο εργαστηρίου υποχώρησαν.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Μαλακό έδαφος με υπόγεια νερά κοντά στο επίπεδο του εδάφους.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Σήραγγα εξορύξεως πολλαπλών παρασυρόμενων, φορπόλη (ομπρέλα), επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και δικτυωτές δοκοί ως προσωρινή στήριξη.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Το υπάρχον φρεάτιο 1,5-2 m πάνω από την στέψη της σήραγγας δεν έχει γεμίσει σωστά με αποτέλεσμα η κορεσμένη άργιλος και το νερό του πηγαδιού να ρέουν στη σήραγγα. Επακόλουθη κατάρρευση των τοιχωμάτων του φρεατίου και αποστράγγιση του ανώτερου στρώματος λεπτόκοκκου άμμου στη σήραγγα.

·Συνέπεια: 5 άτομα πέθαναν.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Αδημοσίευτο

·Διδάγματα: Σημασία μελέτης της ιστορίας κατασκευής κτιρίων που είναι υπό-σήραγγα.

27) Σιδηροδρομικός σύνδεσμος σήραγγας Channel (Channel Tunnel Rail Link) (UK, Φεβρουάριος 2003)



Εικόνα 4.27: Σιδηροδρομικός σύνδεσμος σήραγγας

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, διάμετρος 10 m και βάθος 20 m σχηματίστηκε στο έδαφος πίσω από μια σειρά από σπίτια.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Άμμος

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Σήραγγα με χρήση TBM με διάμετρος 8,2 m.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Η δόνηση από το TBM μπορεί να προκάλεσε την κατάρρευση των κοντινών πηγαδιών βάθους 30 m και διαμέτρου 1,8 m.

·Συνέπεια: Τρία αχαρτογράφητα πηγάδια κατέρρευσαν.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Τα κενά γέμισαν με ενέματα.

·Διδάγματα: Αδημοσίευτο

28) Μετρό σήραγγα Μετέωρο (Météor Metro Tunnel) (Γαλλία, 14 Φεβρουαρίου 2003)

Κατασκευή της επέκτασης της σήραγγας του μετρό Μétéor, συμπεριλαμβανομένου του σταθμού «Olympics» και μιας αίθουσας συντήρησης.



Εικόνα 4.28: Κατασκευαστική αστοχία μετρό σήραγγας Μετέωρο

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής.
Περίπου 3.000 m^3 ιζηματογενών κοιτασμάτων κατέρρευσαν κάτω από ένα σχολείο καταλαμβάνοντας έκταση 400 m^2 .

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Παχύς ασβεστόλιθος.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης : Υποστηρίζεται από μπουλόνια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Ο παχύς ασβεστόλιθος είχε κατώτερα μηχανικά χαρακτηριστικά από το ομοιογενές μέσο που υποτίθεται στο σχεδιασμό. Δυσμενής προσανατολισμός του ρήγματος, εφαρμογή ανεπαρκούς υποστήριξης λόγω της υπερβολικής εξάρτησης στους υπολογισμούς.

·Συνέπεια: Δεν υπήρχαν θύματα, το σχολείο έκλεισε για ένα χρόνο επηρεάζοντας 900 μαθητές.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Πλήρωση της αίθουσας κάτω από το κτίριο με σκυρόδεμα.

·Διδάγματα: Δημοσίευτο

29) Υποθαλάσσια σήραγγα Όσλοφιορντ (Oslofjord Subsea Tunnel) (Νορβηγία, 28 Δεκεμβρίου 2003)

Η οδική σήραγγα είχε μήκος 7,3 km και πλάτος 11,5 m (3 λωρίδες). Συνέβησαν τρεις μεγάλες αστοχίες και πολλές μικρές αστοχίες.



Εικόνα 4.29: Σήραγγα Όσλοφιορντ

·Είδος αστοχίας:

1^η αστοχία: Σημειώθηκε στις 28 Δεκεμβρίου 2003. Περίπου 20 m³ θρυμματισμένου βράχου με άργιλο, ο οποίος κατέβηκε στο οδόστρωμα.

2^η αστοχία: Περιλαμβάνει περίπου 3 m βαριά φθαρμένο βράχο, η οποία κατέβηκε από την γραμμή του ελατηρίου και έπεσε ανάποδα.

3^η αστοχία: Περιλάμβανε 2-3 εντελώς θρυμματισμένου βράχου, ο οποίος έπεσε κάτω από την στέγη και στηρίχτηκε στην κορυφή του θόλου προστασίας από το νερό.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Φλέβες από πηγματίτη και μερικά αναχώματα από διαβάση και ρόμβο πορφυρίτη. Βρέθηκε διογκωμένη άργιλος στις ζώνες αδυναμίας.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης : Υποστηρίζεται κυρίως από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ενισχυμένο με ίνες χάλυβα σε συνδυασμό με μπουλόνια βράχου.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Η προστασία από τον παγετό ήταν υψηλή και η υψηλή περιεκτικότητα σε διογκωμένη άργιλο στον βράχο άρχισε να ρουφάει νερό και να επεκτείνεται σταδιακά για μεγάλο χρονικό διάστημα.

·Συνέπεια: Κλείσιμο της σήραγγας για περισσότερο από 3 μήνες για εκτεταμένες επισκευές και αναβάθμιση της υποστήριξης της σήραγγας.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Πλήρης αφαίρεση του θόλου πριν από την εγκατάσταση πρόσθετου υποστηρίγματος βράχου συμπεριλαμβανομένων οπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος, μπουλονιών βράχου και ενισχυμένων νευρώσεων από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

·Διδάγματα : Σωστής γεωλογική χαρτογράφηση και μαζική ταξινόμηση βραχομάζας.

30) Μετρό Σανγκάη (Shanghai Metro) (Κίνα 2003)

Επέκταση της γραμμής 4 του μετρό της Σανγκάης που διέρχεται κάτω από τον ποταμό Χουάνγκου (Huangpu). Δύο παράλληλες σήραγγες κατασκευασμένοι από TBM.



Εικόνα 4.30: Κατασκευαστική αστοχία μετρό Σανγκάη – Κίνα 2003

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής. Παρουσιάστηκε αστοχία κατά την κατασκευή μιας διασταύρωσης, μαζική εισροή νερού και υλικού σε βάθος 35 m, αρκετά μέτρα καθίζηση εδάφους.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Υδροφόρο έδαφος.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης : EPB TBM

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Αστοχία της μονάδας ψύξης εδάφους.

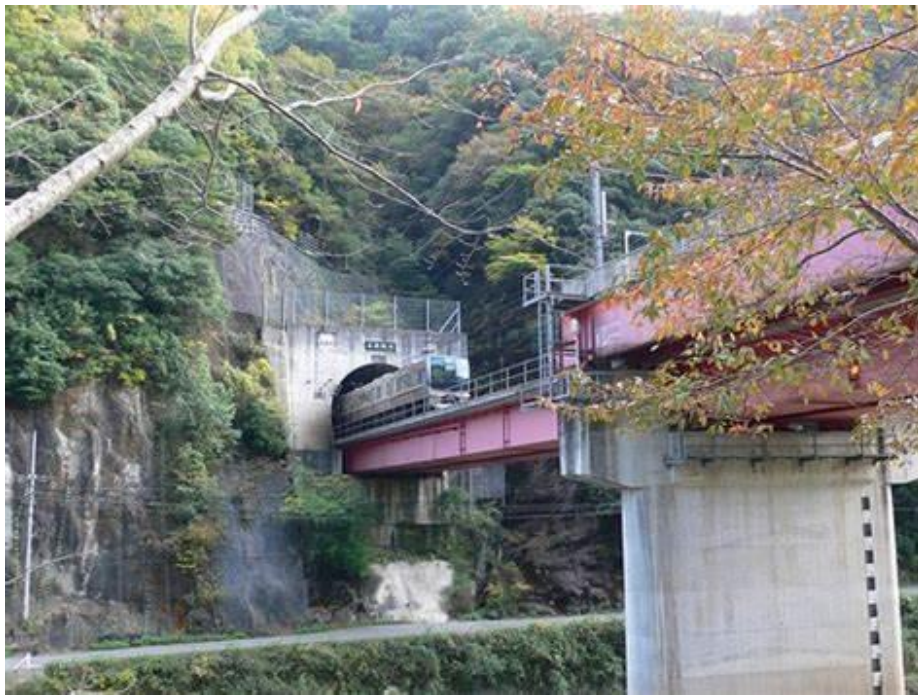
·Συνέπεια: Πολυώροφα κτίρια γραφείων υπέστησαν σοβαρές ζημιές. Το αντιπλημμυρικό ανάχωμα στον ποταμό υπέστη σοβαρές ζημιές.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Δημοσίευτο

·Διδάγματα: Δημοσίευτο

31) Σήραγγα «Ημέρα πηλό βουνό» (Nikkure-yama Tunnel) (Ιαπωνία 2003)

Ανατολικό τμήμα εργασίας της σήραγγας.



Εικόνα 4.31: Σήραγγα «Ημέρα πηλό βουνό»

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής. Κατάρρευση εδάφους τύπου χιονοστιβάδας που περιείχε λιθόστρωτα, χαλίκια και νερό σημειώθηκε στο σημείο 900 m μακριά από την πύλη της σήραγγας. Ένας

μεγάλος κρατήρας παρατηρήθηκε στην επιφάνεια του εδάφους περίπου 130 m πάνω από την σήραγγα.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Λασπόπετρα

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης : Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και νευρώσεις.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Ύπαρξη υψηλής πίεσης υπόγειων υδάτων, μείωση κάλυψης του στρώματος λασπόπετρας.

·Συνέπεια: Το πρόγραμμα καθυστέρησε για περίπου 2 χρόνια.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Γέμισμα της περιοχής του σπηλαίου με αφρώδες σκυρόδεμα, συναρμολόγηση κάτω από την περιοχή κατάρρευσης, διάτρηση για αποστράγγιση από τη σήραγγα.

·Διδάγματα : Η σημασία των ερευνών κατά την κατασκευή και υιοθέτηση κατάλληλων μέτρων υποστήριξης.

32) Μετρό Γκουανγκοτσόου - Γραμμή 3 (Guangzhou Metro Line 3) (Κίνα, 1 Απριλίου 2004)

Κατασκευή υπόγειου έργου μήκους 58,5 km στο οποίο τα 45,6 km αποτελείται από κατασκευή με την μέθοδο κλειστής διάνοιξης TBM. Η κατάρρευση σημειώθηκε περίπου στις 8:10 π.μ. στο εργοτάξιο του σταθμού Λιτζιάο (Lijiao) της γραμμής 3 του μετρό της Γκουανγκοτσόου στην περιοχή Χάιτζου (Haizhu) της πόλης. Ένα ψηλό σιδερένιο πλαίσιο κατέρρευσε αμέσως μετά την υποχώρηση της γης στο εργοτάξιο και πολλά μηχανήματα καταστράφηκαν ή υπέστησαν ζημιές. Δεν αναφέρθηκαν θάνατοι ή τραυματισμοί και οι οικογένειες που ζούσαν σε απόσταση 30 m από το εργοτάξιο εκκενώθηκαν αμέσως.



Εικόνα 4.32: Κατάρρευση Μετρό Γκουανγκοτσόου (Γραμμή 3) – Κίνα 2004

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, αστοχία διαφραγματικού τοίχου.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Αδημοσίευτο

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Θωράκιση μονού σωλήνα TBM.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Κατάρρευση διαφραγματικού τοίχου. Γρήγορη διακύμανση της στάθμης των υπόγειων υδάτων λόγω των έντονων βροχοπτώσεων, πολύπλοκη γεωλογία που περιλαμβάνει ένα στρώμα διογκωμένου εδάφους.

·Συνέπεια: Κατάρρευση τριώροφου κτηρίου βυθισμένο στο έδαφος, κατάρρευση υπόγειου δικτύου ύδρευσης.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Επίχωση με θρυμματισμένο βράχο και τσιμέντο.

·Διάγματα: Αδημοσίευτο

33) Μετρό Καοσιούγκ (Kaohsiung Rapid Transit) (Ταϊβάν, 29 Μαΐου 2004)

Σήραγγα διαμέτρου 350 mm. Τα πάνελ τοίχου με διάφραγμα διατρήθηκαν με αλυσοπρίονο σύμφωνα με το σχήμα της όψης της θωράκισης. Χρησιμοποιήθηκε μέθοδος κλειστής διάνοιξης TBM και συγκεκριμένα μηχανήμα διάτρησης σήραγγας EPB 500 mm μακριά από την πρόσοψη του τοίχου σε αναμονή εκρήξεως, ξεκινώντας η ανάστροφη διαρροή.



Εικόνα 4.33α: Πάνελ τοίχου – Ταϊβάν 2004

· Είδος αστοχίας: Αποτυχία κατασκευής, βύθισμα διαμέτρου περίπου 10 m που σχηματίστηκε στην επιφάνεια του εδάφους, ζώνη εδάφους που κυμαίνεται σε διάμετρο από 40 m έως 50 m με μέγιστη καθίζηση από 500 mm έως 1.500 mm. Αρκετοί δακτύλιοι τμηματικών επενδύσεων σήραγγας υπέστησαν ζημιές.

· Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Στρώματα εδάφους λάσπης άμμου και αμμώδους λάσπης, εναπόθεση λάσπης που καλύπτεται από αδιαπέραστα στρώματα αργίλου.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Μέθοδος κλειστής διάνοιξης TBM – μηχανήμα διάτρησης EPB.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Προοδευτική ανάπτυξη απροσδόκητων ρωγμών εντός της ζώνης εδαφοβελτιώσεως με αποτέλεσμα διαρροών υπόγειων υδάτων.

Παρουσιάστηκαν μηχανικές διαταραχές ή κραδασμοί κατά τη διαδικασία θραύσης που οδήγησαν σε σοβαρές ρωγμές, δυσμενείς επιφανειακές συνθήκες που αποτελούνταν από λασπώδεις άμμους με περιεκτικότητα σε νερό.

·Συνέπεια: Παρακείμενα κτίρια υπέστησαν ζημιές.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Σταθεροποίηση του εδάφους συσσωρεύοντας σάκους άμμου μπροστά από την επιφάνεια της σήραγγας για μείωση της διαρροής. Γέμισμα του βυθίσματος και ανάστροφο της σήραγγας, εγκατάσταση χαλύβδινων πλαισίων για την ενίσχυση των κατεστραμμένων τμημάτων δακτυλίου.

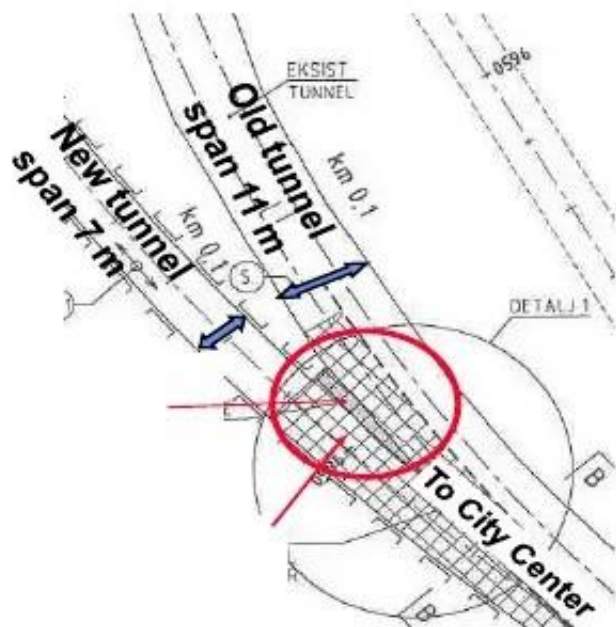
·Διδάγματα: Δημοσίευτο



Εικόνα 4.33β: Κατάρρευση Μετρό Καοσιούγκ – Ταιβάν 2004

34) Μετρό Όσλο (Metro Oslo Tunnel) (Νορβηγία, 17 Ιουνίου 2004)

Σήραγγα γραμμής μετρό μήκους 1,3 km και πλάτους 7 m που συνδέει με μια παλιά σήραγγα.



Εικόνα 4.34: Μετρό Όσλο – Νορβηγία 2004

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, στη διασταύρωση όπου οι δύο σήραγγες συναντήθηκαν σε οξεία γωνία. Σήραγγα-σπήλαιο μετά την απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους του βράχου μεταξύ των σηράγγων.

· Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Αδημοσίευτο

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Κατασκευασμένο με μέθοδο διάτρησης και ανατίναξης που υποστηρίζεται από μπουλόνια βράχου και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Σχεδιάστηκε να κατασκευαστεί ένας τσιμεντένιος τοίχος μεταξύ της παλιάς σήραγγας και της νέας σήραγγας.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Μη ευνοϊκή κατεύθυνση των επιπέδων στρώσης σε σχέση με τη γεωμετρία και το άνοιγμα των σηράγγων.

·Συνέπεια: Καθυστέρησε το πρόγραμμα για 3 μήνες, συνέπειες του κόστους - επιπλέον κόστος των εργασιών αποκατάστασης.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Γέμισμα ολόκληρου του ανοίγματος με σκυρόδεμα πάνω από τα πεσμένα συντρίμια. Τοποθέτηση αγκυρών καλωδίων μήκους 10 m μαζί με μόνιμη στήριξη επένδυσης οπλισμένου σκυροδέματος πάχους 200 mm, ενισχυμένες νευρώσεις από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και πρόσθετους βραχίονες μήκους 6 m.

·Διδάγματα: Σημασία επαρκούς έρευνας εδάφους.

35) Ταχεία διέλευση Καοσιούγκ (Kaohsiung Rapid Transit) (Ταϊβάν, 10 Αυγούστου 2004)

Η κατάρρευση της σήραγγας του μετρό Καοσιούγκ (Kaohsiung) κάτω από την οδό Λινχάι (Linhai) προκάλεσε κατάρρευση του δημόσιου δρόμου και το ισόγειο δίπλα στο ποτάμι να βυθιστεί στο έδαφος. Μια σπηλιά στην θέση υπο κατασκευή σήραγγας προκάλεσε κλίση σε τμήμα της οδού Λινχάι (Linhai). Δεν υπήρξαν θύματα.



Εικόνα 4.35: Κατάρρευση σήραγγας μετρό Καοσιούγκ – Αύγουστος 2004

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής. Πρώτη κατάρρευση στις 29 Μαΐου 2004 κάτω από έναν δρόμο. Δεύτερη κατάρρευση

στα μέσα Ιουνίου 2004. Τρίτη κατάρρευση στις 13 Ιουλίου 2004 με σχηματισμό βύθισης. Τέταρτη κατάρρευση στις 10 Αυγούστου 2004.

· Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Αδημοσίευτο

· Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Αδημοσίευτο

· Πιθανή αιτία αστοχίας: Πιθανές δυσμενείς συνθήκες εδάφους και υπόγειων υδάτων.

· Συνέπεια: Πρώτη κατάρρευση - πολλά κτίρια επηρεάστηκαν και 100 άτομα εκκενώθηκαν από την περιοχή, τρίτη κατάρρευση - εκκενώθηκαν τρία κτίρια κατοικιών και διακοπή στην παροχή νερού και ηλεκτρικού ρεύματος, τέταρτη κατάρρευση – Δεν υπήρξαν θύματα, ένα μέρος του κτιρίου επηρεάστηκε και οι εργασίες έχουν ανασταλεί.

· Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Αδημοσίευτο

· Διδάγματα: Αδημοσίευτο

36) Σήραγγα Χιούσαν (Hsuehshan Tunnel) (Ταϊβάν, 1991-2004)

Κατασκευή σήραγγας Χιούσαν (Hsuehshan) μήκους 12,9 km και διαμέτρου 11,7 m. Οι εργασίες ξεκίνησαν το 1991 και ολοκληρώθηκαν το 2004. Αποτελείται από 2 κύριες σήραγγες (Ανατολικά και Δυτικά). Κατά την εκσκαφή μιας σήραγγας, οι μηχανικοί αντιμετώπισαν δύσκολα γεωλογικά προβλήματα, όπως τα ρήγματα βράχου και μεγάλες εισροές νερού που προκάλεσαν σοβαρές καθυστερήσεις. Μεγάλο κομμάτι της σήραγγας κατασκευάστηκε με την μέθοδο TBM. Προς τα δυτικά θάφτηκε από κατάρρευση εδάφους και προκειμένου να επιταχυνθεί η διάνοιξη της σήραγγας. Κατά μήκος της ευθυγράμμισης της σήραγγας, υπάρχουν 6 μεγάλα ρήγματα, 98 ζώνες θραύσης και 36 πηγές υπόγειων υδάτων υψηλής πίεσης. Παρόλα αυτά, σοβαρές καταρρεύσεις σήραγγας με πλημμύρες υπόγειων υδάτων πραγματοποιήθηκαν περιοδικά κατά τη διάρκεια της κατασκευής της σήραγγας.



Εικόνα 4.36: Σήραγγα Χιούσαν

- Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, ανατολικά σημειώθηκαν 28 καταρρεύσεις, η μέθοδος TBM υπέστη σοβαρές ζημιές λόγω κατάρρευσης σήραγγας και εισροή υπόγειων υδάτων 45.000 lt/sec στη σήραγγα, στην πιλοτική σήραγγα έγιναν 8 καταρρεύσεις.
- Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Τα κυριότερα γεωλογικά στοιχεία είναι το Ηώκαινο, το Ολιγόκαινο και οι διπλωμένοι ιζηματογενείς σχηματισμοί πετρωμάτων, ισχυρά ρηγματωμένος βράχος με έξι μεγάλα ρήγματα.
- Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Ανατολικά με μέθοδος TBM (Ιούλιος 1993 έως Σεπτέμβριος 2004), δυτικά με μέθοδος TBM (Ιούλιος 1993 έως Απρίλιος 2004).
- Πιθανή αιτία αστοχίας: Απροσδόκητη γεωλογία με ρηγματωμένα πετρώματα και μαζικές εισροές νερού. 6 μεγάλα ρήγματα που βρέθηκαν κατά μήκος της ευθυγράμμισης της σήραγγας.
- Συνέπεια: Ανατολικά η αποτυχία έγινε τον Μάιο του 1993 όπου έπληξε 56 κτίρια και 73 οικογένειες, δυτικά 11 άντρες πέθαναν.
- Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Αδημοσίευτο
- Διδάγματα: Αδημοσίευτο

37) Μετρό Βαρκελώνης (Barcelona Metro) (Ισπανία, 27 Ιανουαρίου 2005)

Σήραγγα για την επέκταση της γραμμής 5 του μετρό της Βαρκελώνης. Το μετρό κατασκευάστηκε με μέθοδο κλειστής διάνοιξης και συγκεκριμένα με την μέθοδο NATM.



Εικόνα 4.37: Μετρό Βαρκελώνης – Ιανουάριος 2005

· Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, μέρος της επένδυσης κατέρρευσε. Σχηματίστηκε κρατήρας πλάτους 30 m και βάθους 32 m.

· Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Σχιστόλιθος, κρυφό ρήγμα στη θέση κατάρρευσης.

· Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Διάνοιξη σήραγγας με την μέθοδο NATM.

· Πιθανή αιτία αστοχίας: Ένα «κρυμμένο» κατακόρυφο ρήγμα που βρίσκεται 1 m πίσω από την επένδυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

· Συνέπεια: 2 πεντάροφα κτίρια και ένα μικρότερο κατεδαφίστηκαν, περισσότερες από 50 οικογένειες έμειναν άστεγες.

· Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Το κενό καλύφθηκε με ρευστοκονίαμα 2.000 m³ περίπου. Το τμήμα της σήραγγας επιχωματώθηκε με 18.000 m³ ρευστοκονιάματος μια οριζόντια γεώτρηση στα συντρίμια, πρόσθετες γεωτρήσεις, οριζόντιοι ανιχνευτές και στηρίγματα για μελλοντική εκσκαφή.

· Διδάγματα: Αδημοσίευτο

38) Μετρό Λωζάνης M2 (Lausanne M2 Metro) (Ελβετία, 22 Φεβρουαρίου 2005)

Σήραγγα μήκους 6 km περίπου 10 m πλάτος x 7 m ύψος για το έργο Μετρού Λωζάνης (Lausanne Metro M2 Project) με κόστος 472 εκατομμυρίων δολαρίων στην Ελβετία.



Εικόνα 4.38: Κατάρρευση μετρό Λωζάνης– Φεβρουάριος 2005

· Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, 50 m³ υλικού μετατοπίστηκε στη σήραγγα σε βάθος 12 m που οδηγεί σε κρατήρα στην επιφάνεια.

· Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Κατάρρευση σε περιοχή μαλακού εδάφους.

· Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Διάνοιξη σήραγγας με χρήση κεφαλής οδικής κεφαλής Eickhoff ET 380-L.

· Πιθανή αιτία αστοχίας: Σήραγγα που διέρχεται απο παγετώνα προκαλώντας ξαφνική εισροή υπόγειων υδάτων.

· Συνέπεια: Άτομα σε δύο κτίρια, ένα σούπερ μάρκετ και ένα κατάστημα τροφίμων στην εμπορική περιοχή απομακρύνθηκαν όταν κατέρρευσαν τα κελάρια τους. Δεν αναφέρθηκαν τραυματισμοί.

·Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Μια «κουρτίνα» από 11 πασσάλους που κατασκευάστηκε μπροστά από την όψη που έχει καταρρεύσει για την ενίσχυση του εδάφους και τον περιορισμό της περαιτέρω ροής υλικού στη σήραγγα. Το κενό αναπληρώθηκε με 800 m³ από γυαλί-άμμο (ανακυκλωμένο γυαλί).

·Διάγματα: Αδημοσίευτο

39) Σήραγγα Lane Cove Tunnel (Αυστραλία, 2 Νοεμβρίου 2005)

Η σήραγγα Lane Cove είναι μια οδός δίδυμης σήραγγας με 7 m ύψους και 8,1 m πλάτος και 3,6 km μήκος που κατασκευάστηκε στο Σίδνεϋ της Αυστραλίας.



Εικόνα 4.39: Ζημίες που προκλήθηκαν από την κατάρρευση σήραγγας – Νοέμβριος 2005

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, κατάρρευση σημειώθηκε κατά τη διάρκεια της διάνοιξης μιας σήραγγας εξαερισμού. Ένας κρατήρας 10 επί 10 m βάθους 25 m σχηματίστηκε στο έδαφος μεταξύ ενός τριώροφου κτιρίου κατοικιών και μιας ράμπας εξόδου αυτοκινητόδρομου.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Ο ψαμμίτης βρίσκεται κάτω από τον σχιστόλιθο.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Διάνοιξη σήραγγας με τη νέα αυστριακή μέθοδο (NATM).

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Ολίσθηση βράχου, κάτω από τα μπουλόνια βράχου λόγω της αυξημένης πίεσης δημιουργήθηκε διέλευση.

·Συνέπεια: Ένα τριώροφο κτίριο κατέρρευσε και εκκένωση 47 κατοίκων από την περιοχή. Κατάρρευση δικτύου ύδρευσης, κλειστός δρόμος προς την πόλη.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Το κενό αναπληρώθηκε με 1.400 m³ από σκυρόδεμα, συνεχής παρακολούθηση.

·Διδάγματα: Αδημοσίευτο

40) Ταχεία διέλευση Καοσιούγκ (Kaohsiung Rapid Transit) (Ταιβάν, 4 Δεκεμβρίου 2005)

Κατασκευή της Orange Line στη διασταύρωση της οδού Χάνχεν (Chungcheng) και της οδού Τάσαν (Tashun) στην πόλη Καοσιούγκ (Kaohsiung). Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι κλειστής διάνοιξης και συγκεκριμένα με την μέθοδο TBM.



Εικόνα 4.40: Ζημίες που προκλήθηκαν από την κατάρρευση σήραγγας – Δεκέμβριος 2005

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής.
Παρουσιάστηκε αστοχία κατά την εκσκαφή ενός υπόγειου φρεατίου σε μια διασταύρωση (33 m κάτω από το έδαφος) κάτω από μια υπάρχουσα δεξαμενή. Μια τάφρος 30 επί 20 m και βάθους 4 m σχηματίστηκε αρχικά στις 4 Δεκεμβρίου 2005 και κατέρρευσε για να σχηματιστεί ένας κρατήρας 50 m επί 30 m και βάθους 10 m στην επιφάνεια του δρόμου. Είναι η 10^η αποτυχία του έργου ταχείας διέλευσης, ένας άλλος κρατήρας διαμέτρου 10 m, βάθος 7 m σχηματίστηκε σε άλλη τοποθεσία στις 10 Δεκεμβρίου 2005.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: 33 μέτρα κάτω από το έδαφος.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Μέθοδος TBM.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Μεγάλη διαρροή νερού από δεξαμενή.

·Συνέπεια: Ο δρόμος στην οδό Χάνγκεν (Chungcheng) έκλεισε για μια εβδομάδα. Η κοντινή σιδηροδρομική γραμμή Λίνγκαν (Linkang) έκλεισε προσωρινά. Ένα τμήμα σηράγγων και υπηρεσιών κοινής ωφελείας μήκους 100 m υπέστη ζημιές, βρέθηκαν ρωγμές σε 20 κοντινά κτίρια κατοικιών.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Ο κρατήρας επιχωματώθηκε περίπου 2.800 m³ χώματος και σκυροδέματος 20 ώρες μετά από το ατύχημα. Τα κατεστραμμένα τμήματα των σηράγγων χρειάστηκαν να ανακατασκευαστούν. Το κόστος των μέτρων αποκατάστασης εκτιμάται ότι θα ανέλθει σε 15 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ εξαιρουμένης της ανακατασκευής των κατεστραμμένων τμημάτων των σηράγγων.

·Διδάγματα: Αδημοσίευτο

41) Μονάδα επεξεργασίας νερού σήραγγας Νέντρε Ρομερέικ ακατέργαστου και πόσιμου νερού (Nedre Romerike Water Treatment Plant, CrudeWater and Potable Water Tunnels) (Νορβηγία, 2005)

Η σήραγγα πόσιμου νερού έχει μήκος 1,5 km και πλάτος 3 m. Η σήραγγα ακατέργαστου νερού είχε μήκος 3,7 km και πλάτος 3 m. Τα έργα της σήραγγας ολοκληρώθηκαν το 1980.



Εικόνα 4.41: Σήραγγα Νέντρε Ρομερέικ 2005

·Είδος αστοχίας: Η αστοχία ήταν προοδευτική για περισσότερα από 25 χρόνια με αποτέλεσμα να μπλοκάρει τη σήραγγα ακατέργαστου νερού. Μια μεγάλη αστοχία σημειώθηκε στη σήραγγα ακατέργαστου νερού τον χειμώνα του 2005 και ο φθαρμένος βράχος απέτυχε, δύο μεγάλες αστοχίες σημειώθηκαν το 2007 και περίπου 200 m³ και 30-40 m³ κάθε φορά που έπεφταν βράχοι.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Σε ορισμένες περιοχές η κάλυψη είναι πολύ διαβρωμένη και εν μέρει μετατρέπεται σε άργιλο. Κάποιοι από τους αργίλους είναι διογκωμένοι.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Σημειακά αγκύρια και στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 1-3 cm σε μικρά τμήματα των σήραγγων.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Έλλειψη χαρτογράφησης των ζωνών αδυναμίας που περιέχουν διογκωμένη άργιλο με αποτέλεσμα ανεπαρκή στήριξη βράχου. Η υγρασία στη σήραγγα του νερού πιθανώς να προκαλεί σταδιακή επέκταση του διογκούμενου πηλού που είχε ως αποτέλεσμα την αποκόλληση του βράχου.

·Συνέπεια: Περίπου 150.000 άνθρωποι επλήγησαν από διακοπή στην παροχή νερού.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Λόγω της περιορισμένης πρόσβασης στη σήραγγα ακατέργαστου νερού. Μόνο χειροκίνητη αντικατάσταση των συντριμμιών στις κατάντη περιοχές των σπηλαίων θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί από δύτες όταν η στάθμη του νερού είχε μειωθεί.

·Διδάγματα: Σωστή ταξινόμηση της βραχομάζας, λεπτομερή χαρτογράφηση των ζωνών αδυναμίας - ξεπερασμένων πετρωμάτων και εφαρμογή επαρκούς υποστήριξης πετρωμάτων.

42) Διακρατική σήραγγα σύνδεσης 90 (Interstate 90 Connector Tunnel) (Βοστώνη Μασαχουσέτης, Ιούλιος 2006)

Η διακρατική σήραγγα σύνδεσης 90 (I-90 Connector), γνωστή ως πύλη D Street, άνοιξε στην κυκλοφορία τον Δεκέμβριο του 2000. Κατασκευάστηκε για να βελτιώσει τη ροή της κυκλοφορίας στη Βοστώνη.



Εικόνα 4.42: Κατάρρευση οροφής σήραγγας σύνδεση 90 – Ιούλιος 2006

·Είδος αστοχίας: Αστοχία αγκύρωσης οροφής.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Αδημοσίευτο

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Ψευδοροφή στερεωμένα στην σήραγγα με αγκύρια από ανοξείδωτο χάλυβα που συγκρατούνται στη θέση τους με εποξειδική κόλλα.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Κακή αντίσταση ερπυσμού της εποξειδικής κόλλας που χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση των αγκυρίων.

·Συνέπεια: Ένα τμήμα της σήραγγας με ψευδοροφή από σκυρόδεμα αποκολλήθηκε. Συνολικά περίπου 26 tn σκυροδέματος και συναφούς υλικού συνέτριψαν ένα όχημα. Ο οδηγός τραυματίστηκε ελαφρά και ένας επιβάτης σκοτώθηκε.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Εγκατάσταση προσωρινής στήριξης για ένα τμήμα της οροφής της σήραγγας όπου τα συγκολλητικά αγκύρια παρουσίασαν μετατόπιση. Αντικατάσταση μετατοπισμένων συγκολλητικών αγκυρίων.

·Διδάγματα: Η απόδοση ερπυσμού είναι ζωτικής σημασίας για το σύστημα συγκολλητικής αγκύρωσης.

43) Οδική σήραγγα Χάνεκλειβ (Hanekleiv Road Tunnel) (Νορβηγία, 25 Δεκεμβρίου 2006)

Η σήραγγα Χάνεκλειβ (Hanekleiv Tunnel) είχε μήκος περίπου 1,77 km και πλάτος 9,6 m έναν για κάθε κατεύθυνση διαδρομής, ο καθένας από δύο λωρίδες αυτοκινητόδρομου. Η σήραγγα άνοιξε για την κυκλοφορία τον Οκτώβριο του 2001. Το σπήλαιο μέσα απελευθερώθηκε μεταξύ δύο παράλληλων γεμισμένων αρμών. Στις 25 Δεκεμβρίου 2006 ένα μέρος της οροφής της σήραγγας κατέρρευσε. Αποτέλεσμα ήταν να κλείσει για κάποιο χρονικό διάστημα και άνοιξε ξανά στις 30 Αυγούστου 2007. Ο βράχος που κατασκευάζονταν η σήραγγα ήταν ασταθής. Για να ευστάθεια του βράχου, η οροφή και οι τοίχοι της σήραγγας ενισχύθηκαν με μπουλόνια και με έγχυτο σκυρόδεμα. Την ημέρα των Χριστουγέννων έγινε η κατολίσθηση βράχων. Δεν υπήρχαν αυτοκίνητα στη σήραγγα εκείνη τη στιγμή και δεν υπήρξαν τραυματισμοί. Τα συντρίμια συνέχισαν να πέφτουν στη σήραγγα για έως και τρεις ώρες μετά την αρχική κατάρρευση. Τα συντρίμια κάλυψαν ένα τμήμα δρόμου μήκους 25 m.



Εικόνα 4.43: Κατάρρευση σήραγγας Χάνεκλειβ – Δεκέμβριος 2006

- Είδος αστοχίας: Ένα τμήμα της σήραγγας υποχώρησε σε 10 -11 χρόνια μετά την ανασκαφή.
- Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Μέτριες αρθρώσεις γεμάτες με διογκωμένη άργιλο.
- Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Υποστηρίζεται με συνδυασμό μπουλονιών βράχου και οπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα.
- Πιθανή αιτία αστοχίας: Δυσμενής γεωμετρία με αρμούς, τα μπουλόνια βράχου τοποθετούνται κυρίως παράλληλα με τους αρμούς βράχου με περιορισμένη σταθερότητα.
- Συνέπεια: Περίπου 200 m³ συντρίμμια έπεσαν από την οροφή και η σήραγγα έκλεισε για 6,5 μήνες.
- Μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης: Χυτή επένδυση από σκυρόδεμα και τοποθέτηση περίπου 4.000 μπουλονιών βράχου.
- Διδάγματα: Έλλειψη ειδικευμένου γεωλόγου μηχανικού στο χώρο για τη διεξαγωγή χαρτογράφησης και σχεδιασμού κατά την κατασκευή της σήραγγας.

44) Διαχείριση όμβριων υδάτων και οδική σήραγγα (Stormwater Management and Road Tunnel) (Μαλαισία, 2003 - 2006)

Σήραγγα μήκους 9,7 km και διαμέτρου 13,26 m που διαχειρίζεται την παράκαμψη όμβριων υδάτων.



Εικόνα 4.44: Σήραγγα SMART – Δεκέμβριος 2006

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, 37 περιστατικά σε απόσταση 8 km από την εκσκαφή σήραγγας.

· Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Σχηματισμός καρστ.

- Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Ασπίδα υδαρούς πολτού TBM, **Περιστροφικός κόφτης κεφαλής**, με μύτες βολφραμίου που χρησιμοποιούνται για την εκσκαφή εδάφους και δίσκοι κοπής που χρησιμοποιούνται για την εκσκαφή βράχου.
- **Διάφραγμα**, όπου σχηματίζεται θωράκιση πεπιεσμένου πολτού μπεντονίτη για να παρέχει σταθερότητα κατά την εκσκαφή της σήραγγας.
- **Υδραυλικοί γρύλλοι**, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για να οδηγήσουν το μηχάνημα προς τα εμπρός με σκοπό να διατηρηθεί η σήραγγα στη σωστή θέση.
- **Tunnel Lining Erector**, που χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση προκατασκευασμένης επένδυσης τοίχου από σκυρόδεμα.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες.

·Συνέπεια: Αδημοσίευτο

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Δημοσίευτο

·Διάγματα: Δημοσίευτο

45) Σταθμός Μετρό Σάο Πάολο (São Paulo Metro Station) (Βραζιλία, 12 Ιανουαρίου 2007)

Η μέθοδος διάνοιξης σήραγγας NATM χρησιμοποιήθηκε για την εκσκαφή μιας σήραγγας σταθμού μήκους 40 m. Η αστοχία της σήραγγας σημειώθηκε κοντά σε διασταύρωση 40 m διαμέτρου, βάρους 35 m από το φρεάτιο πρόσβασης.



Εικόνα 4.45: Κατάρρευση σήραγγας Σάο Πάολο – Ιανουάριος 2007

·Είδος αστοχία: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, κατάρρευση σήραγγας και μερική ζημιά στον άξονα πρόσβασης. Ο ρυθμός καθίζησης της σήραγγας αυξήθηκε γρήγορα και έφτασε τα 15 mm έως 20 mm δύο έως τρεις ημέρες πριν από την αστοχία.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Υποτίθεται ότι η κάλυψη βράχου μήκους 3 m επικαλύπτεται από 18 m από εδάφος και άμμο.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Μέθοδος NATM με κύρια στήριξη δοκών 0,85 m και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ενισχυμένο με ίνες χάλυβα πάχους 350 mm.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Απέτυχε να ληφθεί υπόψη η γεωλογία της τοποθεσίας. Μια άγνωστη κορυφογραμμή βράχου με κυρτή κορυφή 10 m υψηλότερη από ό,τι είχε προβλέψει στο προφίλ των καιρικών συνθηκών και μπορεί να προκάλεσε την κατάρρευση της σήραγγας μεγάλου ανοίγματος που ανασκάφηκε.

·Συνέπεια: Πολλά οχήματα έπεσαν στην τρύπα βάθους 30 m, 7 άτομα σκοτώθηκαν.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Η εκσκαφή πραγματοποιήθηκε μετά από προαρμολόγηση με τη στήριξη συστηματικών αγκυρίων στερέωσης που εκτείνονται 32 m στο έδαφος για την σταθεροποίηση της επιφάνειας.

·Διδάγματα: Θα πρέπει να αποφεύγονται οι σήραγγες με λεπτή κάλυψη βράχου λόγω του απρόβλεπτου βαθμού διάβρωσης των βράχων. Εάν αυτό δεν μπορεί να αποφευχθεί, θα πρέπει να γίνει επαρκής έρευνα εδάφους για τον σχεδιασμό της σήραγγας μεγάλου ανοίγματος, λαμβάνοντας υπόψη την πιθανή διακύμανση του βράχου στην τοπική γεωλογία.

46) Μετρό Γκουανγκοτσόου - Γραμμή 5 (Guangzhou Metro Line 5) (Κίνα, 17 Ιανουαρίου 2008)

Κατασκευή εγκάρσιας διόδου μεταξύ δύο σηράγγων γεώτρησης μηχανών. Η γραμμή 5 ξεκίνησε την λειτουργία της 28 Δεκεμβρίου 2008.



Εικόνα 4.46: Κατασκευαστική αστοχία που προκάλεσε η κατάρρευση της Γραμμής 5
– Ιανουάριος 2008

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, κατάρρευση της σήραγγας διασταύρωσης.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Υδροφόρο έδαφος.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Αδημοσίευτο

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Τα υπόγεια ύδατα κυλούσαν στη σήραγγα.

·Συνέπεια: Σπήλαιο σε δρόμο 200 m³, κανένας τραυματισμός.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Κρατήρας επιχωματωμένος με σκυρόδεμα.

·Διδάγματα: Αδημοσίευτο

47) Αποχετευτικός αγωγός δρόμου Λάνγκσταφ (Langstaff Road Trunk Sewer) (Τορόντο - Καναδάς, 2 Μαΐου 2008)

Η σήραγγα αποχέτευσης Λάνγκσταφ (Langstaff) είχε μήκος περίπου 3,6 km. Η επιθεώρηση του θαμμένου TBM επιβεβαίωσε αυτό που υποπτεύονταν οι μηχανικοί. Αυτό ήταν αρκετό για να προκαλέσει την πλημμύρα στην κατεύθυνση της σήραγγας του TBM. Το EPBM έσκαβε ανατολικά από την οδό Κίλ (Keele), όταν περίπου 1.800 m³ υγροποιημένης λάσπης πήγαν μέσα στη σήραγγα. Έξι εργάτες διέφυγαν χωρίς να τραυματιστούν μέσω του φρεατίου πρόσβασης περίπου 1,8 km πίσω από το μηχάνημα. Η σήραγγα σφραγίστηκε με διάφραγμα. Κατασκευάστηκε ένα διάφραγμα περίπου 300 μέτρα πίσω από το μηχάνημα για να συγκρατήσει την εισροή. Οι συνθήκες του εδάφους αποτελούνταν από υγρή άμμο και λάσπη κάτω από ένα υψηλό επίπεδο νερού.



Εικόνα 4.47: Κατασκευαστική αστοχία που προκάλεσε η αποχέτευση δρόμου Λάνγκσταφ – Μάιος 2008

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής. Περίπου 1.800 m³ υγροποιημένης λάσπης έρρεε στη σήραγγα για διάστημα 48 ωρών προκαλώντας τη βύθιση της σήραγγας και του TBM, ένα βύθισμα σχηματίστηκε στην επιφάνεια του εδάφους.

· Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Βρεγμένη άμμος και λάσπη κάτω από έναν υψηλό υδροφόρο ορίζοντα.

· Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Κατασκευάστηκε με την μέθοδο EPBM.

· Πιθανή αιτία αστοχίας: Το EPBM ήταν ο καταλύτης για την έναρξη ολόκληρης της ακολουθίας των γεγονότων αστοχίας. Κορεσμένες πολύ λεπτές άμμοι και λάσπες υπό πίεση 1,5 bar υπόγειων υδάτων.

· Συνέπεια: Ο δρόμος πάνω από την περιοχή που ανασκάφηκε έκλεισε, μεγάλη καθυστέρηση στο έργο, το TBM θάφτηκε.

· Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Γέμισμα του βυθίσματος με μη συρρικνωμένο γέμισμα (σκυρόδεμα χαμηλής αντοχής). Οι περιοχές με συνεχιζόμενη καθίζηση σταθεροποιήθηκαν με άμμο, επισκευή του αγωγού ύδρευσης και επισκευή δρόμου. Το διάφραγμα κατασκευάστηκε περίπου 300 m πίσω από το TBM για τον έλεγχο των πληροφοριών.

· Διδάγματα: Η στεγανοποίηση αποτελεί ζωτική σημασία για την ασφαλή λειτουργία του EPBM.

48) Σήραγγα «Κυκλική Γραμμή 4» (Circle Line 4 Tunnel) (Σιγκαπούρη, 23 Μαΐου 2008)

Κατασκευή σήραγγας «Κυκλική Γραμμή 4» (Circle Line 4) από κονίαμα TBM διαμέτρου 6 m. Κανείς δεν τραυματίστηκε, ούτε υπέστησαν ζημιές σε σπίτια στην περιοχή όταν το έδαφος βυθίστηκε περίπου στις 4.45 π.μ. Όμως, η παροχή νερού σε τρία σπίτια διακόπηκε καθώς οι σωλήνες έσπασαν όταν ο δρόμος κατέρρευσε. Οι μηχανικοί και οι εργολάβοι προετοιμάζονταν να σταθεροποιήσουν το έδαφος στην περιοχή όταν βυθίστηκε. Οι κάτοικοι της περιοχής λένε ότι έχουν βιώσει δονήσεις καθώς οι εργασίες διάνοιξης σήραγγας μετακινήθηκαν στην περιοχή τους τελευταίους 2 μήνες.



Εικόνα 4.48: Κατασκευαστική αστοχία που προκάλεσε η σήραγγα – Μάιος 2008

- Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής.
Σπήλαιο στο Holland Road με διάμετρο περίπου 8 m και 3 m βάθος.
- Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Σήραγγα 22 m κάτω από το έδαφος.
- Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Μείγμα πολτού TBM.
- Πιθανή αιτία αστοχίας: Χαλαρό έδαφος.
- Συνέπεια: Προσωρινή διακοπή παροχής νερού.
- Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Κρατήρας επιχωματωμένος με σκυρόδεμα.
- Διδάγματα: Δημοσίευτο

49) Αυτοκινητόδρομος M6 (M6 Motorway) (Ουγγαρία, 24 Ιουλίου 2008)

Ο αυτοκινητόδρομος M6 είναι ένας αυτοκινητόδρομος βορρά-νότου στην Ουγγαρία που εκτείνεται κατά μήκος του Δούναβη που συνδέει την Βουδαπέστη και την κομητεία Πέτς (Pécs). Αποτελείται από τέσσερις σήραγγες με επιφάνεια διατομής 101 m². Η πρώτη κατάρρευση σημειώθηκε στη διπλή σήραγγα «Α» (2x1,356 m μήκος) στις 24 Ιουλίου 2008. Η οπίσθια κατάρρευση σημειώθηκε στις 12 Αυγούστου 2008.



Εικόνα 4.49: Αυτοκινητόδρομος M6 – Ιούλιος 2008

· Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής,

1^η αστοχία: Επιφανειακή καθίζηση, επηρεάστηκε ένα τμήμα 113 m της σήραγγας στον ανατολικό μέρος και 90 m στο δυτικό μέρος.

2^η αστοχία: Κατάρρευση σήραγγας και περαιτέρω κατάρρευση εκτάσεων 76 m.

· Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: «Κόκκινος» πηλό περίπου 40 m κάτω από το έδαφος.

· Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Μέθοδος NATM με κατεύθυνση 1 m, υποστήριξη δοκών από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 50 mm και χαλύβδινο πλέγμα ανά διαστήματα 1 m.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Η εκσκαφή προχωρούσε στους δύο σωλήνες παράλληλα μεταξύ τους και πραγματοποιήθηκε μεγάλο τμήμα μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα.

·Συνέπεια: Η εκκένωση ολοκληρώθηκε με επιτυχία αλλά η αυξημένη πίεση του αέρα έριξε τους εργαζόμενους στο έδαφος που περίμεναν στην είσοδο της σήραγγας. Οι εργασίες στις τέσσερις σήραγγες διακόπηκαν και διενεργήθηκε έρευνα.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Κατασκευάστηκε μια σταθεροποιητική σειρά πασσάλων τσιμεντοκονίας μήκους 8 m και διαμέτρου 150 cm και στους δύο σωλήνες του τμήματος της σήραγγας που έχει καταρρεύσει. Εκσκαφή στο τμήμα που κατέρρευσε, πραγματοποιώντας την προστασία ενός σωλήνα μήκους 15 m με επικάλυψη 5 m.

·Διδάγματα: Έλεγχος εκσκαφής και στήριξης.

50) Γραμμή Τραμ Μετρό Βορρά-Νότου Κολωνίας (Cologne North-South Metro Tram Line) (Γερμανία, 3 Μαρτίου 2009)

Η γραμμή Βορρά-Νότου μετρό είχε μήκος 3,8 km με 7 σταθμούς του υπόγειου σιδηροδρόμου. Η αποτυχία της ανασκαφής προκάλεσε πλήρη κατάρρευση ενός κτιρίου την Τρίτη 3 Μαρτίου και στοίχισε τη ζωή σε δύο κατοίκους στις μερικώς κατεδαφισμένες πολυκατοικίες. Οι εργάτες εκκένωσαν τα έργα όταν αντιλήφθηκαν ότι κάτι δεν πήγαινε καλά και προειδοποίησαν 10 έως 15 υπαλλήλους και επισκέπτες που βρίσκονταν στο ιστορικό κτήριο της πόλης δίπλα στο φρεάτιο και άλλοι για να τρέξουν να σώσουν τη ζωή τους, λίγα λεπτά πριν το τσιμεντένιο κτίριο και το μεγάλο βάρος ιστορικών βιβλίων και χαρτιών καταρρεύσει. Τα κατεστραμμένα κτίρια και στις δύο πλευρές έχουν υποστεί σοβαρό κίνδυνο και τα διαταραγμένα εδάφη αποκλείουν τη χρήση εξοπλισμού ανύψωσης μέχρι να ασφαλιστεί η περιοχή.



Εικόνα 4.50: Κατασκευαστική αστοχία που προκάλεσε η Γραμμή Μετρό Βορρά-Νότου – Μάρτιος 2009

- Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, κατάρρευση των τοιχωμάτων του διαφράγματος.
- Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Υδροφόρες αποθέσεις που αποτελούνται από αμμοχάλικο. Σχηματίστηκε υδροφόρος ορίζοντας περίπου 8-10 m κάτω από το έδαφος, τα τοιχώματα του διαφράγματος είναι βάθος 37-40 m.
- Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Οι σήραγγες κατασκευάστηκαν την μέθοδο κλειστής διάνοιξης TBM και οι διαφραγματικοί τοίχοι κατασκευάστηκαν με την μέθοδο ανοικτής διάνοιξης (Cut and Cover).
- Πιθανή αιτία αστοχίας: Η αστοχία του ανεστραμμένου τόξου υπό υψηλές πιέσεις και η απώλεια εδάφους λόγω εισροής υπόγειων υδάτων δημιούργησαν ένα κενό έξω από τους διαφραγματικούς τοίχους μέσα στο οποίο κατέρρευσε το κτίριο. Δεν λαμβάνονται μέτρα προστασίας για την προστασία των κτιρίων που βρίσκονται γειτονικά από την εκσκαφή.
- Συνέπεια: Κατάρρευση του ιστορικού κτιρίου της πόλης, μερική κατάρρευση 2 πολυκατοικιών, εκκένωση κατοίκων της περιοχής (80 οικογένειες σε 10 κτίρια), 2 άνθρωποι σκοτώθηκαν.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Περίπου 2.900 m³ σκυρόδεμα χύθηκε για να σταθεροποιηθεί η κατάσταση. Στις συνδεδεμένες σήραγγες φτιάχτηκαν τσιμεντένια τείχη φραγμού για να σταματήσει η διάδοση του εδάφους και των υπόγειων υδάτων.

·Διδάγματα: Η υδραυλική κλίση στο τοίχωμα του διαφράγματος πρέπει να διατηρείται κάτω από μια ορισμένη κρίσιμη τιμή λαμβάνοντας υπόψη τις εποχιακές διακυμάνσεις του υδροφόρου ορίζοντα. Τα τοιχώματα του διαφράγματος θα πρέπει να εξετάζονται κατά την κατασκευή και θα πρέπει να επεκτείνονται σε λιγότερο διαπερατά στρώματα.

51) Σήραγγα Bright Water Tunnel (Σιάτλ – USA, 8 Μαρτίου 2009)

Η εγκατάσταση της σήραγγας μεταφοράς Bright Water έγινε στην κομητεία King σε μια κατοικημένη γειτονιά βόρεια του Σιάτλ της Ουάσιγκτον. Είχε μήκος περίπου 4,2 km. Μια γυναίκα ανακάλυψε το βύθισμα περίπου στις 6:30 το πρωί της Κυριακής 8 Μαρτίου 2009 στο τέλος του δρόμου της, σχεδόν 1,5 μίλι δυτικά του φρεατίου πρόσβασης στο Βόρειο Κένμορ (North Kenmore).



Εικόνα 4.51: Κατασκευαστική αστοχία που προκάλεσε η σήραγγα – Μάρτιος 2009

- Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, βύθισμα 4,5m x 9m που σχηματίζεται σε δρόμο ενός σπιτιού.
- Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Παγετώδεις αποθέσεις αποτελούμενες από άμμο ή χαλίκι, λάσπη ή ιλυώδη άμμο, σκληρό άργιλο και υψηλές πιέσεις υδάτων.
- Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Διάνοιξη σήραγγας με μηχανήματα Mixshield (TBM).
- Πιθανή αιτία αστοχίας: Ο χειριστής TBM με το σύστημα κλειστού πολτού καθιστά δύσκολη την ποσότητα του υλικού που εξορύσσετε κατά τη διάρκεια μιας ώθησης. Η παρουσία ενός μεγάλου ογκόλιθου καθυστέρησε τη διείσδυση χωρίς να επιβραδύνει την εξαγωγή υλικού προκαλώντας την εκσκαφή.
- Συνέπεια: Ζημιές στο δρόμο ενός σπιτιού.
- Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Γέμισμα της βυθίσματος με θρυμματισμένο βράχο και άμμο.
- Διδάγματα: Δημοσίευτο

52) Τραμ Beacon Hill (Seattle's Beacon Hill Light Rail) (Σιάτλ – USA, Ιούλιος 2009)

Η σήραγγα Beacon Hill είναι μια σήραγγα δημόσιας συγκοινωνίας στο Σιάτλ της Ουάσιγκτον, που μεταφέρει τη γραμμή 1 ελαφρών σιδηροδρομικών γραμμών κάτω από το Μπέικον Χιλ του Σιάτλ μεταξύ της Κοιλάδας Ρενιέ (Rainier Valley) και Κάνε ακριβώς ανατολικά του Διακρατικού 5 (Interstate 5). Ο σταθμός βρίσκεται περίπου 50 m υπόγεια κοντά στο μέσο της σήραγγας. Η κατασκευή του σταθμού ξεκίνησε τον Μάρτιο του 2005 και ολοκληρώθηκε τον Ιούλιο του 2009. Εκείνη την ημέρα, μια ιδιοκτήτρια ενός σπιτιού ανακάλυψε ένα βύθισμα βάθους 21 ποδιών στην μπροστινή αυλή της κοντά στα θεμέλια του σπιτιού. Μετά την κατάρρευση, αρκετοί εργάτες τραυματίστηκαν και ένας σκοτώθηκε κατά την κατασκευή της σήραγγας. Η σήραγγα ολοκληρώθηκε με κόστος 309 εκατομμυρίων δολαρίων.



Εικόνα 4.52: Κατασκευαστική αστοχία που προκάλεσε το τραμ Μπέικον Χιλ – Ιούλιος 2009

- Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, βύθισμα βάθους 6,4 m που σχηματίστηκε στην επιφάνεια του εδάφους. 6 μεγάλα κενά βρέθηκαν από 6 m έως 18 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και πίσω από την τμηματική επένδυση των TBM.
- Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Σταθερός πηλός και άμμος.
- Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Διάνοιξη σήραγγας από EPBM.
- Πιθανή αιτία αστοχίας: Το EPBM χτύπησε θύλακες άμμου στην σταθερή στρώση αργίλου.
- Συνέπεια: Βύθισμα στην μπροστινή αυλή ενός σπιτιού κοντά στα θεμέλιά του.
- Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Γεμίζοντας τα κενά με ελεγχόμενη πυκνότητα 200 έως 400 m³, συμπίεση κάτω από τα κενά και την κορυφή των σηράγγων που διέρχονται.
- Διδάγματα: Ο έλεγχος διαχείρισης εκσκαφής δεν πρέπει να παραλείπεται καθώς θα μπορούσαν να βοηθήσουν στον εντοπισμό θέσεων υπερεκσκαφής.

53) Σήραγγα Γκλέντοου Χέντρεις (Glendoe Headrace Tunnel) (Σκωτία, Αύγουστος 2009)

20.000 τόνοι βράχου έπεσαν μέσα σε μια σήραγγα δρόμου που συνδέεται με τον στρόβιλο παραγωγής ενέργειας. Η σήραγγα κατασκευάστηκε με την μέθοδο TBM. Τμήμα σήραγγας μήκους 800 m αποφράχθηκε από τα συντρίμια, γεγονός που κατέστη αναγκαία την κατασκευή μιας παράκαμψης σήραγγας. Μια πτώση της πίεσης του νερού μέσω της τουρμπίνας προειδοποίησε για προβλήματα και ξεκίνησε η διακοπή λειτουργίας. Η ευθύνη για την κατάρρευση εξετάστηκε στο δικαστήριο. Ο δικαστής της πρώτης υπόθεσης διαπίστωσε ότι η αιτία της αποτυχίας ήταν «διαβρώσιμος βράχος» και οι άλλοι τρεις δικαστές συμφώνησαν.



Εικόνα 4.53: Κατασκευαστική αστοχία που προκάλεσε η σήραγγα Γκλέντοου Χέντρεις – Αύγουστος 2009

·Είδος αστοχίας: Πτώση βράχων.

· Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Επαρκής βράχος.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Σήραγγα TBM χωρίς επένδυση διαμέτρου 5 m. Η υποστήριξη αποτελείται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ενισχυμένο με ίνες χάλυβα, μπουλόνια και πλέγμα.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Ασθενές υλικό, η διάνοιξη εγκαταλείφθηκε και η πρόσληψη βάθους 250 m σε αυτή την τοποθεσία ακυρώθηκε. Κατά τη διάρκεια της διάνοιξης με

TBM δεν υπήρξε καμία ένδειξη για αδυναμία ή αστάθεια του βράχου, η πίεση νερού εκτονώθηκε κατά τη διαδικασία άντλησης.

·Συνέπεια: Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο εργοτάξιο ανεστάλη για μεγάλο χρονικό διάστημα.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Κατασκευή παράκαμψης σήραγγας μήκους 200 m.

·Διδάγματα: Πιθανή επίδραση ασθενούς ζώνης που βρίσκεται στην περιοχή της σήραγγας.

54) Σήραγγα Μετρό Κάιρο (Cairo Metro Tunnel) (Αίγυπτος, 3 Σεπτεμβρίου 2009)

Η γραμμή 3 - Φάση 3 του μετρό του Κάιρου είχε μήκος περίπου 7,2 km. Το μετρό του Κάιρου, είναι το πρώτο από τα τρία ολοκληρωμένα συστήματα μετρό στην Αφρική και το πρώτο στον αραβικό κόσμο που κατασκευάστηκε. Άνοιξε το 1987 ως Γραμμή 1 από Χελγουάν (Helwan) στην πλατεία Ραμσής (Ramsis). Από το 2013, το μετρό μετέφερε σχεδόν 4 εκατομμύρια επιβάτες την ημέρα. Μετά την κατάρρευση, δεν υπήρξαν τραυματισμοί και δεν υπήρξαν ζημιές σε κτίρια στην περιοχή, αν και 80 οικογένειες σε 10 κτίρια εκκενώθηκαν. Ένα σταθμευμένο αυτοκίνητο γλίστρησε στο βύθισμα που σχηματίστηκε όταν εμφανίστηκε το βράδυ της Πέμπτης 3 Σεπτεμβρίου. Άλλα έξι σταθμευμένα αυτοκίνητα σώθηκαν και η κυκλοφορία στην οδό Ελ Γκαίς (Al-Geish) σταμάτησε όταν οι άνθρωποι είδαν τον δρόμο να βυθίζεται.



Εικόνα 4.54: Κατασκευαστική αστοχία που προκάλεσε η σήραγγα μετρό του Κάιρο – Σεπτέμβριος 2009

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής,

1^η αστοχία: Ένα τμήμα έπεσε από έναν δακτύλιο σχηματίζοντας υποχώρηση στην επιφάνεια του εδάφους.

2^η αστοχία: Η δεύτερη κατάρρευση εδάφους σημειώθηκε μετά την έκχυση σκυροδέματος σε προσπάθεια να σταματήσει η πρώτη κατάρρευση.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Έδαφος που αποτελείται από ένα ανώτερο στρώμα 8 m μαλακής διαπερατής άμμου και αργιλικού εδάφους.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Διάνοιξη σήραγγας με Mixshield πολύ TBM διαμέτρου 9,4 m.

·Πιθανή αιτία αστοχίας:

1^η αστοχία: Ένα τμήμα τοποθετημένου δακτυλίου έπεσε, επιτρέποντας το νερό και το χώμα να ρέουν στη σήραγγα γεμίζοντας το εσωτερικό του TBM και την σήραγγα.

2^η αστοχία: Περισσότερα από 1.000 m³ σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν για την πλήρωση του πρώτου βυθίσματος. Το βάρος του σκυροδέματος δρα σε μαλακό έδαφος κάτω από ένα υψηλό επίπεδο υπόγειων υδάτων προκάλεσε μια δεύτερη κατάρρευση του εδάφους.

·Συνέπεια: Θαμμένο TBM, ένα σταθμευμένο αυτοκίνητο γλίστρησε στην οπή με διάμετρο 15m-20m x 20m, εκκένωση κατοίκων της περιοχής (80 οικογένειες σε 10 κτίρια).

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης:

1^η αστοχία: Γέμισμα του βυθίσματος με σκυρόδεμα.

2^η αστοχία: Έγχυση χημικού ενέματος κατακόρυφα με σκοπό την ενίσχυση του εδάφους γύρω από το TBM και τη σήραγγα για υποστήριξη της εκσκαφής.

·Διδάγματα: Αδημοσίευτο

55) Σήραγγα Γκίνγκελ Γκάμπ II (Headrace tunnel of Gilgel Gibe II HydroProject)
(Αιθιοπία, Οκτώβριος 2006 – Ιανουάριος 2010)

Στην Αιθιοπία κατασκευάστηκε μια σήραγγα 26 km ως μέρος του υδροδρομικού έργου Gilgel Gibe II. Σχεδόν 2 εβδομάδες μετά τα εγκαίνια, ένα τμήμα της σήραγγας κατέρρευσε και προκάλεσε τη διακοπή λειτουργίας του σταθμού. Οι επισκευές ολοκληρώθηκαν 26 Δεκεμβρίου 2010.



Εικόνα 4.55: Σήραγγα Γκίνγκελ Γκάμπ II- Οκτώβριος 2006-Ιανουάριος 2010

·Είδος αποτυχίας:

1^η αστοχία: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής τον Οκτώβριο του 2006. Υψηλή πίεση, 40 bar, εισροή λάσπης ώθησαν το TBM προς τα πίσω συνθλίβοντας την τμηματική επένδυση στο πίσω μέρος.

2^η αστοχία: Αστοχία υπήρξε τον Ιανουάριο του 2010. Η κατάρρευση και η πτώση βράχων σημειώθηκαν όταν ολοκληρώθηκε η κατασκευή της σήραγγας. Η ποσότητα εισόδου υλικού στη σήραγγα ήταν περίπου 8500 m³. Η κατάρρευση δημιούργησε μια κοιλότητα 30 m έως 40 m βάθους.

· Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Στο σημείο της 2ης κατάρρευσης, η κάλυψη ήταν περίπου 800 m. Υψηλή πίεση νερού ή λάσπης.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Διπλή ασπίδα TBM διαμέτρου 8,10 m.

·Πιθανή αιτία αστοχίας:

1^η αστοχία: Αντιμετώπισε εισροή λάσπης υψηλής πίεσης στην περιοχή που εμπόδιζε την προώθηση του TBM και κατέστρεψε 7 δακτυλίους της τμηματικής επένδυσης.

2^η αστοχία: Σκληρός βράχος γύρω από τη σήραγγα διαταράχθηκε κατά την εκσκαφή σήραγγας. Μερικοί ογκόλιθοι έπεσαν προκαλώντας ζημιές. Υπήρχε η υποψία ότι ένα σημαντικό ρήγμα ήταν κρυμμένο πίσω από ένα λεπτό διάφραγμα βράχου. Η υψηλή συμπτυκνωμένη πίεση νερού ή λάσπης έσπασε το διάφραγμα και στη συνέχεια την επένδυση.

·Συνέπεια:

1^η αστοχία: Δύο χρόνια καθυστέρηση κατασκευής.

2^η αστοχία: Μείωση δυναμικότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης:

1^η αστοχία: Μια σήραγγα παράκαμψης 230 m ανασκάφηκε από TBM για να περάσει το σημείο αστοχίας.

2^η αστοχία: Πρόγραμμα διάνοιξης πρόσθετων γεωτρήσεων και καθαρισμός είτε με ανακατασκευή του κατεδαφισμένου τμήματος της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χαλύβδινη στήριξη νευρώσεων, είτε με κατασκευή σήραγγας παράκαμψης στο σημείο της κατάρρευσης.

·Διδάγματα: Πρόσθετες εργασίες έρευνας εδάφους θα που μπορούσαν να βελτιώσουν την γεωλογία και υδρογεωλογία. Ο κίνδυνος υπερβολικής εισροής θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το στάδιο του σχεδιασμού, για τυχόν ανωμαλίες που παρατηρούνται κατά την κατασκευή της σήραγγας. Θα πρέπει να αξιολογούνται προσεκτικά σημειώνοντας ότι οι πέτρες ξετυλίχθηκαν κατά τη διάρκεια της εκσκαφής της σήραγγας. Τέτοιες ανωμαλίες μπορεί να μην προκαλούν άμεση κατάρρευση, αλλά μπορεί να ξεκινήσουν τον μηχανισμό κατάρρευσης στο μέλλον, Μόνο 10-15 m επένδυσης υπέστη ζημιά και η επένδυση δεν κατέρρευσε κατά μήκος των αρμών.

56) Σήραγγα Μπλάνκα (Blanka Tunnel) (Δημοκρατία της Τσεχίας, 20 Μαΐου 2008 – 12 Οκτωβρίου 2008 – 6 Ιουλίου 2010)

Η σήραγγα Μπλάνκα (Blanka) έχει μήκος περίπου 6 km αποτελεί μέρος του συστήματος περιφερειακών οδών στην Πράγα. Για την κατασκευή της σήραγγας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανοιχτής διάνοιξης (Cut and Cover) και η μέθοδος κλειστής διάνοιξης και συγκεκριμένα η μέθοδος NATM. Τμήμα της σήραγγας κατέρρευσε στον περιφερειακό δρόμο της Πράγας τα ξημερώματα της Τρίτης. Τα αίτια της κατάρρευσης που έθαψε έναν οδηγό εκσκαφέα μαζί με το μηχάνημα του, δεν έχουν ακόμη διευκρινιστεί.



Εικόνα 4.56: Κατασκευαστική αστοχία που προκάλεσε η σήραγγα Μπλάνκα

Είδος αστοχία: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής,

1^η αστοχία: Στις 20 Μαΐου 2008 σχηματίστηκε κρατήρας βάθους 15 m μέσα στο πάρκο Στρομόβκα (Stromonka).

2^η αστοχία: Στις 12 Οκτωβρίου 2008 ένας κρατήρας βάθους 15 m και διαμέτρου 30 m σχηματίστηκε μέσα στο πάρκο Στρομόβκα (Stromonka).

3^η αστοχία: Στις 6 Ιουλίου 2010 σχηματίστηκε κρατήρας διαμέτρου 15 m κοντά στα κτίρια του Υπουργείου Πολιτισμού.

· Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Σήραγγα σε βράχο, εκσκαφή κάτω από τη στάθμη των υπόγειων υδάτων.

· Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Μέθοδος NATM.

· Πιθανή αιτία αστοχίας:

1^η αστοχία: Αστάθεια βράχου στην εκσκαφή που προκαλείται από πρόσληψη νερού.

2^η αστοχία: Απροσδόκητη δομική αστάθεια της βραχομάζας κατά ζώνη ρήγματος.

3^η αστοχία: Αστάθεια σημειώθηκε στα προσωρινά τοιχώματα στήριξης. Η λεπτομερής έρευνα ήταν σε εξέλιξη και η ακριβής αιτία της αποτυχίας παρέμενε άγνωστη.

· Συνέπεια: Κανένας τραυματισμός στη 1^η και 2^η αστοχία. Στην 3^η αστοχία, ο οδηγός εκσκαφέα θάφτηκε και στη συνέχεια διασώθηκε, πρόσθετο κόστος και καθυστέρηση του προγράμματος κατασκευής.

· Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης:

1^η και 2^η αστοχία: Άγνωστο

3^η αστοχία: Ο κρατήρας επιχωματώθηκε με 2000 m³ σκυροδέματος έως και 3 m κάτω από το έδαφος.

· Διδάγματα: Από την 1^η αστοχία απεικονίστηκαν οι συνέπειες του ανεπιτυχούς ελέγχου εισόδου υπόγειων υδάτων, για την 2^η αστοχία πρόσθετες εργασίες έρευνας εδάφους θα μπορούσαν να βελτιώσουν την κατανόηση της πραγματικής γεωλογίας και να μειώσουν τον κίνδυνο διάνοιξης σήραγγας.

57) Σιδηρόδρομος Σέντζεν (Shenzhen Express Rail Link) (Κίνα, 27 Μαρτίου 2012 – 10 και 18 Οκτωβρίου 2011 – 30 Οκτωβρίου 2011)

Το τμήμα σιδηροδρομικής σύνδεσης ταχείας σύνδεσης Κουανγκτσόου- Σέντζεν- Χονγκ Κονγκ (Guangzhou–Shenzhen–Hong Kong) του Κουανγκτσόου- Σέντζεν (Guangzhou–Shenzhen) ξεκινά από τον σιδηροδρομικό σταθμό Guangzhou South και τελειώνει στο σταθμό Shenzhen Futian, έχει μήκος γραμμής 116 km.



Εικόνα 4.57: Κατασκευαστική αστοχία που προκάλεσε ο Σιδηρόδρομος Σέντζεν

· Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής. Αρκετές αστοχίες εδάφους σημειώθηκαν στο Ξιαμελίν (Xiameilin) στην περιοχή Φιούσαν (Futian).

· Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Αδημοσίευτο

· Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Διάνοιξη σήραγγας με TBM περίπου 22 m έως 26 m κάτω από το έδαφος.

· Πιθανή αιτία αστοχίας:

1^η αποτυχία (2011): Ένας κρατήρας σχηματίστηκε με διάμετρο περίπου 7 m και βάθος 10 m στο γήπεδο ποδοσφαίρου στις 27 Μαρτίου 2011. Το βύθισμα ήταν γεμάτο με νερό και φυσαλίδες αέρα. Απροσδόκητη αλλαγή στα επιφανειακά υλικά που συναντήθηκαν από ελαφρύ πέτρωμα σε πλήρως αποσυντιθέμενο βράχο.

2^η αποτυχία (2011): Ένας κρατήρας διαμέτρου περίπου 10 m σχηματίστηκε κοντά στην τοποθεσία της πρώτης αστοχίας στις 4 Μαΐου 2011. Οι έντονες βροχοπτώσεις και το έδαφος στη θέση της προηγούμενης βλάβης δεν είχαν σταθεροποιηθεί πλήρως.

3^η αποτυχία (2011): Ένας κρατήρας βάθους περίπου 7 m σχηματίστηκε στην επιφάνεια του εδάφους κατά την αλλαγή των δίσκων κοπής στις 10 Μαΐου 2011. Χαλαρά στρώματα πλήρωσης με υψηλή διείσδυση νερού και ύπαρξη αποστραγγιστικού καναλιού υποστρώματος.

4^η αστοχία (2011): Κρατήρας διαμέτρου περίπου 1,5 m και βάθους 7 m σχηματίστηκε στο γήπεδο ποδοσφαίρου όπου συνέβησαν τρεις προηγούμενες καταρρεύσεις εδάφους στις 18 Μαΐου 2011.

5^η αστοχία (2011): Κρατήρας βάθους περίπου 5 m σε κάτοψη 100 m σχηματίστηκε σε δρόμο στις 30 Οκτωβρίου 2011. Ύπαρξη μαλακού και σκληρού χώματος πάνω από την σήραγγα και διαρροή πεπιεσμένου αέρα.

·Συνέπεια: Εκκένωση των γύρω κατοικιών, επίχωση του βυθίσματος με χώμα.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Επίχωση του βυθίσματος με σκυρόδεμα.

·Διδάγματα: Αδημοσίευτο

58) Υποθαλάσσια σήραγγα Διυλιστηρίου Μιζουσίμα (Mizushima Refinery Subsea Tunnel) (Ιαπωνία, 14 Φεβρουαρίου 2012)

Η σήραγγα διαμέτρου 5 m και μήκους 800 m κατασκευάστηκε για τη στέγαση ενός υποθαλάσσιου αγωγού μεταξύ 2 διυλιστηρίων στις απέναντι πλευρές ενός θαλάσσιου καναλιού στο λιμάνι Μιζουσίμα (Mizushima) στο Κουρασίκι (Kurashiki). Το ατύχημα στο διυλιστήριο συνέβη περίπου στις 12:30 μ.μ. της Τρίτης 7 Φεβρουαρίου.



Εικόνα 4.58: Κατασκευαστική αστοχία που προκάλεσε η υποθαλάσσια σήραγγα Μιζουσίμα – Φεβρουάριος 2012

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, κατάρρευση τμήματος σήραγγας ενός ή δύο δακτυλίων πίσω από τη σφραγίδα της ουράς, εισβολή νερού στη σήραγγα. Ένα βύθισμα στο βυθό της θάλασσας διαμέτρου περίπου 19 m βρέθηκε πίσω από το TBM.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Μαλακό έδαφος (ιλύς και άμμος), βάθος νερού περίπου 26 m.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: EPB TBM (τμηματική επένδυση σκυροδέματος 160 mm).

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Η επένδυση μπορεί να είχε αστοχήσει ή η ασπίδα «έπεσε» σε ένα τεράστιο κενό ή ρήγμα στο έδαφος και η ουρά να χωρίστηκε από την επένδυση.

·Συνέπεια: 5 εργάτες σκοτώθηκαν.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Οι εργασίες έχουν ανασταλεί.

·Διδάγματα: Αδημοσίευτο

59) Σήραγγα Σασάγκο (Sasago Tunnel) (Ιαπωνία, 2 Δεκεμβρίου 2012)

Η σήραγγα Σασάγκο (Sasago) δύο λωρίδων έχει μήκος περίπου 4,5 km. Κατασκευάστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1970 και άνοιξε το 1977. Περίπου στις 8 π.μ. στις 2 Δεκεμβρίου 2012, σχεδόν 150 τσιμεντένια πάνελ οροφής μέσα στη σήραγγα Σασάγκο με προορισμό το Τόκιο κατέρρευσαν, συνθλίβοντας 3 οχήματα, συμπεριλαμβανομένου ενός βάν, που μετέφερε 6 άτομα που έπιασε φωτιά. Η σήραγγα έκλεισε για μια περίοδο 27 ημερών για επισκευές και αφαίρεση πλαισίων οροφής, προτού ανοίξει ξανά ο νότιος σωλήνας στις 29 Δεκεμβρίου. Ο βόρειος σωλήνας, όπου συνέβη η κατάρρευση, άνοιξε ξανά στις 8 Φεβρουαρίου 2013.



Εικόνα 4.59: Κατασκευαστική αστοχία που προκάλεσε η σήραγγα Σασάγκο – Δεκέμβριος 2012

· Είδος αστοχίας: Κατάρρευση οροφής.

· Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Αδημοσίετο

· Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Κρεμαστά πάνελ οροφής αγωγών εξαερισμού στερεωμένα στην οροφή της σήραγγας με μπουλόνια αγκύρωσης.

· Πιθανή αιτία αστοχίας: Φθορά μπουλονιών αγκύρωσης και των προκατασκευασμένων πλαισίων οροφής από σκυρόδεμα.

· Συνέπεια: Έως και 300 πάνελ οροφής, βάρους περίπου 1200 κιλών το καθένα κατέρρευσαν σκοτώνοντας 9 ανθρώπους και προκαλώντας 2 τραυματισμούς.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Η ιαπωνική κυβέρνηση διέταξε επείγουσες επιθεωρήσεις 49 σιδηροδρόμων στην Ιαπωνία με το ίδιο σχέδιο οροφής.

·Διδάγματα: Οι εργασίες επιθεώρησης και συντήρησης για παλιές σιδηροδρόμους είναι σημαντικές.

60) Έργο διαμετακόμισης ελαφρού σιδηροδρόμου της Οκτάβα (Ottawa's Light Rail Transit Project) (Καναδάς, 20 Φεβρουαρίου 2014)

Το έργο περιλαμβάνει υπόγεια έργα μήκους 2,5 km και διπλής τροχιάς. Η διάνοιξη σιδηροδρόμου είχε ξεκινήσει στις 12 Δεκεμβρίου 2013 και είχε προχωρήσει περίπου 28 m κάτω από τον δεύτερο γύρο υποστήριξης αψίδας οροφής επικαλυπτόμενων σωλήνων και βρισκόταν στην έναρξη των 24 ωρών εργασιών εξόρυξης τη στιγμή του συμβάντος του βυθίσματος. Το περιστατικό άρχισε να συμβαίνει στις 10 μ.μ. το βράδυ της Πέμπτης 20 Φεβρουαρίου, όταν ο εκσκαφέας της σιδηροδρόμου και οι επιθεωρητές παρατήρησαν κάποιο υλικό να διέρχεται από την σιδηροδρόμο σε αυτό το σημείο.



Εικόνα 4.60: Κατασκευαστική αστοχία που προκάλεσε το έργο του σιδηροδρόμου της Οκτάβας – Φεβρουάριος 2014

- Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, το έδαφος καταρρέει και οδηγεί στο σχηματισμό οπής.
- Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Ικανός ασβεστόλιθος (στη θέση του συμβάντος σημειώθηκε θύλακας πηλού και αμμώδους αργίλου).
- Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: Στήριγμα τόξου εκτοξευόμενου σκυροδέματος σωλήνων και οροφής.
- Πιθανή αιτία αστοχίας: Ο συνδυασμός μιας ζώνης από μαλακό πηλό και αμμώδους αργίλου στην επάνω αριστερή γωνία του μετώπου.
- Συνέπεια: Σχηματίστηκε ένα βύθισμα πλάτους 8 m και βάθους 12 m, ζημιές σε επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας αλλά δεν τραυματίστηκαν άτομα.
- Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Το διάφραγμα σχηματίστηκε στη σήραγγα πριν από την επίχωση, το βύθισμα επιχωματώθηκε με περισσότερα από 620 m³ σκυροδέματος.
- Διδάγματα: Δημοσίευτο

61) Γραμμή 4 Μετρό του Ρίου (Rio's Metro Line 4) (Βραζιλία, 11 Μαΐου 2014)

Η γραμμή του μετρό μήκους 16 km που συνδέει τη Μπάρα Ντα Τιζούκα (Barra de Tijuca) με την Ιπανέμα (Ipanema) βρίσκεται υπό κατασκευή από το 2010 και θα τεθεί σε λειτουργία το 2016. Οι μέθοδοι διάνοιξης σήραγγας περιλαμβάνουν το NATM και το EPB TBM.



Εικόνα 4.61: Κατασκευαστική αστοχία που προκάλεσε το μετρό του Ρίου – Μάιος 2014

·Είδος αστοχίας: Κατασκευαστική αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής, δύο οπές στην οδό Βαρόνος του Πύργου (Barao da Torre) στην Ιπανέμα (Iranema) του Ρίο ντε Τζανέιρο που προκλήθηκαν από την εκσκαφή TBM.

·Συνθήκες υπόγειων έργων και υδάτων: Σήραγγες σε ζώνη μετάβασης βράχου και αμμώδους εδάφους, άγνωστη κατάσταση υπόγειων υδάτων.

·Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης: TBM.

·Πιθανή αιτία αστοχίας: Το μέτωπο ενός ρηγματωμένου βράχου δεν στερεώθηκε κατά τη διάρκεια της εκσκαφής σήραγγας. Οι βράχοι επηρεάστηκαν και απέτυχαν σταδιακά. Στη συνέχεια, οι κοιλότητες λόγω του υπερκείμενου εδάφους προκάλεσαν βυθίσματα.

·Συνέπεια: Κανένας τραυματισμός, μικρή καθυστέρηση κατασκευής.

·Μέτρα εκτατής ανάγκης και αποκατάστασης: Αποκλεισμός περιοχής, οι κοιλότητες επιχωματώθηκαν με περίπου 100 m³ σκυροδέματος.

·Διδάγματα: Όπως αποκαλύφθηκε από τη μελέτη διερεύνησης του περιστατικού, ο αντίκτυπος του περιστατικού ήταν περιορισμένος λόγω τεσσάρων παραγόντων:

- 1) Καλή επιλογή μεθόδου εκσκαφής (δηλαδή EPB TBM).
- 2) Εργασίες παρακολούθησης σε έδαφος και κτίρια.
- 3) Άμεση και αποτελεσματική ανάπτυξη του Σχεδίου Έκτακτης Ανάγκης.

4.1 ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

4.1.1 Αστοχία κατασκευαστικών στοιχείων

- Ελλιπής σχεδιασμός της ασπίδας. Η στέψη της ασπίδας διείσδυσε μέσα από το στρώμα αργίλου σε άμμο και χαλίκι. (*Green Park (Λονδίνο, 1964)*).
- Η ασπίδα ήταν αναποτελεσματική στη στήριξη του υπερκείμενου εδάφους. (Γραμμή Victoria κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. (*Victoria Line Underground*) (UK,1965)).
- Κακή αντίσταση ερπυσμού της εποξειδικής κόλλας που χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση των αγκυρίων. (*Διακρατική σήραγγα σύνδεσης 90 (Interstate 90 Connector Tunnel)* (Βοστώνη Μασαχουσέτης, Ιούλιος 2006)).
- Φθορά μπουλονιών αγκύρωσης και των προκατασκευασμένων πλαισίων οροφής από σκυρόδεμα. (*Σήραγγα Σασάγκο (Sasago Tunnel)* (Ιαπωνία, 2 Δεκεμβρίου 2012)).
- Κατάρρευση διαφραγματικού τοίχου. Γρήγορη διακύμανση της στάθμης των υπόγειων υδάτων λόγω των έντονων βροχοπτώσεων, πολύπλοκη γεωλογία που περιλαμβάνει ένα στρώμα διογκωμένου εδάφους. (*Μετρό Γκουανγκοτσόου - Γραμμή 3 (Guangzhou Metro Line 3)* (Κίνα, 1 Απριλίου 2004)).
- Η αστοχία του ανεστραμμένου τόξου υπό υψηλές πιέσεις και η απώλεια εδάφους λόγω εισροής υπόγειων υδάτων δημιούργησαν ένα κενό έξω από διαφραγματικούς τοίχους μέσα στο οποίο κατέρρευσε το κτίριο. Δεν λαμβάνονται μέτρα προστασίας για την προστασία των κτιρίων που βρίσκονται γειτονικά απο την εκσκαφή. (*Γραμμή Τραμ Μετρό Βορρά-Νότου Κολωνίας (Cologne North-South Metro Tram Line)* (Γερμανία, 3 Μαρτίου 2009)).

4.1.2 Συνάντηση σηράγγων με προυπάρχουσες κατασκευές

- Η σήραγγα τέμνει τον πυθμένα ενός εγκαταλειμμένου πηγαδιού διαμέτρου 600 mm. (*Σήραγγα λυμάτων (Southend-On-Sea Sewage Tunnel) (Λονδίνο, 1966)*).
- Αστοχία της μονάδας ψύξης εδάφους. (*Μετρό Σαγκάη (Shanghai Metro) (Κίνα 2003)*).
- Μη ευνοϊκή κατεύθυνση των επιπέδων στρώσης σε σχέση με τη γεωμετρία και το άνοιγμα των σηράγγων, πάνω από την εκσκαφή του πυλώνα του βράχου και την απομάκρυνση της εναπομείνουσας πέτρας και του παλιού τσιμεντένιου τοίχου πριν από την προγραμματισμένη επισκευή κατασκευάστηκε τοίχος από σκυρόδεμα. (*Μετρό Όσλο (Metro Oslo Tunnel) (Νορβηγία, 17 Ιουνίου 2004)*).

4.1.3 Αστοχίες με την μέθοδο TBM

- Κακή εκτίμηση των εδαφικών συνθηκών. Το έδαφος φαίνεται να οφείλεται σε ανεπαρκή αντοχή στις έντονα φθαρμένες και πολύ τεκτονισμένες ζώνες του αθηναϊκού σχιστόλιθου (που είναι ίζημα τύπου φλύσχη που αποτελείται από αργιλώδεις και ασβεστολιθικούς ψαμμίτες με λεπτή στρώση με αλλοιώσεις και υποβάλλονται σε έντονες αναδιπλώσεις, ωθήσεις, ρωγμές). Μεγάλα ανοίγματα λάσπης της κεφαλής κοπής TBM που δεν μπορούν να ελέγξουν επαρκώς τη ροή λάσπης (η κεφαλή κοπής λειτουργεί στον ανοιχτό αέρα, δηλαδή υπό ατμοσφαιρική πίεση). (*Μετρό Αθηνών (Athens Metro) (Ελλάδα, 1991-1998)*).
- Η δόνηση από το TBM μπορεί να προκάλεσε την κατάρρευση των κοντινών πηγαδιών βάθους 30 m και διαμέτρου 1,8 m. (*Σιδηροδρομικός σύνδεσμος σήραγγας Channel (Channel Tunnel Rail Link (UK, Φεβρουάριος 2003)*).
- Το EPBM ήταν ο καταλύτης για την έναρξη ολόκληρης της ακολουθίας των γεγονότων αστοχίας, κορεσμένες πολύ λεπτές άμμοι και λάσπες υπό πίεση 1,5 bar υπόγειων υδάτων. (*Αποχετευτικός αγωγός δρόμου Λάνγκσταφ (Langstaff Road Trunk Sewer) (Τορόντο - Καναδάς, 2 Μαΐου 2008)*).

- Η εκσκαφή προχωρούσε στους δύο σωλήνες παράλληλα μεταξύ τους και πραγματοποιήθηκε μεγάλο τμήμα μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα. (*Αυτοκινητόδρομος M6 (M6 Motorway) (Ουγγαρία, 24 Ιουλίου 2008)*).
- Ο χειριστής TBM με το σύστημα κλειστού πολτού καθιστά δύσκολη την ποσότητα του υλικού που εξορύσσετε κατά τη διάρκεια μιας ώθησης, η παρουσία ενός μεγάλου ογκόλιθου καθυστέρησε τη διείσδυση χωρίς να επιβραδύνει την εξαγωγή υλικού προκαλώντας την εκσκαφή. Υψηλή πίεση νερού και η επίδρασή της στον κύκλο της εκσκαφής. (*Σήραγγα Bright Water Tunnel (Σιάτλ - USA , 8 Μαρτίου 2009)*).
- Πάνω από την εκσκαφή όταν το EPBM χτύπησε θύλακες άμμου στη σταθερή στρώση αργίλου. (*Τραμ Beacon Hill (Seattle's Beacon Hill Light Rail) (Σιάτλ – USA, Ιούλιος 2009)*).
- Η εισροή λάσπης υψηλής πίεσης στην περιοχή εμπόδιζε την προώθηση του TBM και κατέστρεψε 7 δακτυλίους της τμηματικής επένδυσης. (*Σήραγγα Γκίνγκελ Γκάιμπ II (Headrace tunnel of Gilgel Gibe II HydroProject) (Αιθιοπία, Οκτώβριος 2006 – Ιανουάριος 2010)*).
- Λεπτό χώμα κυλούσε στη σήραγγα σχηματίζοντας μια τρύπα στο δρόμο καθώς το TBM περνούσε μέσα από το βράχο στο μαλακό έδαφος. Η σήραγγα τέμνει μια κρυφή περιοχή από μαλακό πηλό. (*Σήραγγα συλλογής Moda - Σχέδιο Αποχέτευσης Κωνσταντινούπολης (Moda Collector Tunnel, Istanbul Sewerage Scheme) (Τουρκία, 1989)*).
- Ένα τμήμα τοποθετημένου δακτυλίου έπεσε, επιτρέποντας το νερό και το χώμα να ρέουν στη σήραγγα γεμίζοντας το εσωτερικό του TBM και την σήραγγα. Περισσότερα από 1.000 m³ σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν για την πλήρωση του πρώτου βυθίσματος. Το βάρος του σκυροδέματος δρα σε μαλακό έδαφος κάτω από ένα υψηλό επίπεδο υπόγειων υδάτων προκάλεσε μια δεύτερη κατάρρευση του εδάφους. (*Σήραγγα Μετρό Κάιρο (Cairo Metro Tunnel) (Αίγυπτος, 3 Σεπτεμβρίου 2009)*).
- Η επένδυση μπορεί να είχε αστοχήσει ή η ασπίδα «έπεσε» σε ένα τεράστιο κενό ή ρήγμα στο έδαφος και η ουρά να χωρίστηκε από την επένδυση. (*Υποθαλάσσια σήραγγα Διυλιστηρίου Μιζουσίμα (Mizushima Refinery Subsea Tunnel) (Ιαπωνία, 14 Φεβρουαρίου 2012)*).

4.1.4 Εισροή υδάτων

- Η σήραγγα περνούσε από ένα ρηχό αντίκλινο και τέμνει μια σχισμή πλάτους περίπου 75 mm σχεδόν κάθετα, αέριο μεθάνιο από μια σχισμή μπήκε στη σήραγγα κατά την εκσκαφή. (*Σήραγγα Orange-fish (Νότια Αμερική, 1970)*).
- Γρανίτης στην πρόσοψη της σήραγγας και έδαφος υψηλής διαπερατότητας (*Μετρό Σεούλ – Γραμμή 5 (Seoul Metro Line 5 - Phase 2) (Κορέα, 11 Φεβρουαρίου 1992)*).
- Γρανίτης στην επιφάνεια της σήραγγας και υψηλή πίεση υπόγειων υδάτων. (*Μετρό Σεούλ - Γραμμή 5 (Seoul Metro Line 5 - Phase 2) (Κορέα, 7 Ιανουαρίου 1993)*).
- Διακύμανση της στάθμης των υπόγειων υδάτων που προκαλείται από παλιρροϊκές επιδράσεις με αποτέλεσμα την κατακόρυφη κίνηση του σωλήνα της σήραγγας προκαλώντας άνοιγμα των αρμών. (*Σήραγγα λυμάτων Hull (Sewage Tunnel, Hull) (UK, 1999)*).
- Οι τοπικές κακές συνθήκες εδάφους δεν συνυπολογίζονται στο σχεδιασμό των τμημάτων της σήραγγας. (*Σήραγγα λυμάτων Πόρτσμουθ (Wastewater Tunnel Portsmouth) (UK, Μάιος 2000)*).
- Είσοδος νερού με ταχύτητα άνω των 10 lt/sec συνοδευόμενη από τρεχούμενη άμμο στη σήραγγα που καλύπτει το μηχάνημα. Η σήραγγα διαπέρασε ένα φακό βρεγμένης λεπτόκοκκης άμμου ακριβώς πάνω από την στέψη. (*Σιδηροδρομική σήραγγα Γκιμπέι (Gibe Railway Tunnel) (Ρουμανία, 1985)*).
- Σήραγγα που διέρχεται από παγετώνα προκάλεσε ξαφνική εισροή υπόγειων υδάτων. (*Μετρό Λωζάνης M2 (Lausanne M2 Metro) (Ελβετία, 22 Φεβρουαρίου 2005)*).
- Μεγάλη διαρροή νερού από δεξαμενή. (*Ταχεία διέλευση Καοσιούγκ (Kaohsiung Rapid Transit) (Ταϊβάν, 4 Δεκεμβρίου 2005)*).
- Τα υπόγεια ύδατα κυλούσαν στη σήραγγα. (*Μετρό Γκουανγκοτσόου - Γραμμή 5 (Guangzhou Metro Line 5) (Κίνα, 17 Ιανουαρίου 2008)*).
- Ύπαρξη υψηλής πίεσης υπόγειων υδάτων, μείωση κάλυψης του στρώματος λασπόπετρας, διαδρομή νερού που δημιουργήθηκε από την τρύπα. (*Σήραγγα «Ημέρα πηλό βουνό» (Nikkure-yama Tunnel) (Ιαπωνία 2003)*).

- Το στρώμα μάργας που διαχωρίζει τα υπόγεια ύδατα που φέρουν στρώματα ήταν πολύ πιο λεπτό από ό,τι είχε αρχικά υποθεθεί. Οι ρωγμές με άμμο στο στρώμα μάργας λειτουργούσαν ως προτιμώμενες οδοί για το νερό. (*Μετρό του Μονάχου (Munich Underground) (Γερμανία, 27 Σεπτεμβρίου 1994)*).
- Η προστασία από τον παγετό ήταν υψηλή και η υψηλή περιεκτικότητα σε διογκωμένη άργιλο στον βράχο άρχισε να ρουφάει νερό και να επεκτείνεται σταδιακά για μεγάλο χρονικό διάστημα. (*Υποθαλάσσια σήραγγα Όσλοφιορντ (Oslofjord Subsea Tunnel) (Νορβηγία, 28 Δεκεμβρίου 2003)*).
- Λεπτός βράχος και εισροή εδάφους υπόγειων υδάτων. (*Μετρό Σεούλ – Γραμμή 5 (Seoul Metro Line 5 – Phase 2) (Κορέα, 17 Νοεμβρίου 1991)*).

4.1.5 Αστοχία γεωϋλικού διέλευσης της σήραγγας λόγω τοπικής διαφοροποίησης

- Η ύπαρξη εκφυλισμένης και πολύπλοκης δομής πάνω από τη γραμμή της σήραγγας η οποία δεν μπορούσε να προβλεφθεί συσώρευσε βαρύ φορτίο στον δακτύλιο αψίδας και στα πλευρικά τοιχώματα, η πρόσθετη εκσκαφή στη σήραγγα αύξησε τις τάσεις στον ήδη υπερφορτισμένο βράχο στα πλαϊνά τοιχώματα. (*Σήραγγα Πενμανσίελ (Penmanshiel Tunnel) (Σκωτία, Μάρτιος 1979)*).
- Μη εντοπισμένος εκ των προτέρων γρανίτης και έδαφος υψηλής διαπερατότητας. (*Μετρό Σεούλ – Γραμμή 5 (Seoul Metro Line 5 - Phase 2) (Κορέα, 27 Νοεμβρίου 1991)*).
- Ολίσθηση βράχου, κάτω από τα μπουλόνια βράχου λόγω της αυξημένης πίεσης δημιουργήθηκε διέλευση. (*Σήραγγα Lane Cove Tunnel (Αυστραλία, 2 Νοεμβρίου 2005)*).
- Έλλειψη χαρτογράφησης των ζωνών αδυναμίας που περιέχουν διογκωμένη άργιλο με αποτέλεσμα ανεπαρκή στήριξη βράχου. Η υγρασία στη σήραγγα του νερού πιθανώς να προκαλεί σταδιακή επέκταση του διογκούμενου πηλού που είχε ως αποτέλεσμα την αποκόλληση του βράχου. (*Μονάδα επεξεργασίας νερού σήραγγας Νέντρε Ρομερέικ ακατέργαστου και πόσιμου νερού (Nedre Romerike Water Treatment Plant, Crude Water and Potable Water Tunnels) (Νορβηγία, 2005)*).

- Δυσμενής γεωμετρία με αρμούς σχεδόν παράλληλους με τον άξονα της σήραγγας, τα μπουλόνια βράχου τοποθετούνται κυρίως παράλληλα με τους αρμούς βράχου με περιορισμένη σταθερότητα. (*Οδική σήραγγα Χάνεκλειβ (Hanekleiv Road Tunnel) (Νορβηγία, 25 Δεκεμβρίου 2006)*).
- Δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες. (*Διαχείριση όμβριων υδάτων και οδική σήραγγα (Stormwater Management and Road Tunnel) (Μαλαισία, 2003 - 2006)*).
- Απέτυχε να ληφθεί υπόψη η γεωλογία της τοποθεσίας, μια άγνωστη κορυφογραμμή βράχου με κυρτή κορυφή 10 m υψηλότερη από ό,τι είχε προβλέψει στο προφίλ των καιρικών συνθηκών και μπορεί να προκάλεσε την κατάρρευση της σήραγγας μεγάλου ανοίγματος που ανασκάφηκε. (*Σταθμός Μετρό Σάο Πάολο (São Paulo Metro Station) (Βραζιλία, 12 Ιανουαρίου 2007)*).
- Χαλαρό έδαφος. (*Σήραγγα «Κυκλική Γραμμή 4» (Circle Line 4 Tunnel) (Σιγκαπούρη, 23 Μαΐου 2008)*).
- Η κατάρρευση και η πτώση βράχων σημειώθηκαν όταν ολοκληρώθηκε η κατασκευή της σήραγγας. Περίπου 15-20 m τμήμα της σήραγγας και 9 km από την πύλη επηρεάστηκαν από το συμβάν και η ποσότητα εισόδου υλικού στη σήραγγα ήταν περίπου 8500 m³. Η κατάρρευση δημιούργησε μια κοιλάτητα 30 m έως 40 m βάθους. (*Σήραγγα Γκίνγκελ Γκάμπ II (Headrace tunnel of Gilgel Gibe II HydroProject) (Αιθιοπία, Οκτώβριος 2006 – Ιανουάριος 2010)*).
- Το μέτωπο ενός ρηγματωμένου βράχου δεν στερεώθηκε κατά τη διάρκεια της εκσκαφής σήραγγας. Οι βράχοι επηρεάστηκαν και απέτυχαν σταδιακά. Στη συνέχεια, οι κοιλότητες λόγω του υπερκείμενου εδάφους προκάλεσαν βυθίσματα. (*Γραμμή 4 Μετρό του Ρίου (Rio's Metro Line 4) (Βραζιλία, 11 Μαΐου 2014)*).
- Διαστολή της διογκούμενης αργίλου υπό υψηλή πίεση νερού κατά τη διάτρηση των μπουλονιών βράχου. Ο συνδυασμός της διόγκωσης του βράχου και της υψηλής πίεσης παρήγαγε ένα φαινόμενο συμπίεσης, το οποίο είχε ως αποτέλεσμα τη σταδιακή εξασθένηση της βραχώδους μάζας στη σήραγγα. (*Οδική σήραγγα Lærdal στην ευρωπαϊκή εθνική οδό E16 (Lærdal Road Tunnel) (Νορβηγία, 15 Ιουνίου 1999)*).

- Αστάθεια βράχου στην εκσκαφή που προκαλείται από πρόσληψη νερού. Απροσδόκητη δομική αστάθεια της βραχομάζας κατά τη ζώνη ρήγματος. Αστάθεια σημειώθηκε στα προσωρινά τοιχώματα στήριξης. Η λεπτομερής έρευνα ήταν σε εξέλιξη και η ακριβής αιτία της αποτυχίας παρέμενε άγνωστη. (Σήραγγα Μπλάνκα (*Blanka Tunnel*) (*Δημοκρατία της Τσεχίας, 20 Μαΐου 2008 – 12 Οκτωβρίου 2008 – 6 Ιουλίου 2010*)).
- Απροσδόκητη αλλαγή στα επιφανειακά υλικά που συναντήθηκαν από ελαφρύ πέτρωμα σε πλήρως αποσυντιθέμενο βράχο. Οι έντονες βροχοπτώσεις και το έδαφος στη θέση της προηγούμενης βλάβης δεν είχαν σταθεροποιηθεί πλήρως. (Σιδηρόδρομος Σέντζεν (*Shenzhen Express Rail Link*) (*Κίνα, 27 Μαρτίου 2012 – 10 και 18 Οκτωβρίου 2011 – 30 Οκτωβρίου 2011*)).
- Προοδευτική ανάπτυξη απροσδόκητων ρωγμών εντός της ζώνης εδαφοβελτιώσεως με αποτέλεσμα διαρροών υπόγειων υδάτων, διαβρώσιμο έδαφος που έχει διαταραχθεί λόγω υψηλής πίεσης νερού, παρουσιάστηκαν μηχανικές διαταραχές ή κραδασμοί κατά τη διαδικασία θραύσης που οδήγησαν σε σοβαρές ρωγμές, δυσμενείς επιφανειακές συνθήκες που αποτελούνταν από ιλυώδεις άμμους με περιεκτικότητα σε νερό σχεδόν να φτάνει στα όρια υγρών. (Μετρό Καοσιούγκ (*Kaohsiung Rapid Transit*) (*Ταϊβάν, 29 Μαΐου 2004*)).
- Πιθανές δυσμενείς συνθήκες εδάφους και υπόγειων υδάτων. (Ταχεία διέλευση Καοσιούγκ (*Kaohsiung Rapid Transit*) (*Ταϊβάν, 10 Αυγούστου 2004*)).
- Τοπική διακύμανση στη γεωλογία με μείωση της κάλυψης μάργας σε 1-1,5 m οδήγησε σε υπερένταση της προσωρινής επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. (Μετρό του Μονάχου (*Munich Underground*) (*Γερμανία, 1980*)).
- Αποτυχία έγκαιρης εφαρμογής της υποστήριξης. Η σήραγγα διαπέρασε το υδατοπερατό στρώμα σχιστόλιθου λεπτής στρώσης, το οποίο βρίσκεται πάνω και πάνω από τη θέση αστοχίας. (Σήραγγες αυτοκινητοδρόμων (*Motorway Tunnels*) (*Αυστρία, 1993-1995*)).
- Ο παχύς ασβεστόλιθος είχε κατώτερα μηχανικά χαρακτηριστικά από το ομοιογενές μέσο που υποτίθεται στο σχεδιασμό, δυσμενής προσανατολισμός του ρήγματος, εφαρμογή ανεπαρκούς υποστήριξης λόγω της υπερβολικής εξάρτησης στους υπολογισμούς. (Μετρό σήραγγα Μετέωρο (*Météor Metro Tunnel*) (*Γαλλία, 14 Φεβρουαρίου 2003*)).

- Απροσδόκητη γεωλογία με ρηγματωμένα πετρώματα και μαζικές εισροές νερού, 6 μεγάλα ρήγματα που βρέθηκαν κατά μήκος της ευθυγράμμισης της σήραγγας. (*Σήραγγα Χιούσαν (Hsuehshan Tunnel) (Ταϊβάν, 1991-2004)*).
- Το υπάρχον φρεάτιο 1,5-2 m πάνω από την στέψη της σήραγγας δεν έχει γεμίσει σωστά, με αποτέλεσμα η κορεσμένη άργιλος και το νερό του πηγαδιού να ρέουν στη σήραγγα και επακόλουθη κατάρρευση των τοιχωμάτων του φρεατίου και της γύρω από τον πηλό που ακολουθείται από την αποστράγγιση του ανώτερου στρώματος λεπτόκοκκου άμμου στη σήραγγα και από το υπόγειο των κτιριακών κατασκευών. (*Μετρό Κωνσταντινούπολης (Istanbul Metro) (Τουρκία, Σεπτέμβριος 2001)*).
- Ο συνδυασμός μιας ζώνης από μαλακό πηλό και αμμώδους αργίλου στην επάνω αριστερή γωνία του μετώπου. (*Έργο διαμετακόμισης ελαφρού σιδηροδρόμου της Οκτάβα (Ottawa's Light Rail Transit Project) (Καναδάς, 20 Φεβρουαρίου 2014)*).
- Παρουσιάστηκε αστοχία κατά την αφαίρεση της τμηματικής επένδυσης στην οροφή της σήραγγας και την επαναφορά της σήραγγας για τη διόρθωση της οριζόντιας ευθυγράμμισης. Απροσδόκητες συνθήκες εδάφους (προσχώσεις που βρέθηκαν πολύ βαθύτερα), σπασμένο δίκτυο ύδρευσης (μη επιβεβαιωμένο). (*Μετρό Λος Άντζελες (Los Angeles Metro) (ΗΠΑ, 22 Ιουνίου 1995)*).
- Εισροή κατά την μετακίνηση μεταλλικού ξυλότυπου για επένδυση από σκυρόδεμα. Παρουσιάστηκε μια αδύναμη ζώνη ρήγματος. (*Οδική σήραγγα Χόλμεστραντ (Holmestrand Road Tunnel) (Νορβηγία, 16 Δεκεμβρίου 1981)*).
- Δημιουργία κρατήρα στην επιφάνεια εδάφους. Ένα «κρυμμένο» κατακόρυφο ρήγμα που βρίσκεται 1 m πίσω από την επένδυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. (*Μετρό Βαρκελώνης (Barcelona Metro) (Ισπανία, 27 Ιανουαρίου 2005)*).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Αναφέροντας τις πιθανές αιτίες αστοχίας που μπορεί να προκαλέσει μια σήραγγα κατά την διάρκεια της κατασκευής, προτείνονται μέτρα έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης της σήραγγας για την αποτροπή κατάρρευσης και κινδύνου ανθρώπινης ζωής.

1) Ενέματα

- Αντικατάσταση κατεστραμμένων δακτυλίων με ενέματα. (Σήραγγα λυμάτων Πόρτσμουθ (*Wastewater Tunnel Portsmouth*) (UK, Μάιος 2000).
- Τα κενά γεμίστηκαν με ενέματα. (Σιδηροδρομικός σύνδεσμος σήραγγας Channel (*Channel Tunnel Rail Link*) (UK, Φεβρουάριος 2003).
- Έγχυση χημικού ενέματος κατακόρυφα με σκοπό την ενίσχυση του εδάφους γύρω από το TBM και την υποστήριξη εκσκαφής της σήραγγας. (Σήραγγα Μετρό Κάιρο (*Cairo Metro Tunnel*) (Αίγυπτος, 3 Σεπτεμβρίου 2009).
- Οι κοιλότητες που προκλήθηκαν από τις υπερεκσκαφές TBM επιχωματώθηκαν από ενέματα που μερικές φορές έφταναν στην επιφάνεια του εδάφους. (Μετρό Αθηνών (*Athens Metro*) (Ελλάδα, 1991-1998).
- Επίχωση του κρατήρα με χώμα ακολουθούμενη από τσιμεντοκονία και χημική αρμολόγηση. (Μετρό Σεούλ – Γραμμή 5 (*Seoul Metro Line 5 – Phase 2*) (Κορέα, 17 Νοεμβρίου 1991)).
- Το τμήμα της σήραγγας επιχωματώθηκε με 18.000 m³ ρευστοκονιάματος, πρόσθετες γεωτρήσεις, οριζόντιοι ανιχνευτές και στηρίγματα για μελλοντική εκσκαφή. (Μετρό Βαρκελώνης (*Barcelona Metro*) (Ισπανία, 27 Ιανουαρίου 2005).
- Πίσω από τη ζώνη της σήραγγας τοποθετήθηκαν ενισχυμένες νευρώσεις από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. (Οδική σήραγγα Lærdal στην ευρωπαϊκή εθνική οδό E16 (*Lærdal Road Tunnel*) (Norway, 15 June 1999).

2) Χαλύβδινα τόξα

- Χαλύβδινοι δακτύλιοι τοποθετήθηκαν στην σήραγγα εκατέρωθεν της κατάρρευσης, 3.300 m³ ενέματος για να γεμίσει το κενό και να σταθεροποιήσει την περιοχή. (Μετρό Λος Άντζελες (Los Angeles Metro) (ΗΠΑ, 22 Ιουνίου 1995)).
- Παρέχεται άμεση στήριξη στο τμήμα της σήραγγας με μια σειρά από χαλύβδινα τόξα. (Σήραγγα Πενμανσίελ (Penmanshiel Tunnel) (Σκωτία, Μάρτιος 1979)).
- Εγκατάσταση χαλύβδινων πλαισίων για την ενίσχυση των κατεστραμμένων τμημάτων δακτυλίου. (Μετρό Καοσιούγκ (Kaohsiung Rapid Transit) (Ταϊβάν, 29 Μαΐου 2004)).

3) Εκτοξευόμενο/έγχυτο σκυρόδεμα

- Υποστήριξη βράχων, μπουλόνια αγκύρωσης και ενισχυμένες νευρώσεις από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. (Υποθαλάσσια σήραγγα Όσλοφιορντ (Oslofjord Subsea Tunnel) (Νορβηγία, 28 Δεκεμβρίου 2003)).
- Μέχρι τη διάρρηξη η σήραγγα ανασκάφηκε με γεωτρήσεις μήκους μόνο 2 m σε συνδυασμό με μπουλόνια μήκους 6 m από τη χυτή επένδυση σκυροδέματος του προηγούμενου γύρου και επένδυση από χυτό σκυρόδεμα κοντά στην όψη. (Οδική σήραγγα Χόλμεστραντ (Holmestrand Road Tunnel) (Νορβηγία, 16 Δεκεμβρίου 1981)).
- Ανακατασκευή σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. (Σήραγγα λυμάτων Hull (Sewage Tunnel, Hull) (UK, 1999)).
- Πλήρωση της αίθουσας κάτω από το κτίριο με σκυρόδεμα. (Μετρό σήραγγα Μετέωρο (Météor Metro Tunnel) (Γαλλία, 14 Φεβρουαρίου 2003)).
- Επένδυση έγχυτου σκυροδέματος και τοποθέτηση περίπου 4.000 μπουλονιών βράχου. (Οδική σήραγγα Χάνεκλειβ (Hanekleiv Road Tunnel) (Νορβηγία, 25 Δεκεμβρίου 2006)).

- Γέμισμα του βυθίσματος με σκυρόδεμα χαμηλής αντοχής. Έγινε επισκευή του αγωγού ύδρευσης και επισκευή δρόμου. (Αποχετευτικός αγωγός δρόμου Λάνγκσταφ (Langstaff Road Trunk Sewer) (Τορόντο - Καναδάς, 2 Μαΐου 2008)).
- Το βύθισμα επιχωματώθηκε με περισσότερα από 620 m³ σκυροδέματος. (Έργο διαμετακόμισης ελαφρού σιδηροδρόμου της Οκτάβα (Ottawa's Light Rail Transit Project) (Καναδάς, 20 Φεβρουαρίου 2014)).
- Γέμισμα της περιοχής της σήραγγας με αφρώδες σκυρόδεμα, συναρμολόγηση κάτω από την περιοχή κατάρρευσης. (Σήραγγα «Ημέρα πηλό βουνό» (Nikkure-yama Tunnel) (Ιαπωνία 2003)).
- Κρατήρας επιχωματωμένος με σκυρόδεμα. (Μετρό Γκουανγκοτσόου - Γραμμή 5 (Guangzhou Metro Line 5) (Κίνα, 17 Ιανουαρίου 2008)).
- Οι κοιλότητες επιχωματώθηκαν με περίπου 100 m³ σκυροδέματος. (Γραμμή 4 Μετρό του Ρίου (Rio's Metro Line 4) (Βραζιλία, 11 Μαΐου 2014)).

4) Αγκύρια

- Σε σήραγγα παράκαμψης 230 m έγινε εκσκαφή από TBM για να περάσει το σημείο αστοχίας. Ανακατασκευή του κατεδαφισμένου τμήματος της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χαλύβδινη στήριξη νευρώσεων. (Σήραγγα Γκίνγκελ Γκάμπ II (Headrace tunnel of Gilgel Gibe II HydroProject) (Αιθιοπία, Οκτώβριος 2006 – Ιανουάριος 2010)).
- Τοποθέτηση αγκυρών καλωδίων μήκους 10 m μαζί με μόνιμη στήριξη επένδυσης οπλισμένου σκυροδέματος πάχους 200 mm. (Μετρό Όσλο (Metro Oslo Tunnel) (Νορβηγία, 17 Ιουνίου 2004)).
- Αντικατάσταση μετατοπισμένων συγκολλητικών αγκυρίων. (Διακρατική σήραγγα σύνδεσης 90 (Interstate 90 Connector Tunnel) (Βοστώνη Μασαχουσέτης, Ιούλιος 2006)).

- Η εκσκαφή πραγματοποιήθηκε μετά από προσαρμολότητα με τη στήριξη συστηματικών αγκυρίων στερέωσης που εκτείνονται 32 m στο έδαφος για την σταθεροποίηση της επιφάνειας. (Σταθμός Μετρό Σάο Πάολο (São Paulo Metro Station) (Βραζιλία, 12 Ιανουαρίου 2007)).

5) Βοηθητικά μέσα

- Μακροχρόνια λειτουργία αρμολότητας για σταθεροποίηση του εδάφους στην περιοχή. (Γραμμή Victoria κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (Victoria Line Underground) (UK, 1965)).
- Η κίνηση της σήραγγας συνεχίστηκε σε ένα ξύλινο κιβώτιο και κατασκευάστηκαν δύο πλάκες για να κλείνουν τον πυθμένα του φρεατίου. (Σήραγγα λυμάτων (Southend-On-Sea Sewage Tunnel) (Λονδίνο, 1966)).
- Επίχωμα με θρυμματισμένο βράχο και τσιμέντο. (Μετρό Γκουανγκοτσόου - Γραμμή 3 (Guangzhou Metro Line 3) (Κίνα, 1 Απριλίου 2004)).
- Μια σειρά από 11 πασσάλους κατασκευάστηκε μπροστά από την όψη που έχει καταρρεύσει για την ενίσχυση του εδάφους και τον περιορισμό της περαιτέρω ροής υλικού στη σήραγγα. (Μετρό Λωζάνης M2 (Lausanne M2 Metro) (Ελβετία, 22 Φεβρουαρίου 2005)).

6) Εξειδικευμένοι τρόποι

- Ένα μέρος της σήραγγας βυθίστηκε για την απελευθέρωση του TBM. (Σήραγγα συλλογής Moda - Σχέδιο Αποχέτευσης Κωνσταντινούπολης (Moda Collector Tunnel, Istanbul Sewerage Scheme) (Τουρκία, 1989)).
- Αναπτύχθηκε η μέθοδος «Blob grouting» (Συναρμολότητα άμορφης μάζας) με δακτύλιο πολύ παχύ και μη ενυδατωμένου μπετονίτη για τη σφράγιση των ρωγμών. Ένας τοίχος κατασκευάστηκε κατά μήκος της σήραγγας αρμολογημένο με τσιμέντο. (Σήραγγα Orange-fish (Νότια Αμερική, 1970)).

- Για την επακόλουθη εκσκαφή υιοθετήθηκε φορμόλη (ομπρέλα) με διάτρητους σωλήνες μήκους 6 m και 50 mm. Διατηρήθηκε πλούσιος κεντρικός πυρήνας και η ανασκαφή έγινε σε μικρά τμήματα. (*Σήραγγες αυτοκινητοδρόμων (Motorway Tunnels) (Αυστρία, 1993-1995)*).
- Χειροκίνητη αντικατάσταση των συντριμμιών. (*Μονάδα επεξεργασίας νερού σήραγγας Νέντρε Ρομερέικ ακατέργαστου και πόσιμου νερού (Nedre Romerike Water Treatment Plant, Crude Water and Potable Water Tunnels) (Νορβηγία, 2005)*).
- Τσιμεντένια τείχη φραγμού για να σταματήσει η διάδοση του εδάφους και των υπόγειων υδάτων. (*Γραμμή Τραμ Μετρό Βορρά-Νότου Κολωνίας (Cologne North-South Metro Tram Line) (Γερμανία, 3 Μαρτίου 2009)*).
- Κατασκευή παράκαμψης σήραγγας μήκους 200 m. (*Σήραγγα Γκλέντοου Χέντρεις (Glendoe Headrace Tunnel) (Σκωτία, Αύγουστος 2009)*).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

<https://theconstructor.org/construction/tunnel-construction-methods/17167/>

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CE%AE%CF%81%CE%B1%CE%B3%CE%B3%CE%B1>

https://apothesis.lib.hmu.gr/bitstream/handle/20.500.12688/2121/MylonakisPanagiotis_KeramisanosAlexandros_SovolakisDimitrios2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y

http://www.odo-lexis.gr/pdf.php?n=TNL_2_gr

<https://eclass.uop.gr/modules/document/index.php?course=1075&openDir=/5f9bb24czKkE>

https://www.academia.edu/32351474/Catalogue_of_Notable_Tunnel_Failures_Case_Histories_up_to_April_2015